Entwicklung eines Handlungsleitfadens zur bedarfsgerechten Auswahl und Konfiguration von informatorischen Montageassistenzsystemen

vorgelegt von
M. Eng.
Sven Bendzioch

an der Fakultät V – Verkehrs- und Maschinensysteme
der Technischen Universität Berlin
zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor der Ingenieurwissenschaften
– Dr.-Ing. –

genehmigte Dissertation

Promotionsausschuss:

Vorsitzender:	Prof. Dr. Markus Feufel
Gutachter:	Prof. Dr. Matthias Rötting
Gutachter:	Prof. Dr. Sven Hinrichsen

Tag der wissenschaftlichen Aussprache: 22. Februar 2023

Berlin 2023

Vorwort

Das vorliegende Dissertationsvorhaben entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter im Labor für Industrial Engineering an der Technischen Hochschule Ostwestfalen-Lippe. In dieser Zeit habe ich zwei Forschungsprojekte – Montexas4.0 (FKZ: 02L15A260) und SInnAssist (FKZ: 13FH047SB8) – federführend bearbeitet, welche die Entwicklung von informatorischen Montageassistenzsystemen zum Gegenstand hatten. Durch die damit verbundenen Herausforderungen und Entwicklungen konnte ich mich nicht nur in fachlicher, sondern auch in persönlicher Hinsicht weiterentwickeln und die vorliegende Dissertation erfolgreich anfertigen. Während dieser mitunter nicht einfachen und mit Hürden gesäten Zeit haben mich einige Personen in meinem persönlichen Umfeld besonders motiviert, unterstützt, aufgebaut, ermutigt und gefördert, denen ich an dieser Stelle meinen besonderen Dank aussprechen möchte.

Zuallererst möchte ich mich bei Herrn Prof. Dr. Matthias Rötting für die Betretung dieser Arbeit recht herzlich bedanken. Ohne ihn wäre dieses Vorhaben und das persönliche Ziel der Promotion nicht möglich gewesen. Die Diskussionen und Rückmeldungen zum Thema gaben mir zudem das Gefühl, auf dem richtigen Weg zu sein und ermutigten mich im weiteren Vorgehen. Für das in mich gesetzte Vertrauen möchte ich mich an dieser Stelle ganz besonders bedanken. Mein Dank gilt auch Herrn Prof. Dr. Sven Hinrichsen, der mich vor Ort an der Technischen Hochschule Ostwestfalen-Lippe betreut hat. In dieser Zeit hat er mich von der Ideenfindung bis zur Umsetzung stets unterstützt und gefördert und dazu beigetragen, dass ich über meine eigenen Ziele hinausgewachsen bin. Auch bei ihm möchte ich mich für das entgegengebrachte Vertrauen in meine Arbeit recht herzlich bedanken.

Ohne die tatkräftige Unterstützung durch meine Kollegen wären viele Ergebnisse dieser Arbeit so nicht möglich gewesen. In diesem Zusammenhang möchte ich mich ganz herzlich bei Alexander Nikolenko, Philip Sehr, Benjamin Adrian, Dominic Beckendorf, Andreas Schulz und Dominic Bläsing für die vielfältige Unterstützung bedanken. Außerdem möchte ich mich auch bei Herrn Prof. Dr. Manfred Bornewasser für den fachlichen Austausch zum Thema Komplexität bedanken. Ebenfalls gilt mein Dank allen Beteiligten aus den Unternehmen Spier GmbH & Co. Fahrzeugwerk KG und HOMAG Kantentechnik GmbH, die mir die praxisnahe Entwicklung, Umsetzung und Validierung der Dissertationsinhalte ermöglichten.

Der letzte und wohl wichtigste Dank gilt meiner Familie, die mich auf meinem bisherigen

Lebensweg bedingungslos unterstützt hat. Schließlich waren sie es, die mich durch alle Höhen und Tiefen der Promotion begleiteten, mir den nötigen Freiraum für die Bearbeitung dieser verschafften und auch dafür sorgten, dass ich abseits der Arbeit regelmäßig Ablenkung fand. In dieser Hinsicht möchte ich mich vor allem bei meiner Freundin Nele Thießen und ihrer Familie, meiner Schwester Sandra Jenzen sowie meinen Eltern Barbara und Siegfried Bendzioch bedanken. Die vorliegende Arbeit widme ich daher meiner Familie. Vielen Dank, dass ihr bedingungslos an mich geglaubt und mich stets bestärkt habt.

Zusammenfassung

Mit dem Wandel zu variantenreicheren und komplexeren Produkten, sinkenden Losgrößen und einer hohen Innovationsdynamik steigen die kognitiven Anforderungen an die Beschäftigten in der manuellen Montage deutlich. Bedingt durch diese Veränderungen müssen die Beschäftigten immer häufiger variierende Vorgaben und Informationen sichten sowie Entscheidungen hinsichtlich der sachgerechten Ausführung treffen. Überforderungen, psychische Beanspruchungen sowie das Verfehlen von quantitativen und qualitativen Produktionszielen sind somit keine Seltenheit, wenn repetitive Tätigkeiten gegenüber hochvariablen Tätigkeiten abnehmen. Eine vielversprechende Lösung stellt in diesem Zusammenhang die Implementierung von informatorischen Assistenzsystemen dar. Diese Systeme ermöglichen es, alle relevanten Informationen zum richtigen Zeitpunkt und in der richtigen Form bereitzustellen, so dass die aus dem Wandel resultierende Komplexität für die Beschäftigten beherrschbar wird. Bei der Einführung dieser Systeme stehen Unternehmen jedoch vor der Herausforderung, das für ihre Arbeitsbedingungen geeignete informatorische Assistenzsystem auszuwählen und zu implementieren. Ursächlich hierfür sind fehlende Kenntnisse über den wirtschaftlichen Mehrwert, die Identifizierung von geeigneten Arbeitssystemen und Strategien zur bedarfsgerechten und wirtschaftlichen Einführung dieser Systeme.

Vor diesem Hintergrund wird in der vorliegenden Arbeit ein Handlungsleitfaden vorgestellt, der den bedarfsgerechten und wirtschaftlichen Einsatz von informatorischen Assistenzsystemen in der manuellen Montage ermöglicht. Grundlage für die Entwicklung des Handlungsleitfadens bildete die Durchführung einer empirischen Laborstudie zu den humanorientierten und wirtschaftlichen Potenzialen ausgewählter Systemtypen sowie die Entwicklung eines Fragebogens zur Prognose der Einsatzpotenziale von informatorischen Assistenzsystemen in bestehenden Arbeitssystemen. Aus den gewonnenen Erkenntnissen sowie praxisbezogenen Inhalten wurden sodann Kriterien und Empfehlungen für die Auswahl, Konfiguration und Implementierung von informatorischen Assistenzsystemen abgeleitet und in einen anwenderorientierten Handlungsleitfaden überführt. Die Ergebnisse leisten damit einen entscheidenden Beitrag, bestehende Hemmnisse und Hürden bei der Implementierung von informatorischen Assistenzsystemen abzubauen sowie deren Potenziale zu erkennen und zu erschließen.

Schlüsselwörter: Informatorische Assistenzsysteme · Manuelle Montage · Komplexitätsbewertung · Arbeitsanalyseverfahren · Handlungsleitfaden · Laboruntersuchungen

Abstract

With the change to more varied and more complex products, decreasing batch sizes and a high innovation dynamic, the cognitive demands on employees in manual assembly are increasing significantly. As a result of these changes, employees must increasingly sift through varying specifications and information and make decisions regarding proper execution. Excessive demands, mental stress and the failure to achieve quantitative and qualitative production targets are therefore not uncommon when repetitive activities are reduced compared to highly variable activities. A promising solution in this context is the implementation of informational assistance systems. These systems make it possible to provide all relevant information at the right time and in the right form, so that the complexity resulting from change becomes manageable for employees. When introducing these systems, however, companies are faced with the challenge of selecting and implementing the right informational assistance system for their own working conditions. The reasons for this are a lack of knowledge about the economic added value, the identification of suitable work systems and strategies for introducing these systems in a way that meets needs and is economical.

In this context, the paper presents a guideline for action that enables the demand-oriented and economical use of informational assistance systems in manual assembly. The basis for the development of the guideline was the implementation of an empirical laboratory study on the human-oriented and economic potentials of selected system types as well as the development of a questionnaire for the prognosis of the application potentials of informational assistance systems in existing work systems. Criteria and recommendations for the selection, configuration and implementation of informational assistance systems were then derived from the findings and practice-related content and transferred into a user-oriented action guideline. The results of the work thus make a decisive contribution to reducing existing obstacles and hurdles in the implementation of informational assistance systems and to recognizing and exploiting their potential.

Keywords: Informational Assistance Systems · Manual Assembly · Complexity Evaluation · Work Analysis Method · Action Guideline · Laboratory Studies

Vorveröffentlichte Teilergebnisse

Bendzioch, S., Hinrichsen, S., & Bornewasser, M. (2020). Produktivität der Montagearbeit. In M. Bornewasser & S. Hinrichsen (Hrsg.), Informatorische Assistenzsysteme in der variantenreichen Montage: Theorie und Praxis (S. 113-134). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-662-61374-0_6

Bendzioch, S., Bornewasser, M., & Hinrichsen, S. (2020). Einführung von Montageassistenzsystemen. In M. Bornewasser & S. Hinrichsen (Hrsg.), Informatorische Assistenzsysteme in der variantenreichen Montage: Theorie und Praxis (S. 135-157). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-662-61374-0_7

Bendzioch, S., & Hinrichsen, S. (2020). How to Configure Assembly Assistance Systems – Results of a Laboratory Study. In I. L. Nunes (Hrsg.), Advances in Human Factors and Systems Interaction: Proceedings of the AHFE 2020 Virtual Conference on Human Factors and Systems Interaction, July 16-20, 2020, USA (S. 25-31). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-51369-6_4

Bendzioch, S., Hinrichsen, S., & Bornewasser, M. (2020). Validierung eines Instruments zur Ermittlung der Einsatzpotenziale von informatorischen Montageassistenzsystemen. In Gesellschaft für Arbeitswissenschaft (Hrsg.), Digitaler Wandel, digitale Arbeit, digitaler Mensch?: Bericht zum 66. Frühjahrskongress der Gesellschaft für Arbeitswissenschaft e. V. (GfA) vom 16.03.- 18.03.2020 in Berlin (B.18.4). GfA-Press.

Bendzioch, S., Bläsing, D., & Hinrichsen, S. (2020). Comparison of different Assembly Assistance Systems under Ergonomic and Economic Aspects. In T. Ahram, W. Karwowski, S. Pickl & R. Taiar (Hrsg.), Human Systems Engineering and Design II: Proceedings of the 2nd International Conference on Human Systems Engineering and Design (IHSED2019): Future Trends and Applications, September 16-18, 2019, Universität der Bundeswehr München, Munich, Germany (S. 20-25). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-27928-8_4

Bendzioch, S., Hinrichsen, S., Adrian, B., & Bornewasser, M. (2020). Method for Measuring the Application Potential of Assembly Assistance Systems. In I. L. Nunes (Hrsg.), Advances in Human Factors and Systems Interaction: Proceedings of the AHFE 2019 International Conference on Human Factors and Systems Interaction, July 24-28, 2019, Washington D.C., USA (S. 3-11). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-20040-4_1

Bendzioch, S., Bornewasser, M., Hinrichsen, S., & Adrian, B. (2019). Messung der informatorischen Komplexität zur Abschätzung der Einsatzpotenziale von Montageassistenzsystemen. In Gesellschaft für Arbeitswissenschaft e. V. (Hrsg.), Arbeit interdisziplinär analysieren - bewerten - gestalten: Bericht zum 65. Frühjahrskongress der Gesellschaft für Arbeitswissenschaft e. V. (GfA) vom 27.02.- 01.03.2019 in Dresden (C.9.1). GfA-Press.

Bendzioch, S., Hinrichsen, S., Adrian, B., & Bornewasser, M. (2018). Assessing the Economic and Human-Centered Potential of Assembly Assistance Systems. In F. J. Villmer & E. Padoano (Hrsg.), Production Engineering and Management: Proceedings 8th International Conference. Oktober 04 - 05, 2018 in Lemgo, Germany (S. 127-136). Hochschule Ostwestfalen-Lippe.

Bendzioch, S., Hinrichsen, S., Winter, M., Adrian, B., & Bornewasser, M. (2018). Wirtschaftliche und humanorientierte Einsatzpotenziale von Montageassistenzsystemen. In Gesellschaft für Arbeitswissenschaft e. V. (Hrsg.), ARBEITS(S).WISSEN.SCHAF(F)T - Grundlage für Management & Kompetenzentwicklung: Bericht zum 64. Frühjahrskongress der Gesellschaft für Arbeitswissenschaft e. V. (GfA) vom 21.02.- 23.02.2018 in Frankfurt (B.5.2). GfA-Press.

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung 1
1.1 Relevanz der Thematik 1
1.2 Problemstellung 3
1.3 Zielsetzung und Vorgehensweise 5

2. Grundlagen 9
2.1 Industrielle Montage 9
2.1.1 Relevanz der industriellen Montage 9
2.1.2 Begriffe und Merkmale der industriellen Montage 10
2.1.3 Ablauf- und Montageprinzipien 11
2.1.4 Paradigmenwechsel – Homogenität weicht zunehmender Diversität 15
2.1.5 Produktivität der Montagearbeit 19
2.2 Der Mensch in der manuellen Montage 21
2.2.1 Merkmale sensumotorischer Tätigkeiten 21
2.2.2 Informationsverarbeitung des Menschen 23
2.2.3 Qualifizierung im Kontext der Montage 25
2.2.4 Belastungs-Beanspruchungs-Konzept 29
2.3 Informatorische Montagesystemgestaltung 32
2.3.1 Montageinstruktion – Einordnung und Gestaltungshinweise 32
2.3.2 Begriffe und Merkmale von Montageassistenzsystemen 35
2.3.3 Wirkprinzip eines informatorischen Assistenzsystems 36
2.3.4 Klassifizierung und Typen informatorischer Assistenzsysteme 37

3. Stand der Forschung 41
3.1 Studien zum Einsatzpotenzial von Montageassistenzsystemen 41
3.2 Verfahren zur Einsatzpotenzialbewertung von Montageassistenzsystemen 46
3.3 Ansätze zur Implementierung von Montageassistenzsystemen 49
3.4 Spezifizierung und Abgrenzung der Forschungsziele 54

4. Untersuchung der Einsatzpotenziale von Montageassistenzsystemen 57
4.1 Ziel und Methodik 57
4.2 Bestimmung der relevanten Einfluss- und Untersuchungsgrößen 58
4.3 Generelles Vorgehen 59
4.3.1 Ablauf der Versuchsdurchführung 59
4.3.2 Eingesetzte Pre- und Post-Tests 59

4.3.3 Auswertung der Untersuchungsreihen 61
4.4 Stichprobe 62
4.5 Untersuchungsdesgin 63
4.5.1 Eingesetzte Unterstützungssysteme 63
4.5.2 Untersuchungsaufgabe 67
4.5.3 Untersuchungsaufbau 69
4.5.4 Unabhängige und abhängige Variablen 70
4.5.5 Untersuchungsdurchführung 71
4.6 Hypothesen 72
4.7 Ergebnisse 72
4.7.1 Untersuchungen zur Anlern- und Ausführungszeit 72
4.7.2 Untersuchungen zu den Montage- und Kommissionierfehlern 76
4.7.3 Untersuchungen zur Arbeitsperson 78
4.8 Interpretation und kritische Würdigung der Ergebnisse 80

5. Prognosemodell zum Einsatz von Montageassistenzsystemen 85
5.1 Ziel und Methodik 85
5.2 Fragebogen- und Itemkonstruktion 86
5.2.1 Definition des zu erfassenden Konstrukts 86
5.2.2 Bestimmung der relevanten Einflussgrößen 87
5.2.3 Generierung des initialen Itempools 89
5.2.4 Itemselektion und -überprüfung 93
5.3 Statistische Überprüfung des Itempools und Normierung 98
5.3.1 Vorgehen und Anspruchsniveaus 98
5.3.2 Untersuchungsrahmen und Stichprobe 100
5.3.3 Explorative Faktorenanalyse 100
5.3.4 Faktoreninterpretation 107
5.3.5 Normierung und Interpretation der Fragebogenskala 110
5.4 Überprüfung der Hauptgütekriterien des Fragebogens 112
5.4.1 Objektivität 112
5.4.2 Reliabilität 112
5.4.3 Validität 114
5.5 Interpretation und kritische Würdigung der Ergebnisse 116

6. Leitfaden zur Einführung von Montageassistenzsystemen 119
6.1 Ziel und Methodik 119
6.2 Herausforderungen und Rahmenbedingungen 121
6.3 Phasenmodell zur Einführung eines Montageassistenzsystems 122

6.3.1 Phase I – Ausgangsanalyse und Projektrahmen 122
6.3.2 Phase II – Konkretisierung der Projektziele 124
6.3.3 Phase III – Grobplanung 129
6.3.4 Phase IV – Feinplanung 132
6.3.5 Phase V – Realisierung 135
6.3.6 Phase VI – Einsetzen 137
6.4 Interpretation und kritische Würdigung 138

7. Zusammenfassung und Ausblick 141

Literaturverzeichnis 147

Abkürzungsverzeichnis 167

Abbildungsverzeichnis 169

Tabellenverzeichnis 171

Anhang 173

1. Einleitung

Das vorliegende Dissertationsvorhaben entstand im Rahmen des öffentlich geförderten Verbundprojekts Montexas4.0 „Exzellente Montage im Kontext der Industrie 4.0 – wirtschaftlich und kompetenzförderlich“, das vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) und dem Europäischen Sozialfonds (ESF) gefördert und vom Projektträger Karlsruhe (PTKA) betreut wurde (FKZ: 02L15A260).

1.1 Relevanz der Thematik

Die Entwicklung und Produktion von materiellen Gütern werden durch eine Reihe von Faktoren determiniert. Diese Faktoren betreffen vor allem die Globalisierung der Absatz- und Beschaffungsmärkte und den Wandel zu einem differenzierten Käufermarkt (Schenk et al., 2014; Schuh & Bender, 2012). Vor diesem Hintergrund sind die Märkte zunehmend gesättigt, was zur Folge hat, dass sich der Trend zu Gütern mit einem hohen Innovations- und Individualisierungsgrad mehr und mehr manifestiert (Lindemann & Baumberger, 2006).

Dahingehend bietet die Entwicklung und Produktion von besonders preiswerten und standardisierten Gütern den Unternehmen nur wenig Wachstumspotenzial in Bezug auf die Absatzmärkte und den Umsatz (Lindemann & Baumberger, 2006). Dies gilt insbesondere vor dem Hintergrund des globalen Wettbewerbs hinsichtlich des Preises und der Qualität von Gütern. Als Folge dieser Entwicklungen stoßen vor allem Unternehmen in Hochlohnländern – Industrienationen wie z. B. Deutschland – an die Grenzen ihrer bisherigen Unternehmensstrategien. Wo früher Produkte oder Technologien im Vordergrund der Entwicklung standen, heißt die heutige Schlüsseldeterminante Kundenorientierung (Große-Heitmeyer & Wiendahl, 2004; Lindemann & Baumberger, 2006). In diesem Zusammenhang wird auch die Erschließung von Nischenmärkten immer häufiger angestrebt, aus denen sich neue Absatzmöglichkeiten ergeben (Große-Heitmeyer & Wiendahl, 2004). Die Konsequenz besteht in einer zunehmenden Produktvielfalt und -komplexität bei gleichzeitig kürzeren Innovations- und Produktlebenszyklen und starken Nachfrageschwankungen (Feldmann et al., 2004b). Für Unternehmen ist somit die Beherrschung der Komplexität von Produkten und Prozessen einerseits und die Realisierung einer kurzen Produktentstehungszeit andererseits zu einem strategischen Erfolgsfaktor geworden (Bauer, 2003; Große-Heitmeyer & Wiendahl, 2004). Vor diesem Hintergrund haben sich Methoden wie das Simultaneous

Engineering, welches die Parallelisierung von Produkt- und Prozessentwicklung beinhaltet, weitestgehend etabliert, um möglichst früh bzw. vor der Konkurrenz am Markt präsent zu sein (Bauer, 2003; Schuh et al., 2008). In Anbetracht der steigenden Anforderungen reicht es jedoch nicht mehr aus, ausschließlich die Produkt- und Prozessentwicklung zu parallelisieren, vielmehr gilt es, gezielte Maßnahmen zum Variantenmanagement zu initiieren. Dieses soll dazu beitragen, die interne Vielfalt zu minimieren und gleichzeitig die vom Markt geforderte externe Vielfalt bereitzustellen (Große-Heitmeyer & Wiendahl, 2004; Thiebes & Plankert, 2014). Hierfür stehen im Verlauf des Entwicklungsprozesses eine Vielzahl von Methoden und Ansätzen zur Verfügung, u. a. DFMA (Design for Manufacture and Assembly), PEflex (flexibles Produktionsstufenkonzept) und MAMOS (Marktorientierte Montagestrukturen) (Feldmann et al., 2004a; Große-Heitmeyer & Wiendahl, 2004; Hesse, 2012).

Trotz dieser Maßnahmen verlagert sich die Variantenvielfalt und damit auch die Komplexität zunehmend in den Bereich der manuellen Montage, da sich die flexiblen Anforderungen fertigungs- bzw. montagetechnisch nur schwer oder nur teilweise automatisieren lassen (Große-Heitmeyer & Wiendahl, 2004; B. Lotter, 2012b). Damit kommt den Beschäftigten in der manuellen Montage, mit ihren besonderen Fähigkeiten zum kreativen und flexiblen Arbeiten, eine tragende Rolle bei der Bewältigung der gegenwärtigen Marktanforderungen zu (Bächler et al., 2015; Große-Heitmeyer & Wiendahl, 2004; Zäh et al., 2007). Insofern werden Wettbewerbsvorteile – Zeit, Kosten und Qualität – zunehmend über die betriebliche Funktion der Montage erzielt, was dazu führt, dass diese Arbeitsplätze unter einem erhöhten Rationalisierungsdruck stehen (Feldmann et al., 2004b; B. Lotter, 2012d). So ist die manuelle Montage immer häufiger von der Verlagerung in Niedriglohnländer bzw. der Auslagerung an externe Anbieter betroffen, wodurch es zum ersatzlosen Wegfall von Arbeitsplätzen und zum Verlust von Know-how kommt (Feldmann et al., 2004b; B. Lotter, 2012d; Sommer, 2008). Oftmals erfolgt diese Entscheidung vorschnell, ohne die eigenen Prozesse hinreichend zu optimieren, und kann diesbezüglich nicht die einzige Lösung zur Bewältigung der globalen Herausforderungen sein (B. Lotter, 2012d). Vielmehr erfordern die aufgezeigten Entwicklungen zunehmend eine ganzheitliche Betrachtung der Arbeitsorganisation in der manuellen Montage. In diesem Zusammenhang sind modulare, anpassungsfähige, innovative und intelligente Lösungen gefragt, um einerseits die Arbeitsplätze am Standort Deutschland zu sichern und andererseits die Produktion flexibel und marktorientiert zu gestalten (Feldmann et al., 2004b; Große-Heitmeyer & Wiendahl, 2004).

1.2 Problemstellung

Die eingangs beschriebene Relevanz der Thematik verdeutlicht, dass Unternehmen durch die Globalisierung und den Wandel zu einem differenzierten Käufermarkt vor vielfältigen Herausforderungen stehen, auf die die manuelle Montage einen großen Einfluss hat. Nicht zuletzt wird dieser Einfluss dadurch bedingt, dass im Rahmen der Produktionsplanung die variantenreichen Fertigungsschritte möglichst spät in der Wertschöpfungskette, d. h. in der manuellen Montage, berücksichtigt werden (B. Lotter, 2012b). Durch die zunehmende Verlagerung der variantenreichen Fertigungsschritte in die Montage werden die Beschäftigten mit unterschiedlichen Vorgaben und Anforderungen konfrontiert. Ferner führt der Wandel zu kundenindividuellen Produkten zu einem Anstieg der funktionalen Komplexität, Miniaturisierung und Qualitätsanforderungen bei gleichzeitig variierenden Losgrößen (Bächler et al., 2015; B. Lotter, 2012b). Infolgedessen werden vermehrt komplexere Produkte mit einem hohen Arbeitsaufkommen und schwankenden Bedarfen manuell montiert (Bächler et al., 2015). So können beispielsweise Montageprozesse an einer Station oder an mehreren Stationen ausgeführt werden, Vor- und Nachläufer können gleich oder unterschiedlich sein oder die Form und Anzahl der zu fügenden Teile können sich unterscheiden. Bedingt durch diese Veränderungen müssen die Beschäftigten in der Montage in kürzester Zeit variierende Vorgaben und Informationen sichten, entsprechende Entscheidungen treffen und umsetzen (Bornewasser et al., 2018; Teubner et al., 2016). Folglich steigt das Risiko, dass die Arbeitssituation für den Beschäftigten unbeherrschbar wird, da von diesem ein ständiges Neu- bzw. Umlernen und Umdenken verlangt wird (Hold & Sihn, 2016). Eine Überforderung und hohe psychische Beanspruchung sind somit keine Seltenheit, wenn repetitive Tätigkeiten gegenüber hochvariablen Tätigkeiten abnehmen (Fürntratt et al., 2016; Hold et al., 2016a; Schmuntzsch et al., 2013). Im Ergebnis steigen damit die Anforderungen an die Beschäftigten in der manuellen Montage, um die geforderten quantitativen und qualitativen Produktionsziele zu erreichen. Demgegenüber steht ein zunehmender Fachkräftemangel in westlichen Industrienationen, der dazu führt, dass immer mehr ungelernte Arbeitskräfte die Montageaufgaben übernehmen (Bächler et al., 2015).

Unternehmen stehen somit vor einer Vielzahl an Herausforderungen, um das Delta zwischen den für eine Arbeitsaufgabe erforderlichen und den zur Verfügung stehenden Qualifikationen des Beschäftigten zu schließen, mit dem Ziel, Montageprozesse effizient und prozesssicher zu gestalten (Hold & Sihn, 2016). Bestehende Unternehmens-

strategien zur Komplexitätsreduktion, wie z. B. DFMA, eignen sich vor diesem Hintergrund nur bedingt, um das aufgezeigte Delta zu schließen. Stattdessen sollten die Strategien darauf ausgerichtet sein, die zunehmende Komplexität durch Reorganisation der Prozesse beherrschbar zu machen (Hinrichsen et al., 2020), denn kleinere Losgrößen und eine höhere Anzahl von Produktvarianten erfordern ein an den Beschäftigten angepasstes Informationsmanagement sowie ein hohes Maß an operativer Flexibilität (Bächler et al., 2015). Für Unternehmen ergibt sich daraus die Notwendigkeit, durch geeignete arbeitsorganisatorische und moderne informationstechnische Mittel einerseits effiziente Montageprozesse mit einer hohen Prozessfähigkeit zu gestalten und andererseits kompetenzfördernde und motivierende Arbeitsbedingungen für die Beschäftigten zu schaffen (Reinhart et al., 2013). Ein wichtiger Ansatz zur Bewältigung dieser Anforderungen ist die Einführung von informatorischen Montageassistenzsystemen (Bornewasser et al., 2018; Fast-Berglund et al., 2013; Hold et al., 2016a). Durch den Einsatz dieser innovativen Systeme kann die Diskrepanz zwischen den für die Ausführung einer Arbeitsaufgabe erforderlichen Qualifikationen und den bestehenden Fähigkeiten des Beschäftigten beseitigt werden (Hold & Sihn, 2016). Dazu werden den Beschäftigten in der manuellen Montage alle erforderlichen Informationen zum richtigen Zeitpunkt und in der richtigen Form bereitgestellt, so dass diese schnell aufgenommen und verarbeitet werden können (Claeys et al., 2015; Hinrichsen et al., 2016b; Hollnagel, 1987).

Trotz der wirtschaftlichen und humanorientierten Potenziale, welche in ersten Erhebungen und Studien bestätigt wurden (s. Abschn. 3.1), und der Verfügbarkeit solcher Systeme am Markt, ist das gegenwärtige Bild in der manuellen Montage zumeist immer noch geprägt von statischen Bildschirmanzeigen und papierbasierten Anleitungen bzw. Informationen (Bannat, 2014). Die Ursache dafür liegt nach Studien von Kasselmann und Willeke (2018) sowie Geissbauer et al. (2014) darin, dass es den Unternehmen an geeigneten Einführungs- bzw. Handlungsstrategien und an Kenntnissen über den wirtschaftlichen Mehrwert von Assistenzsystemen fehlt. Forschungsbedarf sehen Fürntratt et al. (2016) sowie Herder und Aurich (2016) zudem hinsichtlich der Identifikation von Arbeitssystemen, die sich zur Unterstützung des Beschäftigten mittels Assistenzsystemen eignen. Die aufgezeigten Hürden bzw. Herausforderungen werden gegenwärtig nur unzureichend methodisch unterstützt (s. Kap. 3). Insofern muss das Ziel darin bestehen, durch entsprechende Methoden eine breite Nutzung dieser innovativen Systeme zu ermöglichen, um die damit verbundenen wirtschaftlichen und human-

orientierten Potenziale zu erschließen.

1.3 Zielsetzung und Vorgehensweise

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit soll in Bezug auf die skizzierte Problemstellung ein Handlungsleitfaden entwickelt werden, der den bedarfsgerechten und wirtschaftlichen Einsatz von informatorischen Assistenzsystemen in der manuellen Montage ermöglicht. Dazu soll die Bewertung von Einsatzpotenzialen in bestehenden Arbeitssystemen als auch die Auswahl und Konfiguration von informatorischen Assistenzsystemen methodisch unterstützt werden. Zudem soll der Handlungsleitfaden in unterschiedlichen Arbeitsbereichen bzw. Tätigkeitsfeldern der manuellen Montage anwendbar sein sowie eine schnelle und anwenderorientierte Umsetzung ermöglichen. Grundlage für die Entwicklung des Handlungsleitfadens soll die Durchführung einer empirischen Laborstudie hinsichtlich der wirtschaftlichen und humanorientierten Potenziale ausgewählter Systemtypen sowie die Entwicklung einer Methode zur Ermittlung bzw. Prognose der Einsatzpotenziale in bestehenden Arbeitssystemen sein. Aus den gewonnenen Erkenntnissen sollen sodann Kriterien bzw. Empfehlungen für die Auswahl und Konfiguration eines solchen Systems abgeleitet werden. Im Mittelpunkt der Entwicklung stehen somit drei Forschungsfragen:

I. Welche wirtschaftlichen und humanorientierten Potenziale können mit informatorischen Assistenzsystemen erzielt werden?
II. Wie können bestehende Montagesysteme hinsichtlich der Einsatzbedarfe bzw. -potenziale von informatorischen Assistenzsystemen bewertet werden?
III. Wie gestaltet sich die bedarfsgerechte Implementierung von informatorischen Assistenzsystemen in bestehenden Montagesystemen?

Der Handlungsleitfaden soll im Ergebnis die in der Problemstellung identifizierten Forschungslücken bzw. Hemmnisse für die Einführung eines solchen Systems schließen. So lassen sich einerseits die Arbeitsbedingungen für die Beschäftigten in der manuellen Montage durch den zunehmenden Einsatz von informatischen Assistenzsystemen positiv verändern. Andererseits werden Unternehmen in die Lage versetzt, die Produktion flexibler und marktorientierter zu gestalten bei gleichzeitiger Aufrechterhaltung einer effizienten und prozesssicheren Montage.

Das Vorgehen zur Entwicklung des Handlungsleitfadens unter Berücksichtigung der aufgestellten Forschungsfragen setzt zunächst eine Betrachtung der relevanten arbeitswissenschaftlichen Grundlagen voraus. Dabei gilt es, in einem ersten Schritt

verschiedene Begriffe und zu behandelnde Problemfelder zu definieren und voneinander abzugrenzen. Im Fokus stehen diesbezüglich die Themenbereiche industrielle Montage, der Menschen in der manuellen Montage und informatorische Montagesystemgestaltung. Darauf aufbauend ist es in einem zweiten Schritt notwendig, bestehende Forschungsergebnisse bzw. Erkenntnisse im Hinblick auf die festgelegten Forschungsfragen und -ziele darzustellen und in Beziehung zu setzen. Ein besonderes Augenmerk liegt dabei auf der Identifikation von Einflussgrößen für die einzelnen Teilbereiche des Handlungsleitfadens – empirische Laborstudie, Modell zur Prognose der Einsatzpotenziale und Auswahl und Konfiguration eines Assistenzsystems.

In einem dritten Schritt erfolgen die Planung und Durchführung einer Laborstudie zur Ermittlung der wirtschaftlichen und humanorientierten Potenziale ausgewählter informatischer Assistenzsysteme. Die Potenziale werden durch den Vergleich mit einer papierbasierten Montageanleitung als Kontrollmedium ermittelt. Im Mittelpunkt stehen dabei die Stärken und Schwächen der ausgewählten informatorischen Assistenzsysteme gegenüber dem Kontrollmedium, aus denen letztlich Empfehlungen für den Einsatz der Systeme abgeleitet werden sollen.

Der vierte Schritt beinhaltet die Entwicklung einer Methode zur Prognose des Einsatzpotenzials von informatorischen Assistenzsystemen in bestehenden Arbeitssystemen. Basis hierfür bilden Recherchen zu den relevanten Einflussgrößen, welche sodann durch Expertenworkshops und Analysemethoden weiter klassifiziert werden. Ausgehend von diesen Ergebnissen erfolgt die Entwicklung und Ausgestaltung der Methode, welche im Rahmen von abschließenden Anwendungsstudien in einem Unternehmen hinsichtlich der Gütekriterien – Validität, Reliabilität und Objektivität – überprüft wird.

Die Ableitung eines Handlungsleitfadens zur bedarfsgerechten Implementierung eines informatorischen Assistenzsystems erfolgt in einem fünften Schritt anhand der Erkenntnisse aus den Schritten eins bis vier. Um hierbei ein hohes Maß an Praxistauglichkeit zu gewährleisten, werden die Empfehlungen problem- und anwendungsorientiert festgehalten und stützen sich zugleich auf zwei Einführungsprojekte und Expertenworkshops aus dem eingangs erwähnten Forschungsprojekt „Montexas4.0“. Die Expertenworkshops dienen dabei gleichermaßen zur qualitativen Bewertung des Handlungsleitfadens. Abb. 1.1 zeigt die einzelnen Teilschritte der Arbeit im Überblick.

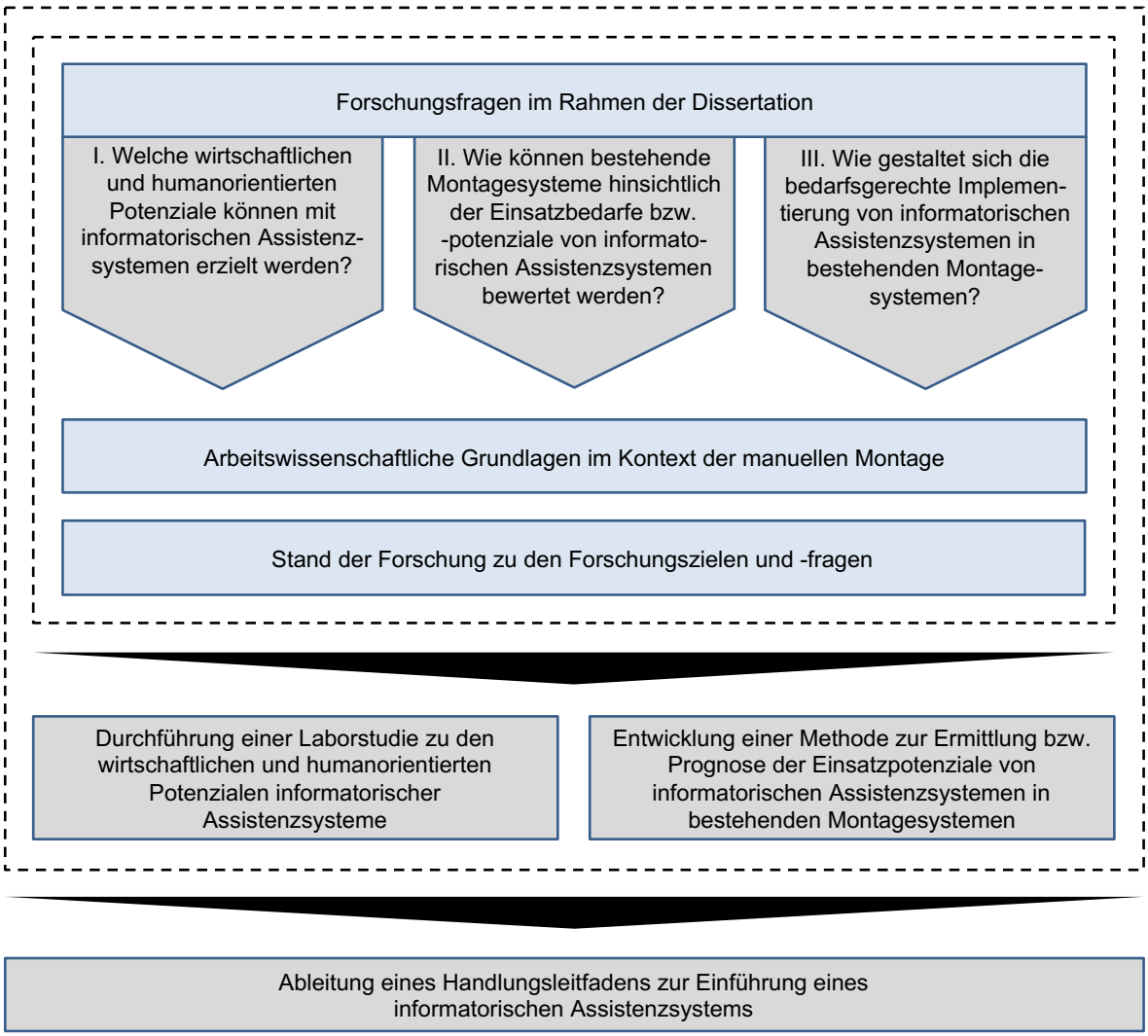


Abb. 1.1 Aufbau der Arbeit im Überblick

2. Grundlagen

Im folgenden Kapitel werden zwecks eines einheitlichen Verständnisses der relevanten Themenkomplexe die arbeitswissenschaftlichen Grundlagen im Kontext des zu entwickelnden Handlungsleitfadens dargestellt. Dazu werden verschiedene Begriffe und Problemfelder definiert und voneinander abgegrenzt.

2.1 Industrielle Montage

2.1.1 Relevanz der industriellen Montage

Die industrielle Montage stellt einen elementaren Teilbereich der industriellen Produktion dar, bei dem in der Regel eine Vielzahl an Einzelteilen zu einem Produkt höherer Komplexität montiert wird (Warnecke et al., 1975). Dieser Prozess macht etwa 15 - 70% der gesamten Fertigungszeit und etwa 40 - 50% der Gesamtkosten eines zu fertigenden Produkts aus (Bullinger & Richter, 1991; B. Lotter, 2012b; Samy & ElMaraghy, 2010). Der Montageprozess kann dabei in hohem Maße standardisiert und/ oder variabel sein, wobei letzteres angesichts des sich immer stärker abzeichnenden Trends zu komplexeren und individualisierten Produkten zunimmt (Feldmann et al., 2004b). Dadurch steigen tendenziell die Anteile an manuellen Montageprozessen und folglich auch die Kosten für die Fertigstellung eines Produktes, da die Personalkosten in der manuellen Montage etwa 30 - 50% der Montagekosten ausmachen (Pierre De et al., 2003). Das bedeutet, dass der effizienten und effektiven Gestaltung des Montageprozesses, neben der vorgelagerten Teilefertigung, eine entscheidende Rolle bei der Realisierung gegenwärtiger Marktanforderungen zukommt. Auch aus volkswirtschaftlicher Sicht ist die industrielle Montage von großer Relevanz, da in Deutschland mehrere zehntausend Arbeitnehmerinnen und Arbeitnehmer in diesem Bereich tätig sind (Brecher & Schapp, 2009; Hinrichsen & Bornewasser, 2020). Zu nennen sind hierbei u. a. die Wirtschaftszweige Automotive, Elektrotechnik und Maschinenbau des Verarbeitenden Gewerbes. Im Jahr 2019 erwirtschaftete dieses in Deutschland einen Umsatz von rund 1,9 Billionen Euro mit rund 47.000 Unternehmen und 6,4 Millionen Beschäftigten (Statistisches Bundesamt, 2019). Die Zahlen verdeutlichen damit eindrucksvoll, dass das Verarbeitende Gewerbe und damit auch die industrielle Montage einen wesentlichen Beitrag zum gesellschaftlichen Wohlstand in Deutschland leisten. Ein zentrales Ziel muss es daher sein, die Wettbewerbsfähigkeit der industriellen Montage am Wirtschaftsstandort Deutschland zu erhalten bzw. zu steigern.

2.1.2 Begriffe und Merkmale der industriellen Montage

Produkte des täglichen Lebens, wie z. B. ein Mobiltelefon oder ein Kraftfahrzeug, haben gemein, dass sie in den meisten Fällen aus einer Vielzahl an Einzelteilen bestehen, die zu einem Endprodukt oder einer Baugruppe höherer Komplexität montiert werden. Dementsprechend wird unter dem Begriff Montage die Gesamtheit aller Vorgänge verstanden, die dazu dienen, geometrisch definierte Körper unterschiedlicher Beschaffenheit und Ursprungs zusammenzufügen (B. Lotter, 2012b; Seliger, 2018; VDI 2860, 1990). Dabei handelt es sich in der Regel um Einzelteile, die in vorgelagerten Fertigungsverfahren unter der Verwendung von Rohstoffen hergestellt werden (DIN 8580, 2020). Dem Montagevorgang geht demzufolge immer die Fertigung von Einzelteilen voraus, welche sodann zu einem lösbaren oder unlösbaren Produkt bzw. Baugruppen montiert werden.

Charakteristisch für diesen Montageablauf sind Fügeverfahren, die unter Anwendung von Handhabungs- und Hilfsvorgängen – Kontrollieren, Justieren und Sonderoperationen – durchgeführt werden. Fügen umfasst nach DIN 8593-0 (2003) „das auf Dauer angelegte verbinden oder sonstige Zusammenbringen von zwei oder mehr Werkstücken geometrisch bestimmter Form oder von ebensolchen Werkstücken mit formlosem Stoff. Dabei wird der Zusammenhalt örtlich geschaffen und im Ganzen vermehrt“. Nach dieser Definition könnte der Eindruck entstehen, dass der Begriff „Fügen“ gleichbedeutend mit „Montieren“ ist, dies trifft jedoch nicht zu. „Montieren wird zwar stets unter Anwendung von Fügeverfahren durchgeführt, es schließt jedoch zusätzlich auch alle Handhabungs- und Hilfsvorgänge einschließlich des Messens und Prüfens mit ein“ (DIN 8593-0, 2003). Unter Handhabung wird nach der VDI 2860 (1990) „das Schaffen, definierte Verändern oder vorübergehende Aufrechterhalten einer vorgegebenen räumlichen Anordnung von geometrisch bestimmten Körpern in einem Bezugskoordinatensystem“ verstanden. Handhaben umfasst in diesem Sinne Tätigkeiten wie die Entnahme von Einzelteilen aus einem Kleinladungsträger oder die Zuführung sowie Sicherung dieser in einer Vorrichtung. Zu den Justiervorgängen gehören jene Aktivitäten, die während oder nach der Montage planmäßig durchgeführt werden, um fertigungstechnisch unvermeidbare Abweichungen auszugleichen mit dem Ziel, ein Produkt mit all seinen geforderten Funktionen und Eigenschaften herzustellen (VDI 2860, 1990). Justiertätigkeiten finden insbesondere während der Montage von Anlagen und Maschinen statt. Der Vorgang des Kontrollierens umfasst nach der VDI 2860 (1990) Mess- und Prüfvorgänge zur Ermittlung qualitativer oder quantitativer Abweichungen

zwischen Ist- und Sollwerten einer Prozessgröße. Vorgänge, die keiner der oben genannten Funktionen zugeordnet werden können, aber darüber hinaus in der betrieblichen Praxis für die Montagearbeiten von Relevanz sind, werden als Sonderoperationen bezeichnet – wie z. B. das Auftragen von Öl oder Fett als Schmiermittel bei der Montage (Seliger, 2018; VDI 2860, 1990).

Die beschriebenen Teilfunktionen lassen sich wiederum in primäre und sekundäre Montagevorgänge unterteilen (Spur & Helwig, 1986). Die Primärmontage umfasst alle Vorgänge des Fügens und trägt somit zur Wertschöpfung bei. Im Unterschied dazu werden Vorgänge, die nicht unmittelbar der Vervollständigung eines Endproduktes oder einer Baugruppe dienen – notwendige nicht-wertschöpfende Vorgänge –, als Sekundärmontage bezeichnet. Zu diesen gehören die beschriebenen Handhabungs- und Hilfsvorgänge, welche bei der Montageplanung auf ein Minimum zu reduzieren sind (B. Lotter, 2012a).

2.1.3 Ablauf- und Montageprinzipien

Das Montieren von Baugruppen bzw. Produkten erfolgt in sogenannten Montagesystemen. In Anlehnung an den Arbeitssystemansatz ist ein Montagesystem ein soziotechnisches System, in dem folglich eine Interaktion zwischen einem sozialen und einem technischen System stattfindet, mit dem Ziel, Produkte zu montieren (Heeg, 1988; Hinrichsen & Bornewasser, 2020; Schlick et al., 2018c). Das Montagesystem erhält dabei Eingaben in Form von Informationen, Energie und Montageobjekten, welche durch das Zusammenwirken von Arbeits- und Betriebsmitteln und Beschäftigten zu Ausgaben transformiert werden (s. Abb. 2.1) (DIN EN ISO 6385, 2016; Hinrichsen & Bornewasser, 2020; Schlick et al., 2018c). Dieser wertschöpfende Transformationsvorgang – Input zu Output – wird als Montageprozess bezeichnet (Willnecker, 2000). Abhängig von der Montageaufgabe und den Rahmenbedingungen (z. B. Losgröße) wird dieser in unterschiedlich viele Prozessabschnitte bzw. Ablaufabschnitte unterteilt (Konold & Reger, 2003; REFA, 1997). Auf diese Weise wird festgelegt, wie die einzelnen Systemelemente Schritt für Schritt zusammenwirken müssen, um das jeweilige Erzeugnis zu montieren. Festgehalten werden diese Ablaufabschnitte in Montageanweisungen – u. a. auch Montageinstruktion, -arbeitsplan und -anleitung genannt –, die dem Beschäftigten zum einen Informationen über das Erzeugnis und zum anderen Anweisungen zur Ausführung des Montageprozesses liefern (Dickmann et al., 2015; Hinrichsen & Bornewasser, 2020). Neben den beschriebenen Systemelementen

wirken weitere Einflussgrößen auf den Montageprozess sowie den Beschäftigten ein. Zu diesen zählen die Arbeitsumgebung bzw. Umwelteinflüsse und die Personalführung (Hinrichsen & Bornewasser, 2020; Schlick et al., 2018c). Abhängig von der Ausgestaltung dieser Einflussgrößen können sie den Montageprozess sowohl positiv beeinflussen, z. B. über eine adäquate Beleuchtung des Montagesystems, als auch negativ, etwa durch einen nicht angemessenen Führungsstil.

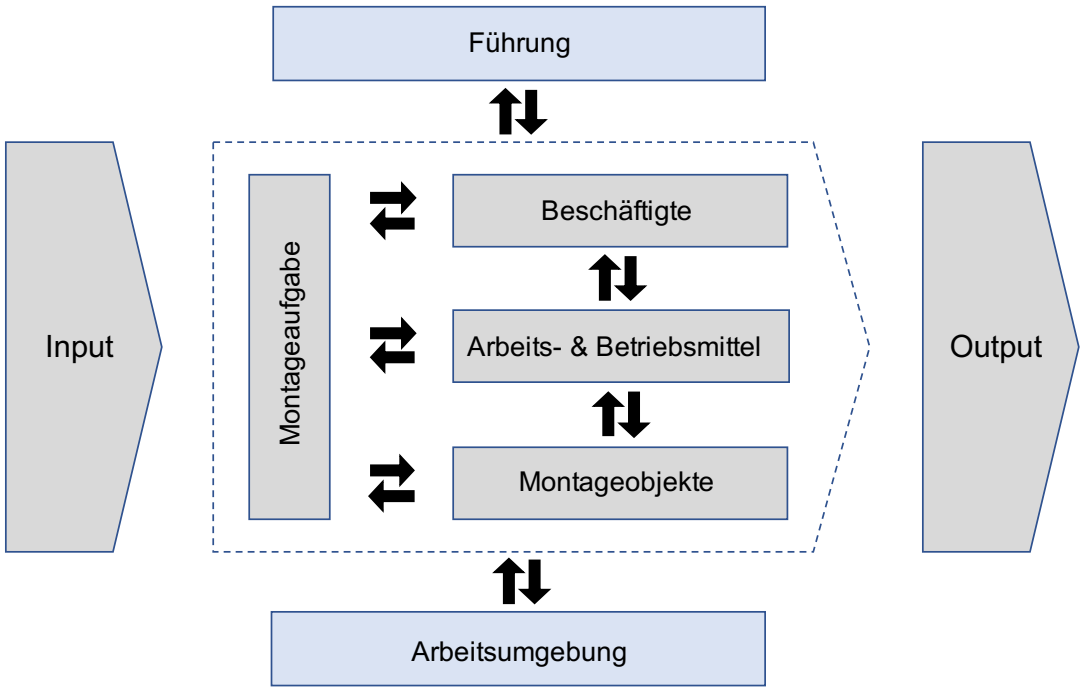


Abb. 2.1: Generisches Modell eines Montagesystems (Hinrichsen & Bornewasser, 2020; Schlick et al., 2018c, modifiziert)

Ein Montagesystem stellt somit ein komplexes Gebilde aus materiellen, dispositiven und operativen Systemelementen dar, welches an die vielfältigen Anforderungen einer Montageaufgabe angepasst werden muss (Spur & Helwig, 1986). Damit geht einher, dass in der Praxis nahezu kein Montagesystem dem anderen gleicht. So unterscheiden sich die Systemelemente ebenso wie die Beziehungen zwischen den Systemelementen von Montagesystem zu Montagesystem. Gleichwohl können Montagesysteme anhand verschiedener Kriterien wie beispielsweise der Leistungswiederholung oder der Arbeitsteilung zwischen Beschäftigten und Betriebsmitteln klassifiziert bzw. typisiert werden.

Mit Blick auf die Leistungswiederholung einer Montageaufgabe lassen sich in einem Montagesystem zwei Typen differenzieren, die Einzelmontage (auch bekannt als Individualmontage) und die Mehrfachmontage (Warnecke, 1993). Während es sich bei der

Einzelmontage um die Montage eines kundenindividuellen Produktes – Losgröße 1 – handelt, wird bei der Mehrfachmontage ein Produkt in großen Stückzahlen montiert. Abhängig von der Produktähnlichkeit sowie der zu montierenden Stückzahl kann die Mehrfachmontage zudem in Serien-, Sorten- und Massenmontage bzw. -fertigung unterteilt werden (Warnecke, 1993). Damit hängt die Auswahl eines Montagetyps – Einzel- oder Mehrfachmontage – entscheidend von der Homogenität bzw. Diversität des Produktes einerseits und von der Auftragsstruktur andererseits ab (Hinrichsen & Bornewasser, 2020). Grundsätzlich besteht dabei die Möglichkeit, den Montageprozess entweder stückweise oder satzweise bzw. verrichtungsweise durchzuführen (B. Lotter, 2012c). Bei der stückweisen Montage erfolgt die Montage an nur einem Montageobjekt, während bei der satzweisen Montage stets an einem Satz von identischen Montageobjekten montiert wird. Weiterhin können Montagesysteme dahingehend unterteilt werden, ob das Montageobjekt ortsfest – stationär gebunden – oder ortsveränderlich ist, z. B. zwischen mehreren Montagesystemen (Seliger, 2018; Spur & Helwig, 1986). Ausgehend von dieser Einteilung werden Montagesysteme in verschiedene Organisationsformen unterteilt (s. Abb. 2.2).

ortsfestes Montageobjekt	stationär am Montageobjekt	Baustellenmontage
	stationär an einem Arbeitsplatz	Einzelplatzmontage
ortsveränderliches Montageobjekt	zeitlich ungebundenes Montageobjekt	Reihenmontage
	kontinuierlich bewegtes Montageobjekt	Fließmontage
	im Takt bewegtes Montageobjekt	Taktmontage

Abb. 2.2: Organisationsformen der Montage (Seliger, 2018, modifiziert)

Hinsichtlich der ortsfesten Montageobjekte können zwei Organisationsformen differenziert werden, die Baustellenmontage und die Einzelplatzmontage (z. B. Warnecke, 1993). Der Unterschied zwischen den beiden Formen besteht darin, dass bei der

Baustellenmontage die Montage am ortsfesten Montageobjekt stattfindet – z. B. an einem Schiff –, während bei der Einzelplatzmontage die Montage an einem Arbeitsplatz erfolgt. Sind die Montageobjekte dagegen ortveränderlich, wird hinsichtlich der zeitlichen Bindung des Objektes zu den einzelnen Stationen unterschieden. Wenn keine zeitliche Bindung besteht, wird der Begriff „Reihenmontage“ verwendet (z. B. Seliger, 2018). Bei zeitlich gebundenen Montageprozessen wird in Abhängigkeit von der zeitlichen Bindung des Fördermittels zwischen der Fließmontage – kontinuierliche Bewegung des Fördermittels – und der Taktmontage – getaktete Bewegung des Fördermittels – klassifiziert (z. B. Seliger, 2018; Spur & Helwig, 1986). Das Fördermittel kann dabei mit und ohne Werkstückträger ausgestattet sein.

Mit der Organisationsform eng verbunden im Sinne der Aufgabenerfüllung ist die Frage nach der Ausführungsform der einzelnen Montageaufgaben. Grundsätzlich kann die Aufgabenerfüllung durch einen Beschäftigten oder durch ein Betriebsmittel erfolgen. Dabei können in Abhängigkeit von der Arbeitsteilung zwischen Beschäftigten und Betriebsmittel folgende Ausführungsformen im Montagesystem unterschieden werden: Manuell, halbautomatisch oder vollautomatisch (Konold & Reger, 2003; B. Lotter, 2012b). Halbautomatische Montagesysteme werden auch als hybride Montagesysteme bezeichnet (E. Lotter, 2012). Ausschlaggebend für die Auswahl einer Ausführungsform sind u. a. die Losgröße, die Variantenvielfalt bzw. Flexibilität und die geplanten Investitionskosten (B. Lotter, 2012b). Ein weiteres Klassifizierungsmerkmal von Montagesystemen ergibt sich aus ihrer räumlichen Anordnung, die auch als Arbeitsplatzanordnung bezeichnet wird. So sind in der betrieblichen Praxis beispielsweise verschiedene Formen von manuellen Montagesystemen vorzufinden: Einzelarbeitsplatz, Karree, Steh-Geh-Linie z. B. in U-Form, Montagelinien und weitere Sonderformen (Konold & Reger, 2003). Analog dazu haben sich auch für hybride und automatische Montagesysteme verschiedene Grundformen in der Praxis etabliert (vgl. Konold & Reger, 2003), die an dieser Stelle nicht weiter betrachtet werden. Die Ausführungsform bzw. Gestaltung von Montagesystemen orientiert sich dabei vor allem an den vorgegebenen Sach- und Effizienzzielen, aber auch an anderen Merkmalen wie der Arbeitsumgebung (Hinrichsen & Bornewasser, 2020). Im Hinblick auf die gegenwärtigen Anforderungen an Montagesysteme – steigende Produktkomplexität, hohe Variantenvielfalt, kleine Losgrößen und kundenindividuelle Produktlösungen – eignen sich insbesondere manuelle Montagesysteme (Herder & Aurich, 2016). Diese zeichnen sich durch eine hohe Flexibilität und geringe Investitionskosten aus, wodurch sie sich besonders für die

Produktion von kleinen Losgrößen eignen (B. Lotter, 2012c). Dem gegenüber stehen jedoch die Nachteile einer vergleichsweisen geringen Produktivität und Prozesssicherheit, welche zukünftig durch den Einsatz innovativer Assistenzsysteme kompensiert werden sollen.

2.1.4 Paradigmenwechsel – Homogenität weicht zunehmender Diversität

Die manuelle Montage stellt einen elementaren Bestandteil der industriellen Produktion dar, um die gegenwärtigen Anforderungen des Marktes zu erfüllen. Diese haben sich durch den Wandel von einem Anbieter- zu einem Käufermarkt grundlegend verändert. Während früher eine überschaubare Produktpalette mittels Massen- und Serienmontage hergestellt wurde, stehen heute zunehmend variantenreichere Produkte im Mittelpunkt der Montagearbeit (Bächler et al., 2015; B. Lotter, 2012b). In der Literatur wird in diesem Kontext oft von der industriellen Individualmontage und von Mixed-Model-Assembly-Lines bzw. -Systems gesprochen, welche die Fertigung von individuellen Produkten unter industriellen Produktionsbedingungen zum Gegenstand haben (z. B. Claeys et al., 2015; Hinrichsen & Bornewasser, 2020; Zhu et al., 2008). Angesichts dieses Paradigmenwechsels, aber auch durch den Einsatz von neuen technologischen Möglichkeiten – digitale Informations- und Kommunikationstechnologien – verändern sich Montagesysteme und die darin zu verrichtenden Tätigkeiten in immer kürzeren Zyklen, um fortlaufend an neue Bedingungen angepasst zu werden (Hinrichsen & Bornewasser, 2020).

Strategisch zielte die Montageplanung und -gestaltung der letzten Jahrzehnte vor allem darauf ab, Montageprozesse arbeitsteilig so zu organisieren, dass möglichst wenige Handlungsalternativen vorliegen, eine hohe Stabilität gewährleistet ist und wenig Abhängigkeiten, z. B. zwischen Montageobjekten, bestehen (Bornewasser, 2020). Für die Beschäftigten in der manuellen Montage bedeutet dies, über einen längeren Zeitraum Arbeitsinhalte mit gleichbleibenden Handlungsmustern zu verrichten. Montageverrichtungen basieren damit überwiegend auf routinierten Handlungen. Das Montageobjekt wird vom Beschäftigten ohne großen kognitiven Aufwand erkannt und zielgerichtet bearbeitet bzw. montiert, um das gewünschte Ergebnis zu erzielen. Mit dem Wandel zu variantenreicheren und komplexeren Produkten, sinkenden Losgrößen und einer hohen Innovationsdynamik steigen die kognitiven Anforderungen an die Beschäftigten deutlich, aufgrund dessen, das gänzlich neue Rahmenbedingungen vorliegen (Hinrichsen & Bornewasser, 2020). Dominierten bislang Einfachheit, Unabhängigkeit,

Stabilität, Kontrolle und Sicherheit in der Montage, so stehen heute Vielfalt, Dynamik, Abhängigkeiten, Flexibilität und Unsicherheiten im Vordergrund (Bornewasser, 2020; Brinzer & Schneider, 2019). Folglich nimmt die Anzahl an einfach strukturierten Montagesystemen tendenziell ab, da aus Produktivitätsgründen die Lösung nicht darin bestehen kann, eine Vielzahl an Montagesystemen mit wenig Handlungsalternativen parallel bereitzustellen (Bornewasser, 2020). Vielmehr müssen Montagesysteme darauf ausgelegt sein, eine Vielzahl an Montageobjekten und Arbeitsmitteln bereitzustellen, um mehrere Varianten eines Produktes bzw. verschiedener Produkte flexibel herzustellen. Bedingt durch diese Zunahme an Komplexität muss der Beschäftigte immer mehr Informationen aufnehmen und verarbeiten, um zwischen den verschiedenen Handlungsalternativen differenzieren zu können (Alkan et al., 2016; Bornewasser, 2020; Schenk et al., 2016). So ist von Variante zu Variante zu entscheiden, welches Montageobjekt und Arbeitsmittel erforderlich ist und an welcher spezifischen Position die Montage zu erfolgen hat. Gleichbleibende Handlungsmuster und damit verbundene Automatismen bzw. Routinen, die bei weniger variantenreichen Produkten im Vordergrund standen, rücken demzufolge immer mehr in den Hintergrund. Weiterhin führt der Wegfall von Routinen zu einem Zustand ständiger Wachsamkeit hinsichtlich der Abfolge von Montageschritten und -handlungen, wodurch ein hohes Maß an Unvorhersehbarkeit und Unsicherheit für den Beschäftigten in der Montage entsteht. Montageverrichtungen bzw. Systeme werden in diesem Sinne zunehmend komplexer (Asadi et al., 2016; Fast-Berglund et al., 2013; Hold et al., 2016a). Demzufolge stellt die Beherrschung von Komplexität ein fundamentales Werkzeug für die Realisierung von Wettbewerbsvorteilen und Optimierungspotenzialen in der Montage dar (Budde, 2016). Gleichwohl stellt sich die Frage, über welche Merkmale ein komplexes System definiert wird, denn obwohl Komplexität im Rahmen des oben erwähnten Paradigmenwechsels ein viel diskutiertes Thema aus Praxis und Wissenschaft ist, fehlt es häufig an einem einheitlichen Verständnis von Komplexität (Schoeneberg, 2014).

Komplexe Systeme zeichnen sich grundlegend durch eine Vielzahl an unterschiedlichen Elementen aus, die in wechselseitiger Beziehung zueinander stehen. Abhängig von deren Konstellation und zeitlichen Stabilität können demzufolge verschiedene Systemzustände evoziert werden. Damit kann Komplexität als eine Art Systemeigenschaft begriffen werden, die durch drei konstituierende Merkmale gekennzeichnet ist (Klabunde, 2003): Varietät, Konnektivität und Dynamik. Unter Varietät wird demnach die Art und Anzahl an Elementen innerhalb eines konkreten Systems verstanden, die

sich wiederum in der Art und Anzahl an Relationen untereinander unterscheiden können (Konnektivität). Weiterhin zeichnen sich komplexe Systeme dadurch aus, dass sich innerhalb kürzester Zeit die Art und Anzahl von Elementen oder Relationen ändern können, wodurch eine geringe Planbarkeit bzw. Bestimmbarkeit induziert wird (Dynamik). Daraus folgt, dass je mehr Varianten, Relationen und Dynamiken ein System aufweist, desto höher ist auch die Art und Anzahl an möglichen Systemzuständen und folglich auch der Grad an Komplexität. Im Umkehrschluss gilt die Komplexität eines Systems als gering, wenn dieses durch Regelmäßigkeit und Gleichförmigkeit gekennzeichnet ist (Bornewasser, 2020). Dabei lässt sich der Komplexitätsgrad eines bestimmten Systems nicht allein durch objektive Daten, wie z. B. die Anzahl an Werkzeugen, Komponenten und Teilschritten, quantifizieren, da dieser auch maßgeblich von den Beschäftigten im System beeinflusst wird. So kann ein und dasselbe System von verschiedenen Beschäftigten als unterschiedlich komplex wahrgenommen werden, denn jedes Individuum zeichnet sich z. B. durch individuelle Erfahrungswerte und Fähigkeiten aus (Alkan, 2019; Dörner, 2011). Dies impliziert zugleich, dass die wahrgenommene Komplexität durch Lern- und Übungsprozesse reduziert werden kann (Bornewasser, 2020). Darauf Bezug nehmend wird zwischen der subjektiven und der objektiven Komplexität differenziert (z. B. Bornewasser, 2020; Bruhn et al., 2009; Sokolowski, 2011). Die objektive Komplexität ist demnach auf bestimmte quantitative Systemeigenschaften beschränkt, während sich die subjektive Komplexität auf den Eindruck dieser Systemeigenschaften bezieht. Für beide Formen haben sich verschiedene Methoden bzw. Instrumente etabliert, die sich in ihrer jeweiligen Zielsetzung – beispielsweise Ermittlung der Produkt- oder Prozesskomplexität – und Durchführung unterscheiden. Damit stellen die Messung und das Management von Komplexität ein fundamentales Werkzeug zur Bewältigung der gegenwärtigen Herausforderungen dar.

Vielen Unternehmen scheitern jedoch an der Beherrschung von Komplexität in ihren Produkten und Prozessen, wodurch es einerseits zu einer verminderten Leistungsfähigkeit – Verfehlung von Produktivitäts- und Qualitätszielen – und andererseits zu einer rückläufigen Wettbewerbsfähigkeit kommen kann (Budde, 2016; Mattsson, 2013b; Schuh, 2005). Die Ursache hierfür liegt häufig in einem unzureichenden Verständnis und Management von Komplexität (Budde, 2016). Es stellt sich also die Frage, wie mit der gegenwärtigen Entwicklung in der Montage und der daraus resultierenden Komplexitätssteigerung umzugehen ist, so dass die Beschäftigten diese unter Berücksichtigung von Produktivitäts-, Quantitäts- und Qualitätszielen bewältigen können

(Hinrichsen & Bornewasser, 2020). Strategisch lassen sich an dieser Stelle zwei Ansätze unterscheiden, wobei der erste das Ziel hat, die Komplexität in einem Montagesystem explizit zu reduzieren und der zweite sie explizit zuzulassen (Hinrichsen & Bornewasser, 2020; Krause & Gebhardt, 2018). Im Detail beinhaltet der erste Ansatz die Strategie, die Komplexität von Montagetätigkeiten durch gezielte Maßnahmen in der Produktentwicklung sowie der Arbeitsteilung bzw. -gestaltung zu reduzieren. Diese Strategie hat vor allem in den letzten Jahrzehnten eine breite Anwendung in der Industrie gefunden. Hierbei steht insbesondere die Vereinfachung komplexer Verrichtungen durch eine verstärkte Arbeitsteilung und Standardisierung im Vordergrund (Hinrichsen & Bornewasser, 2020). Durch die daraus resultierenden repetitiven Abläufe entwickeln die Beschäftigten schneller Automatismen und Routinen, so dass die Produktivitäts- und Qualitätsziele – trotz der eigentlich komplexeren Produkte – erreicht werden können. Mit der Zunahme an Teilen und Varianten, sowie der Abnahme an Losgrößen, gewann auch die Strategie der Komplexitätsreduktion in den frühen Phasen der Produktentwicklung an Bedeutung (Hinrichsen & Bornewasser, 2020). Gängige Methoden in diesem Kontext sind beispielsweise die Plattform- oder Modulbaukastenstrategien sowie die montagegerechte Produktgestaltung (DFMA) (Hesse, 2012; Krause et al., 2018). So sind in der Automobilindustrie beispielsweise viele Verbrennungsmotoren modular aufgebaut, um die Teile- und Baugruppenvielfalt bereits in der Entwicklung zu reduzieren.

In Anbetracht des sich immer deutlicher abzeichnenden Paradigmenwechsels hin zu einer industriellen Individualmontage stößt der Ansatz der Komplexitätsreduktion zunehmend an seine Grenzen. Ansätze wie eine Steigerung der Arbeitsteilung lassen es nicht zu, flexibel auf die sich immer schneller ändernden Marktanforderungen reagieren zu können. Entsprechend zielt der zweite Ansatz darauf ab, Komplexität explizit für den Beschäftigten zuzulassen und beherrschbar zu machen (Hinrichsen & Bornewasser, 2020). Die daraus resultierende Komplexität in Montagesystemen erfordert in der Regel eine benutzerzentrierte Bereitstellung von Informationen, um möglichst schnell zwischen den verschiedenen Handlungs- bzw. Bearbeitungsalternativen differenzieren zu können (Bornewasser et al., 2018). Schließlich basiert jede Handlungsentscheidung und -ausführung seitens des Beschäftigten auf der Verarbeitung von Informationen (s. Abschn. 2.2.2). Vor diesem Hintergrund werden Ursachen für Unsicherheiten und Fehlhandlungen im Montagesystem analysiert und gezielte Maßnahmen abgeleitet. Im Fokus stehen dabei insbesondere informatorische Assistenzsysteme, die den

Beschäftigten helfen, mit der wachsenden Variantenvielfalt und der geforderten Flexibilität sicher umzugehen (s. Abschn. 2.3) (Hinrichsen & Bornewasser, 2020). Dazu werden die richtigen Informationen zur richtigen Zeit und am richtigen Ort mit Hilfe von geeigneten Ausgabemedien bereitgestellt, so dass diese schnell aufgenommen und umgesetzt werden können (Claeys et al., 2015; Hinrichsen et al., 2016b). Damit stellt der zweite Ansatz im Hinblick auf die gegenwärtigen und zukünftigen Anforderungen in der manuellen Montage einen vielversprechenden Lösungsweg dar, die Leistungsfähigkeit und Wettbewerbsfähigkeit von Unternehmen weiter auszubauen bzw. zu erhalten.

2.1.5 Produktivität der Montagearbeit

Montageprozesse zeichnen sich grundsätzlich dadurch aus, dass aus einer begrenzten Anzahl von Produktionsfaktoren (Input), z. B. Personal, Material, ein vorgegebener Output, z. B. ein Endprodukt, erzeugt wird (Dellmann & Pedell, 1994). Der Quotient aus Output und Input wird allgemein als Produktivität bezeichnet und gibt Aufschluss über die Effizienz eines Arbeitssystems. Angesichts des Paradigmenwechsels in der manuellen Montage steigen die Anforderungen an das Produktivitätsmanagement, um dem wachsenden Wettbewerbsdruck einerseits und den daraus induzierten Veränderungen anderseits – zunehmende Komplexität – adäquat zu begegnen.

Abhängig davon, ob sich die Produktivität auf ein Teilsystem oder auf ein gesamtes System bezieht, wird in der Literatur zwischen der Gesamt- und Teilproduktivität differenziert (Smith, 2001). Die beiden Kennzahlen unterscheiden sich dahingehend, dass bei der Gesamtproduktivität alle verwendeten Produktionsfaktoren im Verhältnis zu einem bestimmten Output stehen, wohingegen bei der Teilproduktivität nur ein einziger Faktor, z. B. die Arbeitsleistung, im Nenner berücksichtigt wird (Dellmann & Pedell, 1994; Sumanth, 1997). Je nachdem, welche Einsatzfaktoren betrachtet werden, lässt sich die Teilproduktivität grundlegend in Arbeits-, Betriebsmittel- und Materialproduktivität oder deren Kombination – Mehrfachproduktivität – unterscheiden (Weber, 1983). Die Arbeitsproduktivität ist aus arbeitswissenschaftlicher und betriebswirtschaftlicher Sicht von besonderem Interesse, da die Arbeitskosten in der manuellen Montage einen hohen Anteil an den Gesamtkosten ausmachen (Baszenski, 2012; Pierre De et al., 2003). Für ihre Berechnung wird das Verhältnis von Output zu der tatsächlich benötigten Auftragszeit bzw. zu den geleisteten Arbeitsstunden (Input) für einen definierten Arbeitsbereich gebildet (Dellmann & Pedell, 1994):

$$Arbeitsproduktivität_{homogen} = \frac{Ist-Ausbringungsmenge}{Ist-Auftragszeit}$$

Nach REFA (z. B. REFA, 1997) setzt sich die Auftragszeit – Nenner – aus der Rüstzeit und der Ausführungszeit zusammen. Als Rüstzeit werden jene Zeitanteile einer Montagetätigkeit bezeichnet, die sich aus einem Auftragswechsel ergeben, z. B. der Wechsel einer Montagevorrichtung für den nächsten Arbeitsauftrag. Ausführungszeiten hingegen beziehen sich auf den eigentlichen Montageprozess und werden in Grund- und Verteilzeiten unterteilt. Die Grundzeit beinhaltet alle planmäßigen Zeitanteile, die zur unmittelbaren Aufgabenerfüllung erforderlich sind, während die Verteilzeit solche Zeitanteile beinhaltet, die nicht unmittelbar zur Aufgabenerfüllung dienen. Die im Zähler der Formel genannte Ausbringungsmenge beinhaltet die Anzahl an fehlerfreien Erzeugnissen.

Die dargestellte Berechnungsvorschrift zur Arbeitsproduktivität bezieht sich jedoch ausschließlich auf homogene Produktionsumfänge, die sich durch eine hohe Stückzahl und geringe Produktänderungen, z. B. Konfiguration, auszeichnen. Handelt es sich hingegen um eine Einzel- oder Serienmontage mit einer großen Variantenvielfalt, so ist die Beschaffenheit des Outputs heterogen, d. h. die geplanten Auftragszeiten sind abhängig vom zu montierenden Produkt bzw. der Produktvariante. In diesem Sinne kann nicht die Menge an montierten Produkten als Variable für den Output verwendet werden, da sich diese in der Regel im Zeitverlauf verändern. Dies bedeutet, dass bei heterogenen Produktionsumfängen die Summe aller Soll-Auftragszeiten für n Aufträge als Output herangezogen und durch die Summe aller Ist-Auftragszeiten für n Aufträge (Input) geteilt wird (Dorner & Stowasser, 2012; Sauter & Killisch-Horn, 2011):

$$Arbeitsproduktivität_{hetrogen} = \frac{\sum_{i=1}^{n}(Soll-Auftragszeit_i)}{\sum_{i=1}^{n}(Ist-Auftragszeit_i)}$$

Die Kennzahl stellt folglich das Verhältnis von Soll-Auftragszeit zu Ist-Auftragszeit dar und entspricht somit dem Zeitgrad nach REFA für einen definierten Bereich oder Zeitabschnitt (REFA, 1997). Das Maximum der Arbeitsproduktivität ist erreicht, wenn mit möglichst wenig Ressourcen das größtmögliche Arbeitsergebnis erzielt wird – ökonomisches Prinzip. Ähnlich vielfältig wie die Montageinhalte und -aufgaben, gestalten sich auch die Einflussgrößen auf die Arbeitsproduktivität. Diese können sich abhängig von der Ausgestaltung positiv wie negativ auf die Arbeitsproduktivität auswirken und sind in der nachstehenden Abb. 2.3 dargestellt.

Abb. 2.3 Auszug über mögliche Einflussgrößen auf die Arbeitsproduktivität in der manuellen Montage (Bendzioch et al., 2020d; Wildemann, 2014, modifiziert)

Die Stellschraube zur Steigerung der Produktivität liegt folglich in der Gestaltung der in Abb. 2.3 genannten Einflussgrößen, mit dem Ziel, die Sach- und Effizienzziele mit möglichst wenig Ressourceneinsatz zu erreichen. Dieses Ziel ist nicht unbedingt mit einer kontinuierlichen Steigerung der Gesamtproduktivität verbunden, vielmehr geht es um die langfristige Steigerung der Arbeitsproduktivität (Dorner, 2014). Es ist daher von entscheidender Bedeutung, die Leistungsbereitschaft, Eigenverantwortung, Kompetenz und Kreativität der Beschäftigten zu sichern und zu fördern (REFA, 2016). Dabei sollten nicht nur klassische Maßnahmen der Arbeitsgestaltung zum Tragen kommen, sondern vor allem innovative Technologien wie z. B. informatorische Assistenzsysteme.

2.2 Der Mensch in der manuellen Montage

2.2.1 Merkmale sensumotorischer Tätigkeiten

Der Mensch als Arbeitskraft in der manuellen Montage zeichnet sich durch seine kognitiven Fähigkeiten, sein komplexes Wahrnehmungsvermögen und seine Greif- und Tastfähigkeiten aus, die es ihm ermöglichen, schnell und flexibel auf wechselnde Anforderungen zu reagieren (Bächler et al., 2015). Mit der Abnahme an repetitiven Tätigkeiten und der Zunahme an differenzierten Montageprozessen gewinnen diese Eigenschaften immer mehr an Bedeutung. Dies begründet sich darin, dass die Automatisierung von komplexen Füge- und Handhabungsprozessen unter der Berücksichtigung einer hohen Dynamik und kleiner Losgrößen sehr aufwendig und dadurch oft unwirtschaftlich ist (Bächler et al., 2015; Stoessel et al., 2008). Tätigkeiten, die bis dato vor allem durch monotone Aufgaben geprägt waren, sind somit für die Beschäftigten in der manuellen Montage abwechslungsreicher und interessanter denn je (Bächler et al., 2015). Gleichzeitig steigen die Anforderungen hinsichtlich der Konzentrations- und Präzisionsleistungen, um die Montageprozesse unter vorgegebenen Qualitäts- und

Produktivitätszielen zu erfüllen (Aehnelt & Bader, 2014). Genau diese Anforderungen stellen jedoch ein nicht zu unterschätzendes Qualitätsrisiko dar, da die Leistung jedes Einzelnen starken Schwankungen unterliegen kann. Die Leistung variiert dabei sowohl zwischen verschiedenen Personen – z. B. durch die gesammelten Erfahrungen im Umgang mit den auszuführenden Tätigkeiten – als auch bei einer einzelnen Person selbst – z. B. durch den Gesundheitszustand (Luczak, 1998b). Die Ausführungsgüte einer Arbeitsaufgabe hängt damit stark von den Leistungsmerkmalen des Beschäftigten in der Montage ab. Zu unterscheiden sind hierbei vier Merkmale (Luczak, 1989): Konstitutions-, Dispositions-, Qualifikations- und Anpassungsmerkmale (s. Abb. 2.4). Einige dieser Merkmale sind unveränderlich, wie z. B. das Geschlecht oder die kulturelle Herkunft, während andere veränderbar sind, wie z. B. die Qualifikation oder die Motivation. In Summe bestimmen alle Merkmale, ob ein Individuum für die Arbeitsaufgabe geeignet ist bzw. wie die Arbeit gestaltet sein muss, damit diese unter definierten Produktionszielen ausgeführt werden kann (Luczak, 1998b).

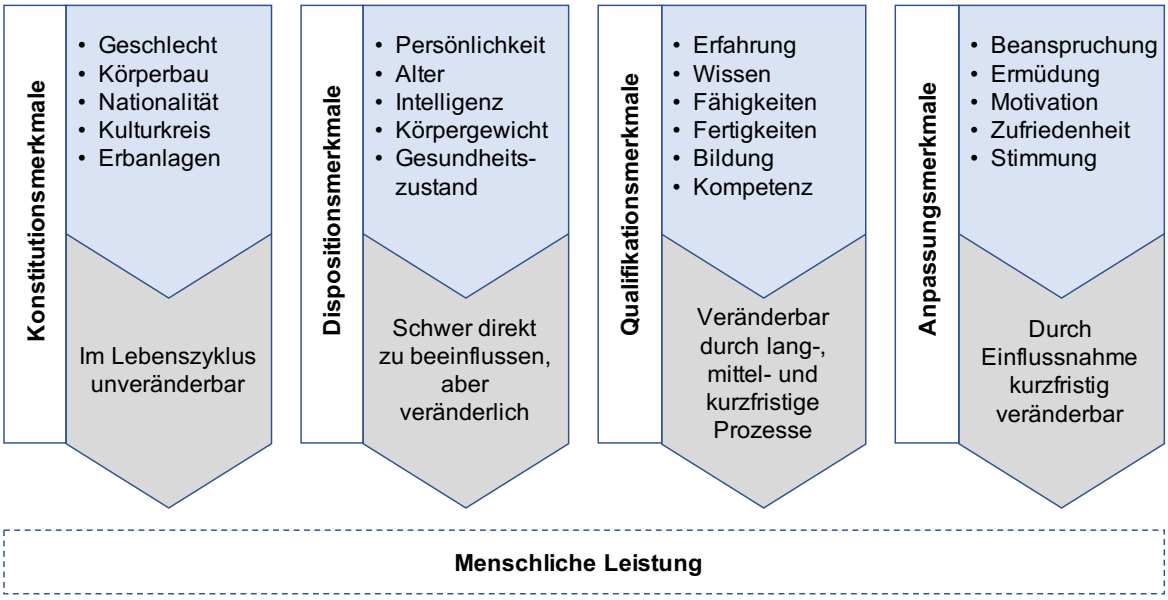


Abb. 2.4: Merkmale menschlicher Leistung (Luczak, 1989, modifiziert)

Im Mittelpunkt der Leistungsanforderungen steht die Ausführung von informatorischen und energetischen Tätigkeiten (Luczak, 1998c). In der Montage dominieren weder die energetischen noch die informatorischen Leistungsanteile, jedoch besteht eine enge Verbindung zwischen ihnen (Luczak, 1998c; Rohmert & Kirchner, 1969). Charakteristisch für diese Verrichtungen ist das Zusammenspiel von Sinnesorganen – informatorische Arbeit – und Muskeln – energetische Arbeit –, die durch einen Reiz bzw. Stimulus ausgelöst werden. In der Literatur wird in diesem Zusammenhang von

sensumotorische Tätigkeiten gesprochen (z. B. Luczak, 1998c). Sensorische Tätigkeiten umfassen demnach die Wahrnehmung und Interpretation von Informationen aus der Umwelt. Dies kann über alle Wahrnehmungskanäle des Menschen erfolgen, z. B. optisch oder akustisch. Die motorischen Leistungsteile bestehen hingegen aus einfachen oder komplexen Bewegungen, die in enger Beziehung zu den aufgenommenen Informationen stehen. Abhängig von ihrer Interpretation unterscheiden sich die Bewegungen in ihrer Art, Geschwindigkeit und Genauigkeit (Ulich, 1967). Daraus folgt, dass der sensorische und der motorische Leistungsanteil regulatorisch eng miteinander verknüpft sind, wobei ihre Gewichtung durchaus variieren kann (Jeske, 2013). So erfordern sensumotorische Tätigkeiten ein hohes Maß an Koordinationsleistung, die sich dadurch auszeichnet, dass Informationen in entsprechende Handlungen umgesetzt und rückgekoppelt werden (Rohmert, 1967). Es ist daher unabdingbar, die Leistungsanforderungen einer Aufgabe zu bestimmen und den Beschäftigten bei der Erreichung und Aufrechterhaltung der Leistung zu unterstützen.

2.2.2 Informationsverarbeitung des Menschen

Jegliche menschliche Aktivität, ob mental oder physisch, beinhaltet die Verarbeitung von Informationen. Diese werden über die Rezeptoren der Sinnesorgane aufgenommen, im Gehirn verarbeitet und in Form von Ausgaben, beispielsweise Montagehandlungen, an den Prozess der Informationsverarbeitung zurückgeführt (s. Abb. 2.5) (Schmauder & Spanner-Ulmer, 2014). Dabei können drei grundlegende Phasen unterschieden werden (Luczak, 1998d): Informationsaufnahme (Perzeption), Informationsverarbeitung (Kognition, Entscheiden) und Informationsabgabe (Aktionsausführung).

Die drei Phasen laufen in der Regel unbewusst und automatisch nach bewährten und verlässlichen Mustern eines jeden Individuums ab (Schoeneberg & Pein, 2014). Zu Beginn werden die Informationen bzw. Reize aus der Umwelt diffus und parallel über mehrere Sinneskanäle aufgenommen, z. B. visuell, auditiv und taktil (Bläsing, 2020; Schmauder & Spanner-Ulmer, 2014). Hierbei werden die aufgenommenen Eindrücke unbewusst mit Hilfe von bereits gesammelten Erfahrungen selektiert. Dieser Vorgang geschieht im sensorischen Gedächtnis, auf das der Mensch keine bewusste kognitive Kontrolle ausüben kann – automatische Reiz-Reaktionsfolge – und wird auch als präattentive Wahrnehmung bezeichnet (Schoeneberg & Pein, 2014). Mit dem Übergang in die zweite Phase werden die bisher unbewussten Wahrnehmungen zu bewussten Wahrnehmungen durch die mentale Verarbeitung der aufgenommenen Informationen

bzw. Reize im Arbeitsgedächtnis. Damit geht eine gezielte Lenkung von Aufmerksamkeit auf die für eine Aufgabe relevanten Merkmale einher. Diese werden mit gespeicherten und bewährten Erfahrungen aus dem Langzeitgedächtnis bewertet bzw. verglichen.

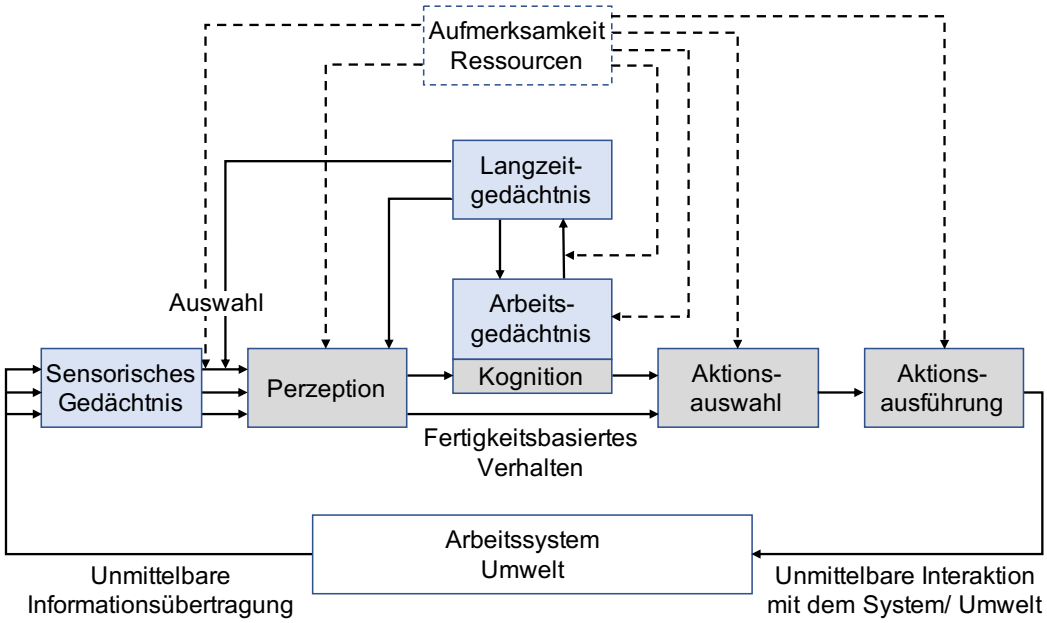


Abb. 2.5: Modell der Informationsverarbeitung (Schlick et al., 2010b; Wickens & Hollands, 2000, modifiziert)

Das Wahrnehmen und Verarbeiten von Informationen ist somit vom Neuheitsgrad einer Aufgabe abhängig. So erfordern vertraute Aufgaben weniger kognitive Ressourcen und Aufmerksamkeit als unbekannte Aufgaben. In diesem Zusammenhang lassen sich zwei Regulationsformen – Dual-Process-Theory – unterscheiden (Evans & Frankish, 2009; Kahneman & Schmidt, 2012). Modus eins reguliert das Verhalten bei wiederkehrenden Aufgaben bzw. Anforderungen auf der Basis von Vorerfahrungen und Heuristiken. Kennzeichnend für diesen Modus ist eine schnelle, unbewusste und intuitive Verarbeitung von Informationen. Modus zwei hingegen arbeitet langsam und rational und verarbeitet bewusst Informationen zur Aufgabenbewältigung. In der Praxis treten innerhalb eines Arbeitsauftrages häufig beide Regelungsformen auf, jedoch überwiegt der zweite Modus immer häufiger, z. B. durch die Zunahme an Varianten und die Abnahme an Losgrößen (Bornewasser, 2020; Hacker, 2021). Die Inanspruchnahme bewusster kognitiver Ressourcen führt allerdings auch zu einem erhöhten Beanspruchungsgrad und einer schnelleren mentalen Belastung des Beschäftigten (Bläsing, 2020). Dies hängt damit zusammen, dass das Arbeitsgedächtnis in seiner Verarbeitungskapazität

begrenzt ist und nur fünf bis neun Chunks – Organisationseinheiten bzw. Verknüpfungen im Gedächtnis, z. B. Wörter oder Symbole, die personenspezifisch sind – simultan verarbeiten kann (Miller, 1956). Damit ist die Aufnahme und Verarbeitung von Informationen begrenzt, d. h. es können mitunter nicht alle erforderlichen Informationen aufgenommen und verarbeitet werden. Daher sollten nach Möglichkeit assoziative Erinnerungsmuster verwendet werden, z. B. bei Visualisierung von Montageanweisungen, so dass der erste Regulationsmodus angesprochen wird, welcher nicht durch Bewusstseinskapazitäten begrenzt ist (Schoeneberg & Pein, 2014).

Der Informationsverarbeitungsprozess schließt mit der Umsetzung von Informationen in Reaktionen bzw. Handlungen mit dem Ziel der Aufgabenerfüllung ab. Ferner werden einige dieser Informationen als Wissen im Langzeitgedächtnis gespeichert (Schmauder & Spanner-Ulmer, 2014). Der Verarbeitungsprozess ist somit ein komplexer, subjektiver, aktiver und selektiver Vorgang, bei dem verschiedene Sinnesorgane und Gedächtnishemisphären eines Menschen angesprochen werden (Schoeneberg & Pein, 2014).

2.2.3 Qualifizierung im Kontext der Montage

Das Montieren von Produkten bzw. Baugruppen erfordert eine entsprechende Qualifikation des Beschäftigten, um die Montageaufgaben unter der Einhaltung vorgegebener Zielgrößen durchführen zu können. Der Begriff „Qualifikation“ umfasst in diesem Sinne alle für die Ausführung der Arbeitsaufgabe erforderlichen Fähigkeiten, Fertigkeiten und Kenntnisse, die im Rahmen einer entsprechenden Qualifizierung zu erlangen, zu erhalten und zu erweitern sind (Schlick et al., 2018b). Qualifizierung umfasst somit die geplante Veränderung von Qualifikationen im Hinblick auf ein bestimmtes Lernziel, z. B. den Aufbau einer Baugruppe, unter der Berücksichtigung der personenbezogenen Leistungsmerkmale (Greif, 2004). Grundsätzlich kann hierbei zwischen langfristigen und kurzfristigen Qualifizierungsmaßnahmen differenziert werden (s. Abb. 2.6) (Schelten, 2005).

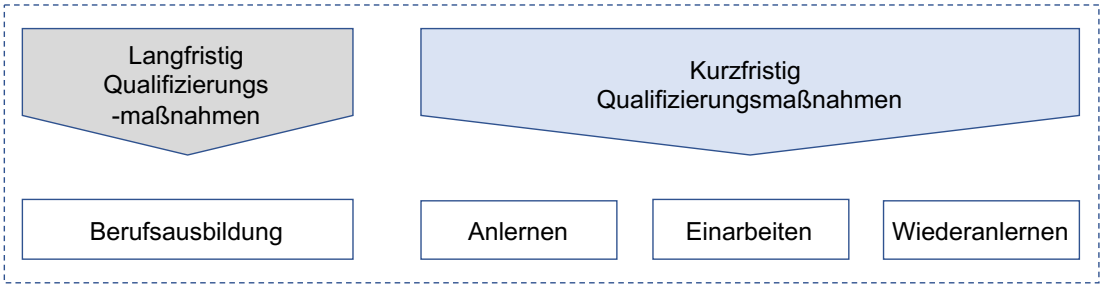


Abb. 2.6 Arten der Qualifizierung (Elbracht, 2000; Schelten, 2005, modifiziert)

Langfristige Qualifizierungsmaßnahmen sind darauf ausgerichtet, Beschäftigte für einen bestimmten Tätigkeitsbereich zu qualifizieren, beispielsweise durch eine Berufsausbildung. Kurzfristige Maßnahmen beziehen sich hingegen auf eine bestimmte Tätigkeit, die im Kontext der Arbeit erlernt werden soll. Diese lassen sich, abhängig von den jeweiligen Lernzielen, in Anlernen, Einarbeiten und Wiederanlernen unterteilen (s. Abb. 2.6). Während es sich beim Anlernen um eine neue bzw. unbekannte Art von Tätigkeit handelt, beinhaltet das Einarbeiten und Wiederanlernen eine Tätigkeit, die dem Beschäftigten bereits mehr oder weniger bekannt ist (Schelten, 2005). Das Einarbeiten beinhaltet demnach eine bereits bekannte Art von Tätigkeit, die in einem neuen Kontext bzw. einer neuen Umgebung zu erlernen ist (Schelten, 2005). Demgegenüber wird unter Wiederlernen das erneute Anlernen einer bereits bekannten Tätigkeit verstanden, nachdem diese über einen längeren Zeitraum nicht ausgeführt worden ist und somit nur noch unvollständig memoriert werden kann (Elbracht, 2000). Die kurzfristigen Qualifizierungsmaßnahmen haben damit gemein, dass das Anlernen von dezidierten Tätigkeiten im Vordergrund steht. Typischerweise findet diese Art der Qualifizierung bei der Durchführung sensumotorischer Tätigkeiten in der Montage statt, um körperlich geeignete Beschäftigte, unabhängig von ihrer Berufsausbildung, beispielsweise für die Ausführung von differenzierten Aufträgen zu befähigen bzw. anzulernen (Mathieu & Ross, 1955). Hierbei finden alle drei Maßnahmen gleichermaßen Anwendung, da sie sowohl von der Qualifikation des Einzelnen als auch von den Aufträgen abhängen.

Der Prozess des Anlernens beginnt unabhängig von der Ausprägung – Anlernen, Einarbeiten und Wiederanlernen – mit der Bereitstellung der für die Ausführung der Arbeitsaufgabe relevanten Informationen z. B. Auftragsdaten, Stückliste. Abhängig von der Informationsbereitstellung kann die Einführung in die Arbeitsaufgabe, d. h. das Kennenlernen der Arbeitsaufgabe bis zur selbständigen Ausführung, im Umfang, aber auch im Grad der Selbstständigkeit variieren (Jeske, 2013). Mit der ersten bzw. erneuten selbstständigen Ausführung der Arbeitsaufgabe beginnt der Zeitraum des Lernens und Übens (s. Abb. 2.7).

Steht vorerst das Lernen aufgrund der Notwendigkeit, Informationen aufzunehmen und zu verarbeiten, im Vordergrund, so nimmt das Üben aufgrund der Beherrschung von Bewegungen bzw. Abläufen im Laufe des Lernprozesses zu (Bunk, 1991; Marks, 2019). Durch die Tatsache, dass die Beschäftigten in der Regel mit Beginn der Lern- und Übungsphase voll und ganz in die Produktion eingebunden sind (Training on the Job), ist das Anlernen nach der Ganzheitsmethode am weitesten verbreitet (Luczak,

1986). Bei dieser wird stets die gesamte Arbeitsaufgabe durchgeführt, ehe sie wiederholt wird. Maßgeblich ist dabei die schnelle Verwertbarkeit und Anwendbarkeit der erlernten Qualifikationen, so dass sie produktiv in den Arbeitsprozess eingebunden werden können (Luczak, 1998e). Dazu ist es wichtig, dass sich die Qualifikationen nicht auf ein abstraktes und theoretisches Wissen beschränken, sondern auch die Ausführung von Handlungen in konkreten Situationen ermöglicht, mit dem Ziel, assoziative Erinnerungsmuster zu generieren (s. Abschn. 2.2.2) (Schlick et al., 2018b).

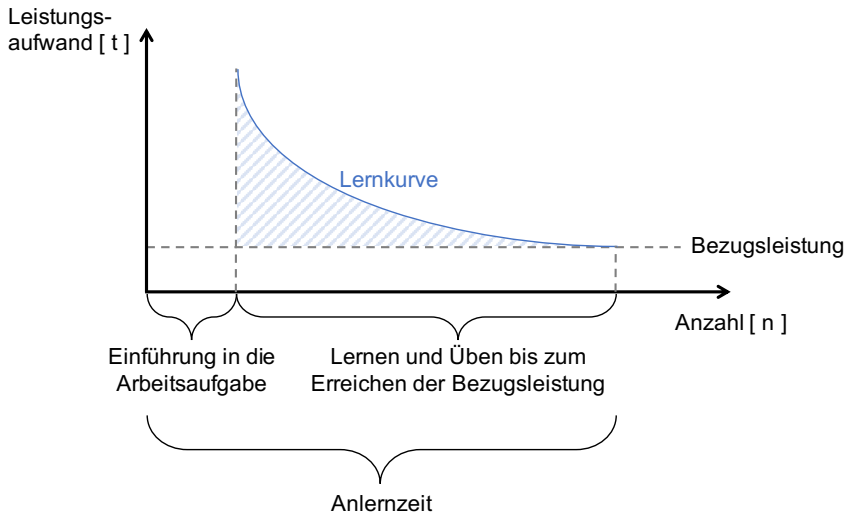


Abb. 2.7 Schematische Darstellung der Anlernzeit (Schlick et al., 2010a, modifiziert)

Die Phase des Lernens und Übens endet mit dem Erreichen einer definierten Bezugsleistung bzw. Vorgabezeit. Diese Bezugsleistung – Soll-Zeit – wird entweder durch Zeitaufnahmen nach REFA oder durch Analysen mit Hilfe von Systemen vorbestimmter Zeiten (SvZ) wie Methods-Time Measurement (MTM) oder Work-Factor (WF) ermittelt. Der zeitliche Aufwand für die „Einführung in die Arbeitsaufgabe“ und für das „Lernen und Üben bis zum Erreichen der Bezugsleistung“ wird als Anlernzeit bezeichnet (s. Abb. 2.7) (Jeske, 2013). Von besonderem Interesse ist vor dem Hintergrund des Paradigmenwechsels in der Montage die Dauer der selbstständigen und zeitlich selbstbestimmten Lern- und Übungsphase, um den Beschäftigten möglichst schnell an neue Gegebenheiten bzw. für die Bearbeitung neuer Aufträge anzulernen. Eine untergeordnete Rolle spielt hingegen die Dauer der „Einführung in die Arbeitsaufgabe“, da diese mehr oder weniger selbstbestimmt erfolgt. Der zeitliche Verlauf der Leistungssteigerung – fokussierter Zeitanteil der Anlernzeit – wird in Form einer Lernkurve wiedergegeben und stellt den Verlauf der Leistung – Ausführungsdauer – über die Zeit – Anzahl

an Wiederholungen – von der erstmaligen Ausführung bis zum Erreichen einer Bezugsleistung dar. In der Regel zeigt diese Kurve eine Abnahme des Zeitbedarfs mit zunehmender Anzahl an Ausführungen (s. Abb. 2.7) (Schlick et al., 2018b).

Die Anlernzeit stellt somit eine Art Gütekriterium für die in der Montage eingesetzten Qualifizierungsmaßnahmen dar und sollte aus wirtschaftlichen und personellen Gesichtspunkten (s. Abschn. 2.2.4) so kurz wie möglich sein (Luczak, 1986). In diesem Sinne stehen Methoden zum Anlernen sensumotorischer Tätigkeiten im Vordergrund, da diese neben der Arbeitsaufgabe und den Leistungsmerkmalen der Arbeitsperson (s. Abschn. 2.1.1) den Verlauf und die Art des Anlernens maßgeblich bestimmen (Greiff, 2001; Jeske, 2013). Nach Schelten (2005) und Jeske (2013) sind dabei drei Methoden von besonderer Relevanz:

- **Anweisung** (REFA-Bundesverband e.V., 1991)**:** Die Anweisung enthält Informationen in schriftlicher Form oder durch einen Experten in mündlicher Form zur Qualifizierung der zu unterweisenden Arbeitsperson. Die schriftliche Form ist hierbei nicht ausschließlich auf Texte beschränkt, vielmehr kann sie auch multimedial gestaltet sein, z. B. mit Hilfe von Bildern oder Animationen. Ferner können sich beide Formen im Detaillierungsgrad bzw. in der Vorgehensweise, z. B. Schritt-für-Schritt oder in Teilschritten, unterscheiden.
- **Vier-Stufen-Methode** (REFA-Bundesverband e.V., 1991)**:** Die Vier-Stufen-Methode stellt eine Erweiterung des „Vorführens“ und „Nachmachens“ dar und gliedert sich in (1) Vorbereitung, (2) Vorführung, (3) Ausführung und (4) Übung. Hierzu vermittelt der Experte zunächst Informationen über die zu erlernende Tätigkeit (1) und demonstriert diese mit Hilfe von Erklärungen (2). Im Anschluss daran übernimmt die zu qualifizierende Arbeitsperson die Tätigkeit und begründet ihr Handeln unter der Aufsicht des Experten (3). Abschließend führt der Beschäftigte mehrere eigenständige Ausführungen der Tätigkeit durch, um das erlernte Wissen zu vertiefen (4).
- **Leittextmethode** (Schlick et al., 2018b): Im Mittelpunkt der Methode stehen Leittexte mit tätigkeitsbezogenen Leitfragen, mit deren Hilfe die zu qualifizierende Arbeitsperson in die Lage versetzt wird, die Arbeitsaufgabe selbstständig zu erarbeiten, zu planen, auszuführen und zu kontrollieren. Dazu gehört auch das selbstständige Erstellen von Arbeitsunterlagen wie z. B. Montageanweisungen oder Kontrollbögen. Lediglich nach der Planung der Tätigkeit sowie nach der Ausführung und Kontrolle dieser, findet eine Abstimmung mit einem

Experten statt.

Die dargelegten Qualifizierungsmethoden beschreiben, wie die zu qualifizierende Arbeitsperson an eine ihr unbekannte Arbeitsaufgabe herangeführt werden kann. Ihre Auswahl erfolgt maßnahmenorientiert, d. h. sie werden in Abhängigkeit von der zu qualifizierenden Person und den Arbeitsaufgaben ausgewählt (Jeske, 2013; Luczak, 1998a). Weiterhin unterscheiden sich die dargelegten Methoden im Aufwand der Vorbereitung und im Grad der Betreuung durch einen Experten. Im Hinblick auf eine möglichst unabhängige und kurzfristige Einarbeitung von Beschäftigten gewinnen in der Montage vor allem solche Methoden an Bedeutung, die selbstbestimmt durchführbar und auch reproduzierbar einsetzbar sind. Hierfür werden in der betrieblichen Praxis am häufigsten schriftliche Montageanweisungen bzw. -instruktionen verwendet (s. Abschn. 2.3.1) (Jeske, 2013).

Nicht zuletzt können Rückmeldungen über den Erfolg der Übung sowie die Einhaltung von Pausen die Wirksamkeit der eingesetzten Qualifizierungsmaßnahmen deutlich erhöhen (Hacker, 2005; Luczak, 1986; Silberer, 1932). So tragen positive Rückmeldungen insbesondere in der Anlernphase zum Aufbau von Erfahrung und Motivation bei (Hacker, 2005; Rutenfranz & Iskander, 1970). Im Gegensatz dazu können Misserfolg und Kritik diese Punkte konterkarieren. Das Einhalten von Pausen wirkt hingegen der perzeptiven, kognitiven und motorischen Ermüdung entgegen, so dass vergleichbare Anlernerfolge deutlich schneller erzielt werden können als bei Beschäftigten, die ohne Pausen üben (Jeske, 2013). Diese sollten jedoch nicht länger als 30 Minuten andauern, da sonst ein Leistungsabfall anstatt eine Leistungssteigerung zu befürchten ist (Greiff, 2001; Jeske, 2013).

2.2.4 Belastungs-Beanspruchungs-Konzept

Die Leistungserhaltung und -steigerung eines Beschäftigten sind zentrale Elemente bei der Planung und Gestaltung eines Montagesystems, da im wertschöpfenden Arbeitsprozess nicht nur materielle Ressourcen verbraucht, sondern auch menschliche Ressourcen beansprucht werden (Bläsing, 2020; Kirchner, 1986). Insofern liegt der Fokus der Leistungserhaltung und -steigerung auf die im Arbeitsprozess auftretende Belastung und Beanspruchung. Unter Belastung werden die äußeren Bedingungen und Anforderungen in einem Montagesystem, z. B. Ausführungsbedingungen, Arbeitsmittel und Arbeitsaufgaben, verstanden, während unter Beanspruchung die innere Reaktionen des Beschäftigten auf die Arbeitsbelastung zu verstehen ist (DIN EN ISO 6385,

2016; Luczak, 1998c). Dieses Wirkprinzip fußt auf dem Belastungs-Beanspruchungs-Konzept von Rohmert (1984), welches auf einer Analogie der technischen Mechanik beruht. Das Ausmaß der Beanspruchung hängt dabei maßgeblich von den individuellen Leistungsmerkmalen – Ressourcen – sowie den eingesetzten Lösungs- bzw. Handlungsstrategien eines Beschäftigten zur Bewältigung einer bestimmten Tätigkeit ab (Luczak, 1998c) (s. Abb. 2.8). So kann ein und dieselbe Belastung bzw. Reizausgangslage im Arbeitsprozess zu unterschiedlichen Beanspruchungs- und Leistungsniveaus bei den Beschäftigten führen.

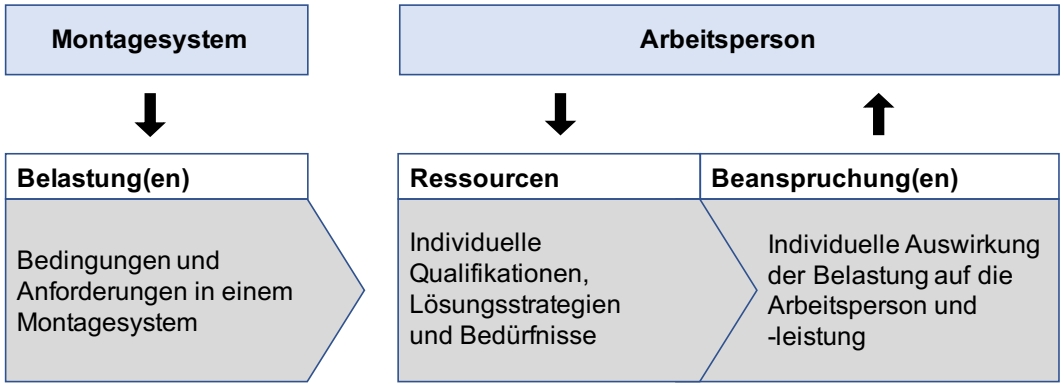


Abb. 2.8 Belastungs-Beanspruchungs-Konzept (Rohmert, 1983, modifiziert)

Die im Arbeitsprozess auftretende Belastung setzt sich in der Regel aus einem Konglomerat verschiedenster Teilbelastungen zusammen, die sich in Höhe, Dauer und Zeitpunkt der Belastung unterscheiden. Nach Luczak (1998c) sind diese Teilbelastungen entweder situations- oder aufgabenbezogen und wirken sich auf ein oder mehrere Organsysteme bzw. organismische Funktionsbereiche aus. Ferner können die Auswirkungen auf eine Arbeitsperson in die Bereiche physiologisch – körperlich-energetisch – und psychologisch – mental-informatorisch – eingeteilt werden (DIN EN ISO 6385, 2016). Bisher lag der Fokus der Belastungs- und Beanspruchungsoptimierung vor allem auf den physiologischen Prozessen, da die Montagearbeit vornehmlich als energetische Arbeit begriffen wurde (Hinrichsen & Bornewasser, 2020). So sind beispielsweise in den letzten Jahrzehnten eine Vielzahl von technischen Hilfsmitteln entwickelt worden, um die Beschäftigten in der Montage körperlich zu entlasten. Optimierung impliziert jedoch grundsätzlich nicht eine Reduktion oder gar eine Vermeidung der Belastung und Beanspruchung im Montageprozess, vielmehr sollte der Beschäftigte durch eine angemessene Belastung weder unter- noch überfordert bzw. beansprucht werden, so dass eine bestmögliche Leistungserbringung unterstützt wird. Der Übergang

zwischen Unter- und Überforderung verläuft in Abhängigkeit von den individuellen Ressourcen und Arbeitsbedingungen innerhalb eines gewissen Variationsbereichs, bevor eine Unter- oder Überforderung eintritt (Hancock & Warm, 1989; Young et al., 2015). Insofern ist durch eine anforderungsgerechte Gestaltung des Montagesystems anzustreben, dass die Beanspruchung des Beschäftigten in einem mittleren Bereich liegt.

Mit dem Wandel zur Individualmontage rücken zunehmend psychologisch bzw. informatorisch-mentale Prozesse in den Fokus der Belastungs- und Beanspruchungsoptimierung. Ursache hierfür ist, dass die Beschäftigten durch die Zunahme an Montageobjekten und Varianten vermehrt Informationen unterschiedlichster Art und Herkunft aufnehmen und bewusst verarbeiten müssen, um ihre Arbeitsaufgaben zu erfüllen (Alkan et al., 2016; Bläsing, 2020; Bornewasser, 2020). In der Praxis zeigt sich dabei häufig das Bild der Informationsüberlastung bzw. -überflutung, bei der die Menge an bereitgestellten Informationen die kognitive Verarbeitungskapazität des Beschäftigten übersteigt (Rau & Hoppe, 2020) (s. Abschn. 2.2.2). Die Menge an bereitgestellten Informationen beutet aber nicht zwangsläufig, dass zu viele Informationen vorhanden sein müssen, viel mehr können auch zu wenige oder nicht eindeutige Informationen zu einer Belastung und Beanspruchung führen. Eine empirische Untersuchung von Hinrichsen und Bendzioch (2018) zeigt in diesem Zusammenhang fünf mögliche Defizitkategorien auf: (1) Benötigte Informationen fehlen, (2) Nicht notwendige Informationen werden übermittelt, (3) Informationen werden zum falschen Zeitpunkt und/ oder in der falschen Menge bereitgestellt, (4) Informationen sind nicht aktuell und/ oder (5) nicht so aufbereitet, dass diese einfach vom Beschäftigten aufgenommen und verarbeitet werden können.

Demzufolge arbeiten die Beschäftigten vermehrt im zweiten Regulationsmodus (Dual-Process-Theory), der dadurch gekennzeichnet ist, dass die Informationsverarbeitung bewusst, langsam und rational erfolgt (s. Abschn. 2.2.2). Das bewusste Verarbeiten größerer Informationsmengen und das Treffen von Handlungsentscheidungen bedeutet eine höhere Beanspruchung des Arbeitsgedächtnisses und führt folglich zu einer steigenden psychischen Beanspruchung (Bläsing, 2020). Die Beanspruchung ergibt sich aber nicht nur aus den aufgenommenen Informationen und deren Bereitstellung, sondern auch aus dem Zusammenspiel der Informationen mit den Leistungsmerkmalen des Einzelnen (Bläsing, 2020). Das heißt, je seltener, neuer und komplexer eine Baugruppe oder ein Produkt für den Beschäftigten ist, desto wichtiger ist es, die für die Arbeitsaufgabe erforderlichen Informationen bedarfsgerecht bereitzustellen.

Unabhängig von dem angestrebten Ziel, z. B. Prävention oder Optimierung, kann es von vielfältigem Nutzen sein, die Beanspruchung im Montagesystem zu erfassen, bevor beispielsweise entsprechende Maßnahmen zur Beanspruchungsoptimierung abgeleitet werden (Bläsing, 2020; Kirchner, 1986). Die Messung der psychischen Beanspruchung ist jedoch nicht ganz trivial, da sie sich aus den situativen Bedingungen und den Möglichkeiten des Beschäftigten zusammensetzt (Bamberg, 2000). Beanspruchung ist somit keine einheitliche oder eindimensionale Größe, wodurch es auch kein einheitliches Verfahren bzw. die eine richtige Art der Erfassung gibt (DIN EN ISO 10075-3, 2004). Gleichwohl haben sich in der Praxis vier übergeordnete Verfahren zur Messung der Beanspruchung etabliert (DIN EN ISO 10075-3, 2004; Luczak, 1998d):

- Aufgaben- und Tätigkeitsanalysen (z. B. Beobachtungsstudien durch Experten),
- Leistungsgrößen (z. B. Qualität der Arbeitsausführung),
- subjektive Skalierung (z. B. Fragebögen) und
- physiologische Messungen (z. B. Eye Tracking, Elektrokardiografie (EKG)).

Die einzelnen Verfahren umfassen verschiedene Methoden, mit denen unterschiedliche Erhebungsziele verfolgt werden. Weiterhin unterscheiden sich die einzelnen Methoden im Grad der Genauigkeit, der Objektivität der erhobenen Daten und dem jeweiligen Aspekt der zu erfassenden Beanspruchung. Eine nähere Übersicht und Hilfestellung zur Auswahl einer geeigneten Messtechnik bietet ferner die DIN EN ISO 10075-3 (2004). Für die vorliegende Arbeit ist vor allem die subjektive Skalierung von Bedeutung. Diese zielt darauf ab, die erlebte Beanspruchung einer Arbeitsperson, d. h. die innere Wahrnehmung einer Tätigkeit zu einem bestimmten Zeitpunkt, wiederzugeben und findet im Rahmen der empirischen Laborstudie (s. Abschn. 4.3.2) Anwendung.

2.3 Informatorische Montagesystemgestaltung

2.3.1 Montageinstruktion – Einordnung und Gestaltungshinweise

Die informatorische Gestaltung ist eine von drei Teilaufgaben der ergonomischen Montagesystemplanung. Zu den weiteren Teilaufgaben gehören die organisatorisch-technische und die biomechanische Systemgestaltung (Hinrichsen, 2020; Luczak, 1986). Die organisatorisch-technische Auslegung umfasst u. a. die Definition des Montageprozesses unter Berücksichtigung der Arbeitsteilung zwischen Mensch und Maschine sowie der Arbeitsorganisation. Bei der biomechanischen Systemgestaltung steht die so genannte anthropometrische Auslegung des Montagesystems im Vordergrund, wie

z. B. die Körperhaltung beim Heben von Lasten. Der Bereich der informatorischen Gestaltung umfasst insbesondere die Erstellung und Bereitstellung von Montageinstruktionen bzw. -anweisungen und nimmt, wie in den vorangegangenen Abschnitten bereits beschrieben (u. a. Abschn. 2.1.4, 2.2.3, 2.2.4), eine Schlüsselrolle im Umgang mit den sich stetig wechselnden Rahmenbedingungen in der manuellen Montage ein.

Unter Informationen sind nach Hacker (1986) interpretierbare Codes, Daten und Signale, wie z. B. Begriffe oder Zahlen, zu verstehen, die der Mensch entschlüsseln bzw. decodieren, interpretieren und verwerten muss. Dementsprechend muss die jeweilige Arbeitsperson in der Lage sein, die bereitgestellten Informationen mit Hilfe des im Gedächtnis hinterlegten Wissens und Erfahrungsschatzes richtig zu entschlüsseln und zu deuten (s. Abschn. 2.2.2) (Hacker, 1986). D. h., je neuer, abstrakter und umfangreicher eine Information ist, desto länger dauert mitunter der Entschlüsselungsprozess und desto größer ist die Gefahr hinsichtlich Fehlinterpretationen und Überbeanspruchungen (Hinrichsen, 2020). Daher ist es wichtig, dass die Informationen bedarfsgerecht – abhängig vom Erfahrungs- und Beanspruchungsniveau – bereitgestellt werden. Diese sollten nach Hollnagel (1987) so aufbereitet sein, dass alle erforderlichen Informationen (was) zum richtigen Zeitpunkt (wann) und in der richtigen Form (wie) für eine sachgerechte Ausführung der Arbeitsaufgabe zur Verfügung stehen (s. a. Claeys et al., 2015; Hinrichsen et al., 2016b).

Zu den erforderlichen Informationen (was) gehören nach Eversheim (2002) detaillierte Angaben über das Produkt, über die zu verwendenden Betriebsmittel, über die Reihenfolge der korrekten Montage und über die dazugehörigen Soll-Zeiten für die Montageausführung. Die Informationsausgabe (wie) erfolgt in der Praxis zumeist durch eine Kombination mehrerer Ausgabeformen, wie z. B. Texte, Bilder, Zeichnungen und Symbole, die papierbasiert oder über digitale Medien bereitgestellt werden (Lang, 2007). Bei der Ausgabe über digitale Medien ist zwischen einer statischen Informationsbereitstellung, z. B. einem festgelegten pdf-Dokument, und einer dynamischen Bereitstellung durch ein Assistenzsystem (s. Abschn. 2.3.2), welches die Informationen bedarfs- und situationsgerecht durch die Interaktion mit den Beschäftigten bereitstellt, zu unterscheiden (Hinrichsen & Bornewasser, 2019). Dabei kann die Informationsversorgung entweder sequentiell – Schritt für Schritt – oder in Teilschritten bzw. über den gesamten Montageprozess erfolgen (wann). Ferner muss bei der Gestaltung von Arbeitsanweisungen entsprechend des Kompatibilitätsprinzips darauf geachtet werden, dass diese weitestgehend dem mentalen Modell des Menschen entsprechen, damit sie leicht

aufgenommen und verarbeitet werden können (Strasser, 1993). Zu diesem Zweck sollten assoziative Erinnerungsmuster verwendet werden, beispielsweise durch die Wahl von einheitlichen Symbolen für bestimmte Tätigkeiten. Außerdem ist darauf zu achten, dass nicht nur das visuelle Wahrnehmungssystem angesprochen wird, da es andernfalls zu Engpässen in der Ressourcenbeanspruchung kommen kann (Schmauder & Spanner-Ulmer, 2014; Wickens, 2008). Daher sollte nach Möglichkeit die Informationsaufnahme unter dem Aspekt der mentalen Beanspruchung vielmehr multimodal erfolgen, z. B. visuell-auditiv.

Wie bereits in Abschn. 2.2.4 dargestellt, beinhaltet die Informationsbereitstellung in der betrieblichen Praxis vielfach Defizite, wodurch einerseits Sach- und Effizienzziele verfehlt und andererseits Beschäftigte durch die resultierenden Arbeitsunterbrechungen, Suchvorgänge und/ oder Rücksprachen mental überbelastet werden können. Ursächlich für diesen Umstand ist die Tatsache, dass gerade im Verarbeitenden Gewerbe viele mittelständische Unternehmen noch immer mit papierbasierten Montageanleitungen arbeiten (Bannat, 2014). Diese haben gegenüber digitalen Anweisungen bzw. Assistenzsystemen den Nachteil, dass sie mitunter veraltet und wenig benutzerzentriert gestaltet sind. So werden nach einer Umfrage von Wiesbeck (2013) dabei vor allem klassische Gestaltungselemente wie Texte, Tabellen oder Zeichnungen eingesetzt. In diesem Zusammenhang zeigt auch eine deutschlandweite Studie von Jeske et al. (2011), dass 70 % der befragten Unternehmen schriftliche Anweisungen, 45 % zeichnungsbasierte Anweisungen und lediglich 13 % computeranimierte Anweisungen verwenden (Mehrfachnennungen waren möglich, n=92).

Für die Gestaltung von Montageinstruktionen liegt keine einheitliche Norm oder Vorschrift vor, so dass diese in der Regel unternehmensspezifischen Vorgaben unterliegen oder sich an anderweitigen Richtlinien – z. B. DIN EN IEC/IEEE 82079-1 (2021) oder VDI 4500-1 (2006) – orientieren (Lang, 2007). Das Informationsmanagement verläuft daher in der Praxis sehr individuell und kann sich ggf. sogar von Abteilung zu Abteilung in einem Unternehmen unterscheiden. Dies begründet sich darin, dass mit der Gestaltung des Informationsmanagements in der betrieblichen Praxis mitunter zahlreiche Herausforderungen verbunden sind. So können beispielsweise Herausforderungen hinsichtlich des flexiblen Personaleinsatzes, der Änderungshäufigkeit von Arbeitsinhalten, der Kostenstruktur und des generellen und zeitlich variablen Informationsbedarfs von Person zu Person bestehen (Hinrichsen, 2020). Vor diesem Hintergrund und den in Abschn. 2.2.4 beschriebenen Defiziten in der Informationsbereitstellung leitet

Hinrichsen (2020) folgende fünf Kriterien bzw. Empfehlungen für eine bedarfsgerechte Gestaltung von Montageinstruktionen ab:

- **Relevanz** – Bereitstellung von ausschließlich relevanten Informationen
- **Aktualität** – Anweisungen müssen stets auf dem aktuellen Revisionsstand sein
- **Kompatibilität** – Orientierung am mentalen Modell des Menschen
- **Standardisierung** – Verwendung einer einheitlichen Struktur und standardisierter Symbole usw.
- **Bedarfsorientiert** – Informationen sollten sich möglichst dynamisch an die Bedürfnisse des Beschäftigten anpassen

2.3.2 Begriffe und Merkmale von Montageassistenzsystemen

In Anbetracht der wesentlichen Veränderungen in der manuellen Montage – u. a. mehr Varianten, kleinere Losgrößen und steigende Produktkomplexität – müssen Unternehmen Mittel und Wege finden, ihre Strukturen und Prozesse an die veränderten Bedingungen anzupassen. Die Schwierigkeit liegt dabei in der Gestaltung von produktiven, humanorientierten und prozesssicheren Montageprozessen, ohne das die Stückkosten signifikant steigen (Kagermann et al., 2013). Im Mittelpunkt dieser Herausforderungen stehen innovative Assistenzsysteme, die den Beschäftigten anwendungsspezifisch bei der Ausführung von Montagetätigkeiten unterstützen (Hold et al., 2016a; Mattsson & Fast-Berglund, 2016). Ähnlich wie ein Navigationssystem leiten bzw. assistieren sie den Beschäftigten durch den Montageprozess, indem das System die richtigen Wege und Mittel zur Ausführung aufzeigt. Auf diese Weise können einerseits Verteil- und Ausführungszeiten durch die Vermeidung von Fehlern und das Aufzeigen der effizientesten Arbeitsweise reduziert und andererseits Überbeanspruchungen physischer und/ oder psychischer Natur vermieden werden (Hinrichsen & Bornewasser, 2020; Reinhart et al., 2013). Die dafür erforderlichen Informationen zur bedarfsgerechten Unterstützung werden aus der Umgebung mittels Sensoren und unterschiedlicher Eingabemodule erfasst (Geiser, 1997). Abhängig von ihrer Unterstützung lassen sich die Systeme nach Reinhart et al. (2013) und Müller et al. (2014) in physische, sensorische und kognitive Assistenzsysteme unterscheiden. Physische Assistenzsysteme sorgen für eine körperliche Entlastung der Beschäftigten, z. B. durch Exoskelette oder den Einsatz eines kollaborativen Roboters, und sind nicht Gegenstand dieser Arbeit. Sensorische Systeme unterstützen die visuelle, auditive und taktile Wahrnehmung des Menschen. Kognitive Assistenzsysteme zielen auf eine wahrnehmungsfördernde Präsentation von

Informationen ab. Hinrichsen et al. (2016a) fassen die Funktionen der kognitiven und sensorischen Assistenzsysteme, aufgrund ihrer direkten Abhängigkeit voneinander, unter dem Begriff „informatorisches Assistenzsystem“ zusammen und grenzen diese Systeme von den energetischen Assistenzsystemen ab. In der wissenschaftlichen Literatur haben sich jedoch auch andere Begrifflichkeiten für solche Systeme etabliert, wie z. B. Werkerinformationssystem, Montageassistenzsystem, interaktives Assistenzsystem und digitales Assistenzsystem, welche als Synonym zu diesem Begriff zu sehen sind (Bannat, 2014; Dombrowski et al., 2010; Hold, 2020; Kasselmann & Willeke, 2018; Lušić et al., 2016; Wiesbeck, 2013).

2.3.3 Wirkprinzip eines informatorischen Assistenzsystems

Informatorische Assistenzsysteme haben das Ziel, dem Beschäftigten alle erforderlichen Informationen zum richtigen Zeitpunkt und in der gewünschten Form situationsgerecht zur Verfügung zu stellen (Claeys et al., 2015; Hinrichsen et al., 2016b). Auf diese Weise kann die Diskrepanz zwischen den zur Ausführung einer Arbeitsaufgabe erforderlichen Qualifikationen und den vorhandenen Fähigkeiten des Beschäftigten beseitigt werden (Hold & Sihn, 2016). Dies führt dazu, dass Unsicherheiten und psychische Beanspruchungen beim Beschäftigten reduziert und vorgegebene Sach- und Effizienzziele erreicht werden können (Bornewasser et al., 2018). Das dabei zugrunde liegende Wirkprinzip lässt sich anhand eines Modells von Bornewasser et al. (2018) veranschaulichen (s. Abb. 2.9).

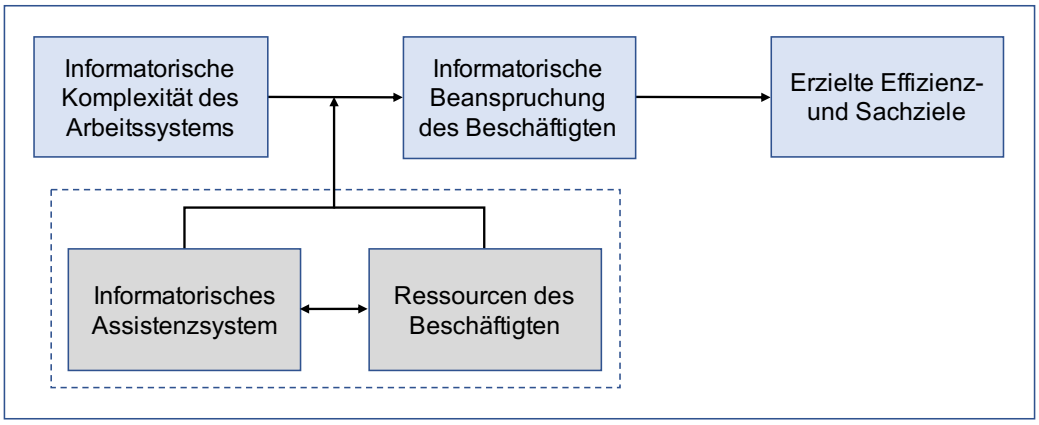


Abb. 2.9 Wirkprinzip des informatorischen Assistenzsystems (Bornewasser et al., 2018, modifiziert)

Ausgangspunkt des Modells bildet die Annahme, dass eine hohe informatorische Komplexität im Arbeitssystem zu einer hohen psychischen Beanspruchung des

Beschäftigten, durch die Zunahme an Informationsverarbeitungsprozessen, führt (s. Abschn. 2.2.2, Modus zwei der Dual-Process-Theory) (Bornewasser et al., 2018). Die aus dem Montageprozess resultierende hohe Komplexität ergibt sich, wie in Abschn. 2.1.4 beschrieben, aus der Zunahme an Varianten, Elementen, Produktwechseln und kleineren Losgrößen im Arbeitssystem. Mit dem Einsatz eines informatorischen Assistenzsystems können die Auswirkungen der Komplexität in Abhängigkeit von den individuellen Ressourcen des Beschäftigten positiv beeinflusst werden, so dass sich Effizienz- und Sachziele erreichen bzw. verbessern lassen. Dabei sorgt das Assistenzsystem durch die Bereitstellung aller notwendigen Informationen zum richtigen Zeitpunkt und in der gewünschten Form für eine schnelle, unbewusste und intuitive Verarbeitung von Informationen und damit für eine optimale Auslastung bzw. Einbindung der menschlichen Ressourcen (Hinrichsen, 2020). Demzufolge ermöglicht der Einsatz eines informatorischen Assistenzsystems, Komplexität für den Beschäftigten explizit zuzulassen und beherrschbar zu machen. Darüber hinaus können mit Hilfe dieser Systeme Informationsverarbeitungsprozesse auch gänzlich vermieden werden, z. B. durch den Wegfall von Suchvorgängen bei der Entnahme von Teilen. Diese Effekte lassen sich jedoch nur dann voll und ganz ausschöpfen, wenn sich das System an die Bedürfnisse des Beschäftigten bzw. durch den Beschäftigten selbst anpassen lässt, um eine Über- oder Unterforderung zu vermeiden, welche mitunter zu Akzeptanzproblemen führen kann (Hinrichsen, 2020).

2.3.4 Klassifizierung und Typen informatorischer Assistenzsysteme

Informatorische Assistenzsysteme können nach unterschiedlichen Kriterien klassifiziert werden. Hinschlicht der Informationsausgabe lassen sich Assistenzsysteme in visuelle (z. B. Licht-/ Laserprojektion, Bildschirm/ Tablet, Signalleuchten), auditive (z. B. Signaltöne, Sprachausgabe) und taktil-kinästhetische (z. B. Vorrichtungen, Feedback durch Vibration am Werkzeug) unterteilen (Müller et al., 2014). An dieser Stelle sei angemerkt, dass der Fokus der vorliegenden Arbeit auf den visuellen Assistenzsystemen liegt, da diese für die industrielle Praxis die höchste Relevanz aufweisen (vgl. Jeske et al., 2014). In Bezug auf die Informationseingabe kann eine Klassifikation in die Bereiche manuell (z. B. Drucktaster), verbal (z. B. Spracheingabe über Mikrofon), gestikulär (z. B. Gestenerkennung via Bildverarbeitungseinheit) und automatisch (z. B. Sensoren am Werkzeug oder Vorrichtung) erfolgen (Hinrichsen et al., 2016b). Die Informationsausgabe und -eingabe kann abhängig von der Mensch-Maschine-Schnittstelle unimodal oder multimodal ausgelegt sein (Hinrichsen et al., 2016b). Während die unimodale

Schnittstelle nur eine Ausgabe- und Eingabemodalität, z. B. Bildschirm und Drucktaster, berücksichtigt, bieten multimodale Schnittstellen verschiedene Ausgabe- und/ oder Eingabemöglichkeiten. Analog zur Definition des Begriffs Montage (s. Abschn. 2.1.2) können informatorische Assistenzsysteme beim Fügen, Handhaben, Prüfen, Justieren sowie bei Sonderoperationen unterstützen.

Das in Abb. 2.10 dargestellte informatorische Assistenzsystem wird beispielsweise für die Montage von Pneumatikbaugruppen eingesetzt und unterstützt alle oben genannten Teilfunktionen des Montierens. Im Speziellen handelt es sich bei dem dargestellten System um ein beamergestütztes Montageassistenzsystem, welches alle arbeitsrelevanten Informationen in das unmittelbare Sichtfeld des Beschäftigten projiziert.

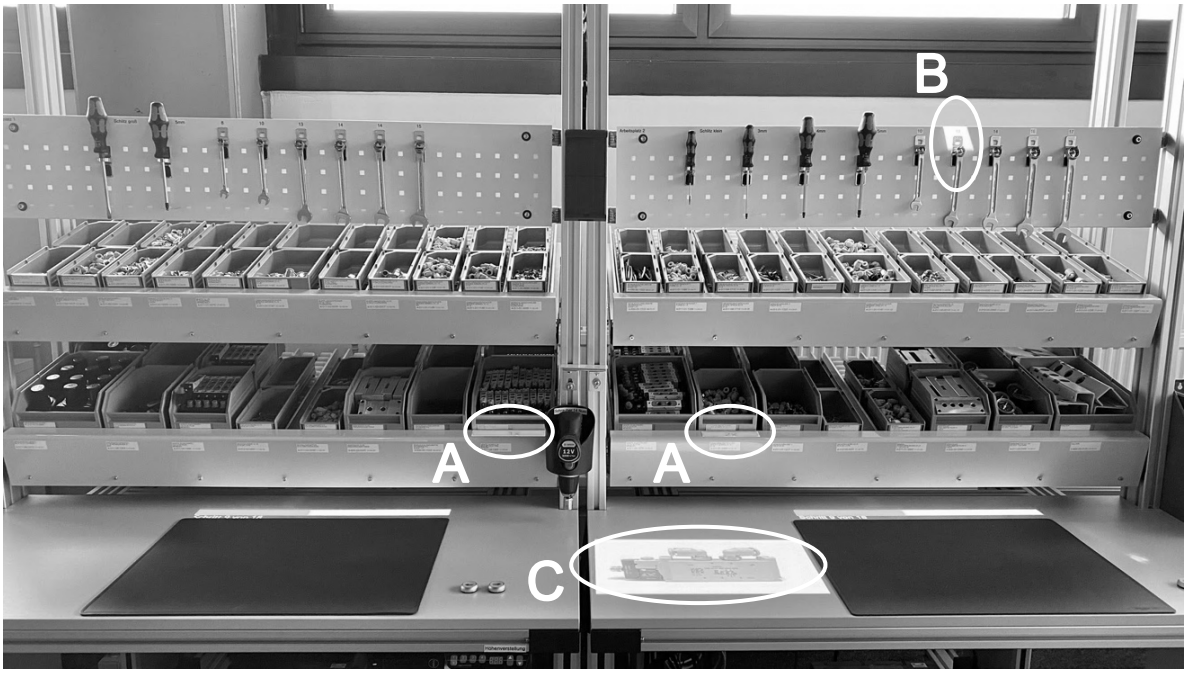


Abb. 2.10 Beamergestütztes Assistenzsystem zur Montage von Pneumatikbaugruppen

So erleichtert das System die Entnahme von Teilen (s. Markierung A) und Werkzeugen (s. Markierung B), in dem diese farblich hervorgehoben werden. Diese Systemeigenschaft wird auch als Pick-by-Light-Funktion bezeichnet. Ergänzend dazu werden direkt neben dem eigentlichen Montagebereich alle notwendigen Informationen für eine sachgerechte Montage angezeigt (s. Markierung C). Hinsichtlich der Mensch-Maschinen-Schnittstelle ist das System unimodal ausgelegt, wobei die Rückmeldung – Informationseingabe – über einen Drucktaster auf der Tischfläche erfolgt. Die zur Unterstützung erforderlichen Informationen werden in einer dafür entwickelten Software verwaltet, so

dass Anpassungen in der Konfiguration, aber auch an Montageaufträgen schnell erfolgen können. Ähnlich wie das in Abb. 2.10 abgebildete Assistenzsystem zur Montage von Pneumatikbaugruppen, haben sich in der Praxis verschiedene Assistenzsystemtypen aufgrund der vielfältigen Anforderungen und technischen Möglichkeiten in der manuellen Montage herausgebildet. Einen Überblick über mögliche Konfigurations- und Gestaltungsmöglichkeiten informatorischer Montageassistenzsysteme bietet Tab. 2.1. Bei dieser ist zu berücksichtigen, dass durch die ständige Weiterentwicklung von Systemen und Technologien auch andere Ausprägungsformen möglich sind, so dass die Tabelle keinen Anspruch auf Vollständigkeit erhebt.

Tab. 2.1 Wesentliche Konfigurations- und Gestaltungsmöglichkeiten informatorischer Montageassistenzsysteme (Hold et al., 2017, modifiziert)

	Informations-ausgabe	Art der Informations-vermittlung	Informations-eingabe	Informations-schnittstelle
Mögliche Ausprägungsformen	Bildschirm	Bilder	Tastatur/ Maus	Werkzeug
	Tablet	Animation/ Video	Touchscreen	Messsystem
	Smartphone	Text	Scanner	Industrieroboter
	Beamer	Gamification	Mikrofon/ Headset	Schutzeinrichtung
	Laser	Augmented Reality (AR)	Fotoelektrischer Sensor (z. B. Lichtschranke)	Qualitätsmanage-mentsystem (QMS)
	Datenbrille	Virtual Reality (VR)	Ultraschall-sensor	Auftrags-dokumentation
	Lautsprecher/ Kopfhörer	Lichtsignal z. B. Pick-by-Light/ Put-to-Light	Mechanischer Sensor (z. B. Taster)	Anlagensteuerung (z. B. SPS)
	Signalleuchte	Signalton/ Sprachausgabe	Vision Sensor (Bildverarbeitungs-system)	Produktions-steuerung (z. B. MES und ERP)
	Smartwatch	Vibration	RFID-Tag	Datenbank

Wie in Tab. 2.1 dargestellt, beschränken sich die wesentlichen Gestaltungsmöglichkeiten eines informatorischen Assistenzsystems auf die Informationsausgabe, die Art der Informationsvermittlung, die Informationseingabe und die Informationsschnittstellen zu anderen Systemen (Hold et al., 2017). Abhängig von dem jeweiligen Anwendungsfall und den Gegebenheiten lassen sich aus den oben genannten Möglichkeiten eine

Vielzahl von Assistenzsystemtypen konfigurieren bzw. realisieren, für welche sich bislang keine einheitlichen Bezeichnungen manifestiert haben. So werden einige Assistenzsystemtypen nach dem Ausgabemedium (Informationsausgabe), z. B. datenbrillengestütztes Assistenzsystem, und wiederum andere Systeme nach der entscheidenden Assistenzform bzw. Funktion, beispielsweise ultraschallbasiertes Assistenzsystem oder Bildverarbeitungssystem, bezeichnet (z. B. Funk et al., 2016; Hinrichsen et al., 2016b; Hold et al., 2016a; Korn et al., 2013). Im weiteren Verlauf dieser Arbeit werden die Assistenzsystemtypen diesbezüglich nach der Informationsausgabe benannt. Ferner werden für eine bessere Unterscheidung der Systeme spezielle Assistenzfunktionen, wie z. B. eine Bildverarbeitungseinheit, mit aufgeführt.

Neben der technischen Ausgestaltung – Informationseingabe, -ausgabe und -schnittstelle – ist die Art der Informationsvermittlung entscheidend für eine erfolgreiche Implementierung, da sie das Bindeglied zwischen Mensch und Assistenzsystem darstellt. Dementsprechend haben sich in den letzten Jahren neben den klassischen Gestaltungselementen wie Bilder und Videos auch innovative Darstellungsformen etabliert. Beispielsweise können AR-Systeme eingesetzt werden, um Informationen in das reale Sichtfeld des Beschäftigten einzublenden. Ein weiterer Ansatz liegt in der Gamifizierung von Montageprozessen – Integration von spielerischen Elementen im Rahmen der Produktion –, um z. B. die Motivation und Konzentration zu steigern. Mit Blick auf die Vielzahl an Konfigurationsmöglichkeiten (s. Tab. 2.1) wird die Auswahl eines bedarfsgerechten Assistenzsystems erheblich erschwert. Es ist daher unerlässlich, zunächst die Anforderungen an ein Assistenzsystem zu bestimmen und auf dieser Basis ein Assistenzsystem zu planen und zu realisieren.

3. Stand der Forschung

Das folgende Kapitel stellt, aufbauend auf den in Kap. 2 dargestellten arbeitswissenschaftlichen Grundlagen, den gegenwärtigen Stand der Forschung im Hinblick auf die Entwicklung des Handlungsleitfadens dar. Im Mittelpunkt des Kapitels stehen diesbezüglich die drei in der Zielsetzung formulierten Forschungsfragen (s. Abschn. 1.3) und die damit verbundenen Themenkomplexe. Diese umfassen die wirtschaftlichen und humanorientierten Potenziale, die Bewertung der Einsatzpotenziale sowie die anforderungsgerechte Implementierung von informatorischen Assistenzsystemen.

3.1 Studien zum Einsatzpotenzial von Montageassistenzsystemen

Informatorische Assistenzsysteme gehören insbesondere für Unternehmen in Hochlohnländern zu den vielversprechendsten Lösungen, um den aktuellen und zukünftigen Marktanforderungen und dem damit verbundenen internationalen Wettbewerbsdruck zu begegnen und standzuhalten. Mit ihrer Hilfe soll die Effizienz und Flexibilität in der manuellen Montage unter der Prämisse einer optimalen Auslastung und Leistungsentfaltung der personellen Ressourcen gesteigert werden. Entsprechend hoch sind die Erwartungen der Unternehmen an die Einführung solcher Systeme (Hold et al., 2017; Keller et al., 2021). Allerdings fehlt es den Unternehmen oft schlichtweg an Erfahrungswerten zum möglichen Nutzen, was zu einer großen Unsicherheit bei der Implementierung führt (Klapper et al., 2019). Diese Unsicherheit wird nicht zuletzt durch die Vielzahl an unterschiedlichen Typen von Assistenzsystemen begünstigt.

Vor diesem Hintergrund wurden in den letzten Jahren verschiedene Vergleichsstudien durchgeführt, um den Einfluss von informatorischen Assistenzsystemen auf die manuelle Montage zu klären bzw. zu untersuchen. Zur Identifikation relevanter Studien im Kontext der Montage wurde das Stichwort „Assistenzsystem/ assistance system“ in Kombination mit dem Begriff „Produktivität/ productivity“ und „Potenzial/ potential“ in verschiedenen Datenbanken – ScienceDirect, ResearchGate, Google Scholar, SpringerLink, Deutsche Nationalbibliothek – eingegeben, mit dem Ergebnis, dass elf Studien identifiziert werden konnten (Anh. A). Selektionskriterium für die Auswahl der Studien war, dass diese sowohl wirtschaftliche als auch humanorientierte Aspekte im Vergleich zu einem Referenzmedium berücksichtigen, da andernfalls keine ganzheitliche Aussage über mögliche Einsatzpotenziale getroffen werden kann. So wurden im Rahmen des Selektionsprozesses insgesamt sechs Studien von der weiteren bzw. näheren

Betrachtung ausgeschlossen: Bläsing und Bornewasser (2021); Blattgerste et al. (2018); Funk (2016, S. 133-138); Funk et al. (2018); Funk et al. (2015b); Korn et al. (2013).

Bezugnehmend auf die fünf verbleibenden Vergleichsstudien (vgl. Tab. 3.1 und Anh. A) können insgesamt 11 informatorische Assistenzsysteme hinsichtlich möglicher Anwendungspotenziale in der manuellen Montage näher untersucht werden. Diese lassen sich wiederum in fünf verschiedene Systemtypen unterscheiden: Beamer-, tablet-, AR-brillen-, datenbrillen- und smartphonegestütztes Assistenzsystem. Als Referenzmedien wurden sowohl papierbasierte, verbale als auch keine digitalen Anweisungen verwendet (letzteres wurde nicht weiter spezifiziert, s. Keller et al. (2021)). Für den Vergleich der Unterstützungsmedien dienten Montageaufgaben, die zu 60 % (drei von fünf) aus Lego-Baugruppen und zu 40 % aus industriellen Baugruppen bestanden. Dabei standen Aspekte wie Ausführungszeit, Fehlerquote und Beanspruchung im Vordergrund, um die wirtschaftlichen und humanorientierten Potenziale aufzuzeigen. Einzig in der Studie von Keller et al. (2021) lag das Augenmerk auf den Variablen Produktivität und Nutzungserlebnis. An den betrachteten Studien nahmen zu 80 % (vier von fünf) Studierende und zu 20 % Personen mit Unterstützungsbedarf teil, wobei die durchschnittliche Stichprobengröße 30,80 Personen (SD = 19,27) betrug.

Tab. 3.1 Identifizierte Studien zu den Einsatzpotenzialen von informatorischen Assistenzsystemen in der manuellen Montage

	Assistenzsystemtyp	Referenz-medium	Montage-aufgabe	Proban-den
Blattgerste et al. (2017)	• AR-Brille • Datenbrille • Smartphone	Papier-anweisung	LEGO®-Duplo	24 [1]
Funk et al. (2015a) Funk (2016, S. 89-101)	• Projektion via Beamer mit Bildverarbeitungseinheit (drei Ausgabevarianten)	Verbale Anweisung	Schraub-zwinge	64 [2]
Funk (2016, S. 173-181) Funk et al. (2016)	• Tablet • Projektion via Beamer mit Bildverarbeitungseinheit • Datenbrille	Papier-anweisung	LEGO®-Duplo	16 [1]
Hou et al. (2013)	• AR-Brille	Papier-anweisung	LEGO®-Modell	20 [1]
Keller et al. (2021)	• Tablet in Verbindung mit Signalleuchten (Pick-by-Light)	Keine digitale Assistenz	Getriebe & Pneumatik-zylinder	30 [1]

[1] – *Studierende* [2] – *Personen mit Unterstützungsbedarfen*

Das weitere Vorgehen zur Auswertung des gegenwärtigen Forschungsstands zu den wirtschaftlichen und humanorientierten Potenzialen informatorischer Assistenzsysteme gliedert sich in drei Teile. In einem ersten Teil wird zur Beurteilung bzw. zur Abschätzung der Einsatzpotenziale die relative Häufigkeit ermittelt, mit der alle in den Studien eingesetzten informatorischen Assistenzsysteme besser oder schlechter sind als die verwendeten Referenzmedien. Dabei wird davon ausgegangen, dass jedes Assistenzsystem für die jeweilige Aufgabenstellung optimal ausgelegt worden ist, so dass die Systeme theoretisch den Referenzmedien überlegen sein sollten. Darauf aufbauend erfolgt in einem zweiten Teil eine nähere Analyse der spezifischen Einsatzpotenziale der einzelnen Assistenzsystemtypen auf Basis der Studienergebnisse. Abschließend werden die Erkenntnisse in einem dritten Teil zusammengefasst und auf die Forschungsfrage der wirtschaftlichen und humanorientierten Potenziale bezogen.

Zur Beurteilung der Einsatzpotenziale wurden im Rahmen des ersten Teils alle in den Studien eingesetzten Assistenzsysteme unabhängig von der Gestaltung, dem Systemtyp, dem Referenzmedium und den Rahmenbedingungen zusammengefasst und den Referenzmedien gegenübergestellt. Hierzu fand für jede Studie ein Vergleich zwischen dem eingesetzten informatorischen Assistenzsystem und dem jeweils verwendeten Referenzmedium hinsichtlich der Variablen Ausführungszeit/ Produktivität, Fehlerquote und Beanspruchung/ Nutzungserlebnis statt. Im Anschluss daran wurde studienübergreifend die relative Häufigkeit ermittelt, mit der die Assistenzsysteme besser oder schlechter waren als die jeweils verwendeten Referenzmedien (s. Tab. 3.2).

Tab. 3.2 Einsatzpotenziale informatorischer Assistenzsysteme gegenüber den eingesetzten Referenzmedien auf Basis der Studienergebnisse

Anzahl Assistenz-systeme	Ausführungszeit/ Produktivität		Fehlerquote [1]		Beanspruchung/ Nutzungserlebnis	
	besser	schlechter	besser	schlechter	besser	schlechter
11	45 %	55 %	70 %	30 %	64 %	36 %

[1] *In Bezug auf die Fehlerquote konnten nur zehn Assistenzsysteme berücksichtigt werden*

Aus den dargelegten Ergebnissen geht hervor, dass die Annahme, dass Assistenzsysteme den Referenzmedien generell überlegen sind, nicht bestätigt wird. Dies spiegelt auch die gegenwärtigen Probleme und Unsicherheiten der Unternehmen im Hinblick auf die Implementierung von informatorischen Assistenzsystemen in der manuellen Montage wider, da nicht grundsätzlich davon ausgegangen werden kann, dass

Assistenzsysteme stets Verbesserungspotenziale aufweisen bzw. mit sich bringen. Weiterhin zeigen die Ergebnisse den unterschiedlichen Einfluss der Assistenzsysteme auf die zu untersuchenden Variablen. Das größte Verbesserungspotenzial liegt demnach in den Bereichen Fehlerquote und Beanspruchung/ Nutzungserlebnis, während der Einfluss auf die Ausführungszeit/ Produktivität über alle Assistenzsysteme hinweg vergleichsweise gering ausfällt.

Ausgehend von dem Ergebnis, dass nicht alle in den Studien betrachteten informatorischen Assistenzsysteme Potenziale im Vergleich zum jeweiligen Referenzmedium aufweisen, werden im zweiten Teil die einzelnen Assistenzsystemtypen näher analysiert und im Hinblick auf ihr Einsatzpotenziale bewertet. Grundlage für die nähere Analyse und Bewertung bilden die für die einzelnen Assistenzsysteme erzielten Mittelwerte in Bezug auf die oben genannten Untersuchungsvariablen – Ausführungszeit/ Produktivität, Fehlerquote und Beanspruchung/ Nutzungserlebnis. Anhand der Mittelwerte wurde sodann für jedes Assistenzsystem die prozentuale Abweichung – besser oder schlechter – vom jeweiligen Referenzmedium ermittelt (s. Tab. 3.3).

Tab. 3.3 Prozentuale Verbesserung bzw. Verschlechterung gegenüber dem jeweiligen Referenzmedium auf Basis der Studienmittelwerte

Assistenzsystemtyp	Ausführungszeit/ Produktivität		Fehlerquote		Beanspruchung/ Nutzungserlebnis	
	besser	schlechter	besser	schlechter	besser	schlechter
AR-Brille [1]	38 % [7]		62 % [7]		28 % [7]	
AR-Brille [2]		29 %	9 %			47 % [7]
Datenbrille [2]		10 %		68 %		22 % [7]
Datenbrille [3,4]		43 %		86 %		21 %
Beamer [4,5]	28 %		63 %		60 %	
Beamer [4,5]	8 %		37 %		33 %	
Beamer [4,5]		4 %	42 %		7 %	
Beamer [3,4]	7 %		72 %		21 %	
Smartphone [2]		50 % [7]		58 %		48 % [7]
Tablet [3,4]		25 %	47 %		1 %	
Tablet [6]	19 % [7, 8]		–	–	26 % [7, 8]	

[1] *Hou et al. (2013)*
[2] *Blattgerste et al. (2017)*
[3] *Funk et al. (2016)*
[4] *Funk (2016)*
[5] *Funk et al. (2015a)*
[6] *Keller et al. (2021)*
[7] *Signifikanter unterschied*
[8] *Berücksichtigt wurden Produktivität und Nutzungserlebnis anstelle von Ausführungszeit und Beanspruchung*

Hinsichtlich der wirtschaftlichen Potenziale zeigt sich, dass das AR-brillen-, beamer- und tabletgestützte Assistenzsystem im Vergleich zum jeweiligen Referenzmedium die größten Potenziale aufweist (s. Tab. 3.3). Vor allem bei der Fehlerquote schneiden die oben genannten Systeme durchgehend besser ab, im Durchschnitt sind es 47 %. Mit Blick auf die Ausführungszeit und Produktivität überzeugt das beamergestützte Assistenzsystem mit einem durchschnittlichen Einsparpotential von 10 % (min. 4 % schlechter und max. 28 % besser) am meisten. Bei dem AR-brillen- und tabletgestützten Assistenzsystem fällt hingegen auf, dass die Ergebnisse stark variieren, so dass keine abschließende Bewertung möglich ist. Das datenbrillen- und smartphonegestützte Assistenzsystem ist dem Referenzmedium hingegen deutlich unterlegen und weist im Rahmen der betrachteten Studien kein wirtschaftliches Potenzial gegenüber den eingesetzten Referenzmedien auf.

Ein ähnliches Bild ergibt sich bei den humanorientierten Einsatzpotenzialen. So sind auch hier die beamer- und tabletgestützten Assistenzsysteme stets besser als das jeweilige Referenzmedium. Konkret bedeutet dies eine durchschnittliche Verbesserung von 30 % bei den beamergestützten Assistenzsystemen und 14 % bei den tabletgestützten Assistenzsystemen. Anders als bei den wirtschaftlich orientierten Potenzialen konnte das AR-brillengestützte Assistenzsystem nur zum Teil überzeugen, da die Ergebnisse bei einer Stichprobe von zwei sowohl positiv als auch negativ ausfallen, so dass keine abschließende Bewertung hinsichtlich der Einsatzpotenziale möglich ist. Schlusslicht bilden auch hier das datenbrillen- und smartphonegestützte Assistenzsystem, welche durchgehend schlechter waren als die Referenzmedien.

Die dargelegten Ergebnisse zeigen, dass das beamergestützte Assistenzsystem sowohl aus wirtschaftlicher als auch aus humanorientierter Sicht das größte Einsatzpotenzial aufweist, gefolgt von dem tabletgestützten Assistenzsystem. Darüber hinaus geht aus den Studien hervor, dass nicht alle informatorischen Assistenzsysteme grundsätzlich Verbesserungspotenziale aufzeigen, da das datenbrillen- und smartphonegestützte Assistenzsystem in den betrachteten Studien dem jeweiligen Referenzmedium deutlich unterlegen war. Bei der inhaltlichen und qualitativen Interpretation der Ergebnisse ist jedoch zu berücksichtigen, dass die in den Studien erzielten Ergebnisse überwiegend nicht signifikant sind, so dass sie lediglich als eine mögliche Tendenz angesehen werden können (s. Tab. 3.3). Aufgrund der geringen Anzahl von Studien, der überwiegenden Verwendung von Lego-Baugruppen, der uneinheitlichen Assistenzsystemkonfigurationen und der unterschiedlichen Rahmenbedingungen ist zudem eine

konkrete Aussage über das tatsächliche Potenzial in der realen manuellen Montage nur schwer möglich. Ferner wurden, wie aus Tab. 3.1 ersichtlich, in den Studien unterschiedliche Referenzmedien verwendet, so dass einzelne Systeme im dargelegten Vergleich ggf. besser oder schlechter abschneiden.

Die aufgeführten Erkenntnisse und Limitationen zeigen, dass die Forschungsfrage zu den wirtschaftlichen und humanorientierten Potenzialen informatorischer Assistenzsysteme zum gegenwärtigen Zeitpunkt nicht hinreichend genau beantwortet ist. Insbesondere wurden entscheidende Faktoren, die für den Paradigmenwechsel in der manuellen Montage charakteristisch sind, nicht bzw. kaum berücksichtigt. Zu diesen gehören die Anlernzeit, Komplexität und Variantenvielfalt (s. Anh. A). Diesbezüglich stellt sich die Frage, inwieweit ein Assistenzsystem die Anlernzeitzeiten reduzieren und die Beschäftigten bei der Bewältigung der immer komplexer werdenden Aufgaben durch die Zunahme an z. B. Teilen und Varianten unterstützen kann, um die Effizienz und Flexibilität in der manuellen Montage zu verbessern. Zu diesem Zweck sollten weitere Studien durchgeführt werden, mit dem Ziel, die Potenziale von informatorischen Assistenzsystemen weiter zu spezifizieren. Auf diese Weise hätten Unternehmen zukünftig die Möglichkeit, gezielte Informationen über die Potenziale einzelner informatorischer Assistenzsysteme zu erhalten und für sich zu nutzen.

3.2 Verfahren zur Einsatzpotenzialbewertung von Montageassistenzsystemen

Die Bewertung der Einsatzpotenziale von informatorischen Assistenzsystemen in bestehenden Montagesystemen, sowohl aus humanorientiert als auch wirtschaftlicher Sicht, stellt neben der Gestaltung und Auslegung einen elementaren Erfolgsfaktor für die Einführung eines solchen Systems dar (Hold et al., 2016b). So kann beispielsweise die Implementierung eines informatorischen Assistenzsystems in einem Montagesystem mit einer geringen Komplexität und erfahrenen Beschäftigten dazu führen, dass die Akzeptanz für ein Assistenzsystem schnell schwindet und letztlich als überflüssig angesehen wird (Bornewasser et al., 2018). Ferner können sich aus der genannten Kombination Probleme wie eine mangelnde Arbeitsmotivation ergeben, so dass sich angestrebte Produktivitätsziele nicht erreichen lassen. Für viele Unternehmen ist jedoch die Abschätzung bzw. Bewertung der Einsatzpotenziale aufgrund der vielfältigen Möglichkeiten und der fehlenden Erfahrungswerte äußerst schwierig (Klapper et al., 2019). Oftmals scheitert es schon an der grundlegenden Fragestellung, in welchen

bestehenden Prozessen Unterstützung erforderlich ist und in welchem nicht. Dies liegt daran, dass nicht pauschal gesagt werden kann, welcher Arbeitsprozess komplex ist und welcher nicht, da die Wahrnehmung zwischen einzelnen Beschäftigten variieren kann. So kann ein und derselbe Prozess von den Beschäftigten unterschiedlich beurteilt und der Unterstützungsbedarf dementsprechend variieren. Es ist daher unerlässlich, bestehende Montagesysteme hinsichtlich der Einsatzpotenziale von informatorischen Assistenzsystemen zu bewerten, um die Potenziale voll und ganz auszuschöpfen. Im Fokus stehen diesbezüglich Arbeitsanalyseverfahren, mit denen sich die genannten Einsatzpotenziale in bestehenden Arbeitssystemen identifizieren lassen. Zur Identifikation relevanter Arbeitsanalyseverfahren im Bereich der manuellen Montage wurden folgende Schlagworte in Kombination mit den Begriffen Assistenzsystem, Komplexität und Unterstützungssystem in verschiedenen Datenbanken – ScienceDirect, ResearchGate, Google Scholar, SpringerLink, Deutsche Nationalbibliothek – recherchiert: Einsatzpotenzial, Bewertungsmodell, Bewertungskonzept und Assistenzbedarf. Analog dazu wurden die genannten Begriffe auch in englischer Sprache berücksichtigt. Selektionskriterium für die Auswahl der Arbeitsanalyseverfahren war, dass diese zum Ziel haben, das Einsatzpotenzial bzw. den Bedarf an kognitiver Unterstützung hinsichtlich des Einsatzes eines Assistenzsystems zu ermitteln. An dieser Stelle sei angemerkt, dass im Rahmen der Literaturrecherche eine Vielzahl an Methoden zur Messung der Komplexität eruiert werden konnten (z. B. Fast-Berglund et al., 2013; Mattsson et al., 2011; Schuh et al., 2015; Zeltzer et al., 2012; Zhu et al., 2008). Diese haben u. a. das Ziel, die Produkt- oder Prozesskomplexität zu ermitteln, jedoch nicht das Einsatzpotenzial von Montageassistenzsystemen zu bewerten, z. B. durch die Ermittlung der tatsächlich wahrgenommen informatorischen Komplexität in einem Montagesystem. Im Ergebnis konnten somit lediglich zwei Verfahren identifiziert werden, die jeweils auf MTM-Studien basieren.

In dem Verfahren von Hold (2020) wird der Bedarf über eine erweiterte MTM-UAS-Studie ermittelt – ergänzt etwa um Informationen zu Werkzeugen, Entnahmeorten, Materialen, Personalkostensätzen – und durch die Berücksichtigung eines umfangreichen Methodeninventars, um u. a. den Grad der Komplexität, den Grad der Flexibilität, den Arbeitsaufwand, die Anlernzeit und die Fehlerwahrscheinlichkeit zu bestimmen. Das dabei eingesetzte Methodeninventar basiert auf bereits bestehenden Berechnungsvorschriften bzw. Methoden. Darüber hinaus werden spezifische Beschreibungsparameter von informatorischen Assistenzsystemen bei der Bewertung der Einsatzpotenziale

berücksichtigt (vgl. Hold, 2020). Im Ergebnis können verschiedene Arbeitssysteme im Hinblick auf die wirtschaftlichen wie auch humanorientierten Einsatzpotenziale von einzelnen informatorischen Assistenzsystemtypen bewertet werden.

In dem zweiten Ansatz von Herder und Aurich (2016) erfolgt die Ermittlung des Unterstützungsbedarfs hingegen auf Basis von MTM-1-Studien. Diese unterscheiden sich von den MTM-UAS-Studien in der Form, dass sie nicht Bewegungsabläufe wie beispielsweise das Platzieren, sondern die dazugehörigen Grundbewegungen Bringen und Fügen berücksichtigen, so dass der Analyseaufwand einer MTM-1-Studie deutlich höher ist (nähere Informationen z. B. Deuse und Busch (2012)). Sind die Grundbewegungsarten der MTM-1-Studie – u. a. Hinlangen, Greifen, Bringen, Fügen und Loslassen – für einem Montagevorgang ermittelt, erfolgt in dem Ansatz von Herder und Aurich (2016) die Bestimmung des Unterstützungsbedarfs anhand des MRT-Modells (Multiple Ressourcentheorie nach Wickens (1992)). Dieses Modell beruht auf dem Grundsatz, dass für die Ausführung einer bestimmten Tätigkeit eine gewisse Menge an kognitiven Ressourcen erforderlich ist, welche jedoch, wie bereits bekannt, begrenzt sind (s. Abschn. 2.2.2). Innerhalb des Modells werden verschiedene Verarbeitungsebenen – Perzeption, Kognition und Reaktion – unterschieden, welche anschließend durch Anforderungsvektoren und einer Konfliktmatrix bewertet werden. Ausgehend von diesen Bewertungen lassen sich Montageprozesse hinsichtlich der kognitiven Belastung beurteilen. Dabei werden Montageschritte oder Baugruppen, die besondere Anforderungen an die Arbeitsperson stellen, als förderungswürdig eingestuft.

Beide Konzepte basieren auf einem objektiven Verfahren, in welchem die Beschäftigten des Arbeitssystems nur wenig bis gar nicht in den Veränderungsprozess einbezogen werden. Gerade in der manuellen Montage spielen diese jedoch eine entscheidende Rolle für den Erfolg oder Misserfolg des späteren Systems und sollten daher von Anfang an in den Prozess mit einbezogen werden. Die vorgestellten Konzepte eignen sich daher insbesondere für die Planung von neuen Arbeitssystemen, bei denen die Beschäftigten nur in begrenztem Umfang einbezogen werden können. Zur Bewertung mehrerer bestehender Arbeitssysteme müssen, wie bereits beschrieben, MTM-Studien erstellt werden, sofern diese nicht bereits vorliegen. Dabei ist jedoch zu beachten, dass vor allem kleine und mittelständische Unternehmen oftmals nicht über Kompetenzen zur MTM-Methodik verfügen bzw. nicht für jedes Produkt und jede Variante eine MTM-Studie vorliegen haben (Landau, 2019). Der Aufwand zur Erstellung dieser Studien kann nach Deuse und Busch (2012) als hoch eingestuft werden. So werden

für die Analyse eines einminütigen Bewegungsablaufes mit MTM-1 200 Minuten und mit MTM-UAS 10 Minuten benötigt (Deuse & Busch, 2012; Hodic, 2005). Das heißt, für mehrere Produkte oder gar mehrere Montagesysteme können durchaus einige Wochen benötigt werden, neben dem qualifizierten Personal, welches für die Erstellung erforderlich ist. Das Abschätzen der Einsatzpotenziale für ein konkretes Arbeitssystem gestaltet sich dahingehend mitunter sehr aufwendig und macht es schwer, mehrere Arbeitssysteme untereinander zu vergleichen und für den Veränderungsprozess auszuwählen. Ferner basiert die Bewertung der Einsatzpotenziale auf idealisierten Zeitwerten. Hierdurch könnten gegebenenfalls Arbeitssysteme priorisiert werden, die sich in der Realität anders verhalten und von den Beschäftigten anders wahrgenommen werden.

Die dargelegten Verfahren zur Bewertung der Einsatzpotenziale von Assistenzsystemen bzw. zur Ermittlung des Assistenzbedarfs bieten eine erste Möglichkeit, eingehende Informationen über bestehende oder in Planung befindliche Montagesysteme zu erhalten. Allerdings sind sie ausgesprochen zeit-, kosten- und personalintensiv in ihrer Anwendung. Darüber hinaus werden die persönlichen Befindlichkeiten und Wahrnehmungen eines jeden einzelnen Beschäftigten im betroffenen Arbeitssystem nicht ausreichend berücksichtigt. Alles in allem zeigt der Stand der Forschung, dass zwar erste geeignete Ansätze vorhanden sind, aber weitere Handlungsbedarfe bestehen. Im Speziellen mangelt es an Verfahren, die den Beschäftigten in den Mittelpunkt des Veränderungsprozesses rücken sowie einfach, schnell und kostengünstig in ihrer Anwendung sind.

3.3 Ansätze zur Implementierung von Montageassistenzsystemen

Die anforderungsgerechte Implementierung von informatorischen Assistenzsystemen gestaltet sich aufgrund der zumeist fehlenden Erfahrungswerte in der industriellen Praxis als schwierig. Dies belegen auch Studien von Kasselmann und Willeke (2018) sowie Geissbauer et al. (2014). Nach diesen Studien fehlt es an geeigneten Einführungs- bzw. Handlungsstrategien zur Auswahl, Konfiguration und Vorgehensweise bei der Implementierung dieser innovativen Systeme. Angesichts der Vielzahl an Konfigurationsmöglichkeiten und Abhängigkeiten in der Ausgestaltung – u. a. in der Arbeitsperson und dem bestehenden Arbeitssystem – ist dies nicht überraschend. Vor diesem Hintergrund wurden in den letzten Jahren diverse Anstrengungen unternommen, um die dargelegten Herausforderungen zu lösen. Zum einen wurden Technologiekompendien

erstellt, welche einen Überblick über bestehende Assistenzsystemtypen und deren Einsatzgebiete geben, zum anderen wurden morphologische Ansätze für die bedarfsgerechte Auswahl und Konfiguration informatorischer Assistenzsysteme entwickelt. Ergänzend dazu wurden einschlägige Leitfäden zur bedarfsgerechten Implementierung dieser Systeme ausgearbeitet. Insgesamt konnten elf Ansätze zur Auswahl, Konfiguration und Implementierung von informatorischen Assistenzsystemen in der manuellen Montage identifiziert werden. Hierzu wurden die folgenden Schlagworte in Kombination mit dem Begriff Assistenzsystem in verschiedenen Datenbanken – ScienceDirect, ResearchGate, Google Scholar, SpringerLink, Deutsche Nationalbibliothek – eingegeben und überprüft: Vorgehensmodell, Leitfaden, Gestaltung, Auswahl, Implementierung, Kompendium und Morphologie. In gleicher Weise wurden die Begriffe auch in englischer Sprache herangezogen.

Einen Überblick über bestehende Assistenzsystemtypen und deren Anwendungsgebiete bieten die Technologiekompendien von Kasselmann und Willeke (2018) und Apt et al. (2018) in Form von Kurzportraits bzw. Steckbriefen. Während Kasselmann und Willeke (2018) den Fokus auf die technischen Details legen, wie z. B. Ein- und Ausgabeeinheiten, Hardware, Nutzen, Preis, Einsatzbereiche und Nutzungseinschränkungen, konzentrieren sich Apt et al. (2018) auf den Entwicklungsstand, die Einsatzbereiche und den Nutzen der Systeme in Bezug auf die Aspekte Mensch, Technik und Organisation. Apt et al. (2018) gehen in ihrer Übersicht zu den Assistenzsystemen sogar noch einen Schritt weiter und unterteilen die Systeme nach dem Grad der Unterstützungsleistung. Eine Einteilung erfolgt dabei in niedrig (einfache Handlungsanweisungen), mittel (regelbasierte Entscheidungen mittlerer Komplexität), hoch (regel- oder expertenbasierte Entscheidungen hoher Komplexität) und variabel (Handlungen und Entscheidungen unterschiedlicher Komplexität). Offen bleibt jedoch, wie die Zuordnung der einzelnen Systemtypen zum Grad der Unterstützungsleistung bzw. zum Anforderungsniveau, z. B. niedrig bei einem beamergestützten Assistenzsystem, erfolgt.

Demgegenüber verfolgen die Autoren Haase et al. (2020a, 2020b), Hinrichsen et al. (2016b), Klapper et al. (2019), Niehaus (2017), Samtleben und Rose (2019) und Teubner et al. (2016) einen anderen Ansatz, indem sie morphologische Kästen zur bedarfsgerechten Auswahl und Konfiguration einsetzen. Dazu werden verschiedene Merkmale informatorischer Assistenzsysteme sowie weitere gestaltungsrelevante Dimensionen, wie z. B. Umgebungseinflüsse mit ihren jeweiligen Merkmalsausprägungen, zusammengefasst (s. Tab. 3.4). Die einzelnen morphologischen Ansätze

unterscheiden sich dabei insbesondere in ihrem Aufbau und Abstraktionsgrad. So unterscheiden Teubner et al. (2016) in ihrer Morphologie zwischen der Ersteller- und der Empfängerseite und orientieren sich dabei an den Modellen von Zachmann (o. J.) und Krcmar (2015) hinsichtlich der sechs Aspekte des Informationsaustausches – Ersteller (wie, was, wem und warum) und Empfänger (wie, was, wo und wann). Haase et al. (2020a, 2020b) unterteilen ihre Morphologie wiederum in die für das Arbeitssystem und die für das Assistenzsystem relevanten Dimensionen hinsichtlich der technischen und didaktischen Ausgestaltung. Zu einer ähnlichen Unterteilung kommen auch die Autoren Samtleben und Rose (2019) – Mensch-Maschine-Schnittstelle und Produktionsumgebung. Klapper et al. (2019) unterteilen ihre Morphologie hingegen nach den für die Assistenzsystemgestaltung relevanten Gestaltungsfeldern – Kontext, Informationsgrad, Informationspräsentation, Technologie und Interaktion. Davon abweichend klassifizieren Hinrichsen et al. (2016b) und Niehaus (2017) ihre Merkmale und Ausprägungen nicht bzw. orientieren sich nicht an einem bestimmten Modell.

Tab. 3.4 Auszug aus einer Morphologie zu Montageassistenzsystemen (Hinrichsen et al., 2016b, modifiziert)

	Merkmalsausprägung					
Ausführung des Assistenzsystems	Stationär	Beweglich	Handgerät	Wearable		
Art der unterstützen Vorgänge	Fügen	Hand-haben	Justieren	Kontrol-lieren	Hilfs-vorgänge	Rüsten
Art der Informations-ausgabe	Visuell (optisch)		Auditiv (akustisch)		Taktilkinästhetisch (haptisch)	
Art der Informations-eingabe	Manuell (Stellteile)	Verbal (Sprach-steuerung)	Gestikulär (Tracking-systeme)	Automatisch (Sensorik)		
Umfang der Benut-zerkonfiguration	Starre Konfiguration der Informationsein-gabe und -ausgabe		Individuelle Konfigu-ration der Informati-onsausgabe		Individuelle Konfigu-ration der Informati-onseingabe und -ausgabe	
Situations-/ Bewe-gungserkennung	Keine	mittels mess-technischer Sensoren	mittels optischer Sensoren	Sonstige		

Angesichts der Vielzahl an unternehmens- und arbeitsplatzspezifischen Gegebenheiten bieten die vorgestellten morphologischen Ansätze jedoch keine konkreten

Gestaltungsempfehlungen, vielmehr sind sie als eine Art Orientierungshilfe zu verstehen, die Gestaltungsmöglichkeiten aufzeigen. Merazzi und Friedel (2017) greifen diese Problematik in ihrer Publikation „Einteilung und Bewertung von Montageassistenzsystemen“ auf und geben auf der Basis von kriteriengestützten Bewertungen einzelner Ein- und Ausgabemodule entsprechende Einsatzempfehlungen. Die Bewertung erfolgt dabei zum einen in Anlehnung an die Grundbewegungen eines Montagevorgangs und zum anderen anhand von jeweils fünf definierten Kriterien (vgl. Merazzi & Friedel, 2017). Bei den vorgenommenen Bewertungen handelt es sich um nutzwertanalytische Einschätzungen der Autoren, die nicht auf experimentellen Untersuchungen beruhen. Im Ergebnis sollen die Bewertungen die Anforderungen und Funktionen einzelner Assistenzsysteme abbilden und so die Auswahl für einen bestimmten Anwendungsfall erleichtern.

Mit Blick auf die bedarfsgerechte Implementierung informatorischer Assistenzsysteme in der betrieblichen Praxis konnten im Rahmen der oben angeführten Recherche drei Ansätze identifiziert werden. Das erste Modell von Klapper et al. (2019) basiert auf dem Build-Measure-Learn-Zyklus aus dem Lean-Startup-Ansatz von Ries (2017) und ist in drei Phasen unterteilt: (1) Potenziale erkennen, (2) Ideenfindung und Entwicklung sowie (3) Bewertung. Dabei erfolgt die Einschätzung von Zielgrößen bzw. Beweggründen für den Einsatz eines solchen Systems anhand einer Checkliste, auf deren Basis verschiedene Assistenzsystemkonzepte mit Hilfe der oben erwähnten Morphologie von Klapper et al. (2019) sowie Use-Case-Beschreibungen iterativ entwickelt und evaluiert werden. Im Mittelpunkt des Modells steht die Konzeptionierung von Lösungsansätzen und deren Bewertung und weniger die organisatorische, personelle und technische Umsetzung. Eine ähnliche inhaltliche Ausrichtung weist auch das Vorgehensmodell von Hold (2020) auf. Dieses beruht auf dem in Abschn. 3.2 vorgestellten Bewertungsansatz zur Abschätzung der Einsatzpotenziale von Assistenzsystemen und gliedert sich in fünf Teilschritte: (1) Bestimmung der Ausgangsgrößen, (2) Quantifizierung der Beschreibungsparameter, (3) Vor-Priorisierung relevanter Komponenten des Assistenzsystems, (4) Wirtschaftlichkeitsbewertung und (5) Identifikation der betriebswirtschaftlich vorteilhaftesten Assistenzsystemkomponenten. Die Auswahl eines Assistenzsystems basiert demnach vor allem auf einer wirtschaftlichen Entscheidungsgrundlage – MTM-Studien und diverse Berechnungsmodelle – und weniger auf den individuellen Bedürfnissen und Anforderungen der Beschäftigten in der Montage. Bei dem dritten Ansatz handelt es sich um das von Kleineberg et al. (2017a, 2017b) entwickelte

Einführungsmodell, welches im Nachgang eines Einführungsprojektes für ein informatorisches Assistenzsystem entstand. Analog zum REFA-Standardprogramm Arbeitssystemgestaltung gliedert sich das entwickelte Modell in sechs Phasen (REFA-Bundesverband e.V., 2014): (1) Analyse und Projektrahmen, (2) Ziele konkretisieren, (3) Grobplanung, (4) Feinplanung, (5) Realisieren und (6) Einsetzen. In den einzelnen Phasen werden die jeweiligen zu berücksichtigenden Gestaltungsaufgaben sowie die dazugehörigen Erfolgsfaktoren, z. B. Schlüsselpersonen, Qualifikation und Kommunikation, in Form einer Checkliste bereitgestellt (s. Abb. 3.1). Der Ansatz beschreibt somit das grundsätzliche Vorgehen bei der Einführung von Montageassistenzsystemen mit der Schwerpunktlegung auf den organisatorischen und personellen Aspekten. Die betriebsspezifische Auswahl und Konfiguration von Montageassistenzsystemen werden in dem Leitfaden jedoch nur unzureichend methodisch unterstützt.

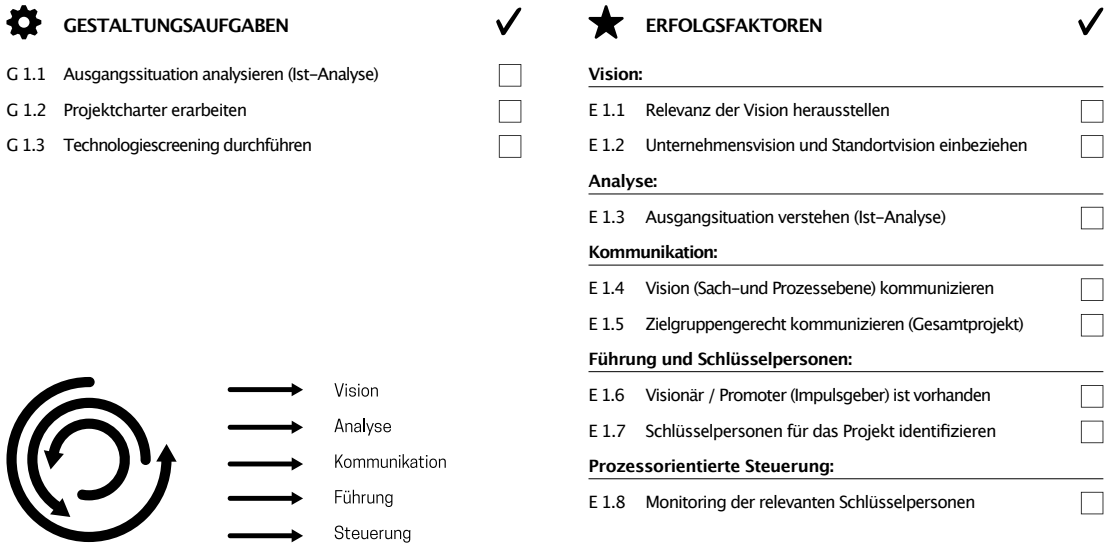


Abb. 3.1 Auszug aus dem Einführungsmodell von Kleineberg et al. (2017b)

Die vorgestellten Lösungsansätze zeigen, dass es bereits ein umfassendes Angebot zur Auswahl, Konfiguration und Implementierung von Assistenzsystemen gibt. So informieren beispielsweise die vorgestellten Technologiekompendien u. a. umfassend über Systemtypen, Anbieter, Anwendungsbeispiele und den aktuellen Entwicklungsstand. Die vorgestellten morphologischen Ansätze geben dem betrieblichen Anwender darüber hinaus die Möglichkeit, sich einen Überblick über Merkmale und Ausprägungen zu verschaffen, aus denen anschließend Gestaltungsoptionen abgeleitet werden können. Bestehende Ansätze zur Auswahl und Konfiguration von Assistenzsystemen basieren einerseits auf nutzwertanalytischen Abschätzungen und andererseits auf der

Basis von MTM-Studien. Konkrete Gestaltungsempfehlungen, die sich auf experimentelle Studien stützen, fehlen in dieser Hinsicht. Somit kann z. B. für eine spezifische Problemstellung – Reduzierung von Montagefehlern und Beanspruchungen – kein spezifisches System empfohlen werden. Die vorliegenden Leitfäden bzw. Modelle zur Einführung von Assistenzsystemen konzentrieren sich zum einen auf die konzeptionelle Gestaltung von Assistenzsystemen und zum anderen auf die organisatorischen und personellen Aspekte bei der Umsetzung. Ein ganzheitlicher Ansatz unter Berücksichtigung der Faktoren Mensch, Technik und Organisation fehlt in diesem Zusammenhang.

Aus den aufgezeigten Limitationen geht hervor, dass der Forschungsstand zur Auswahl, Konfiguration und Implementierung von informatorischen Assistenzsystemen in der betrieblichen Praxis noch nicht vollständig abgebildet ist. Konkret fehlt es an einem ganzheitlichen Ansatz bzw. Leitfaden, der den betrieblichen Anwender vom Beginn eines Einführungsprojekts bis zur abschließenden Evaluation unter der Berücksichtigung der Aspekte Mensch, Technik und Organisation begleitet. Auf diese Weise könnten Unternehmen ein auf ihren Anforderungen zugeschnittenes informatorisches Assistenzsystem in der betrieblichen Praxis implementieren und gleichzeitig die Produktion flexibler, effizienter und marktorientierter gestalten.

3.4 Spezifizierung und Abgrenzung der Forschungsziele

Der Stand der Forschung verdeutlicht, dass es bereits eine Fülle an Ansätzen, Verfahren oder Methoden zur Auswahl, Konfiguration und Implementierung von informatorischen Assistenzsystemen gibt (s. Abschn. 3.3), aber auch, dass es an einem ganzheitlichen Ansatz fehlt, der die Aspekte Mensch, Technik und Organisation gleichermaßen berücksichtigt. Vor diesem Hintergrund soll, wie bereits in Abschn. 1.3 beschrieben, im Rahmen der vorliegenden Arbeit ein Handlungsleitfaden entwickelt werden, der den betrieblichen Anwender bei der bedarfsgerechten und wirtschaftlichen Konfiguration und Implementierung dieser Systeme unterstützt. Dabei bieten vor allem Phasen- und Vorgehensmodelle den Nutzenden einen bewährten Standard, der durch konkrete Vorgaben und Hinweise Orientierung, Sicherheit und Unterstützung schafft. Darauf Bezug nehmend soll sich der zu entwickelnde Handlungsleitfaden an dem bestehenden und praxiserprobten Sechs-Phasen-Modell des REFA-Standardprogramms zur Arbeitssystemgestaltung orientieren. Dazu soll der entwickelte Leitfaden von Kleineberg et al. (2017a, 2017b) um ausgewählte Inhalte, insbesondere hinsichtlich der technischen Ausgestaltung und Umsetzung, ergänzt werden. Grundlage für die Entwicklung bzw.

Weiterentwicklung des Leitfadens bildet, wie in der Zielsetzung bereits beschrieben, die Durchführung einer empirischen Laborstudie zu den humanorientierten und wirtschaftlichen Potenzialen ausgewählter Systeme sowie die Entwicklung einer Methode zur Ermittlung der Einsatzpotenziale in bestehenden Arbeitssystemen (s. a. Forschungsfrage I und II).

Mit Blick auf den skizzierten Forschungsstand zu den humanorientierten und wirtschaftlichen Einsatzpotenzialen informatischer Assistenzsysteme wird deutlich, dass es bislang an Studien mangelt, die die für den Paradigmenwechsel in der Montage entscheidenden Merkmale (s. Abschn. 2.1.4), wie häufiges Um- und Anlernen oder die Zunahme an Produktvarianten, berücksichtigen. Ausgehend davon soll im Rahmen der vorliegenden Arbeit eine empirische Laborstudie unter Einbeziehung dieser Merkmale durchgeführt werden, mit dem Ziel, die Potenziale und Einsatzmöglichkeiten ausgewählter informatorischer Assistenzsysteme weiter zu spezifizieren. Im Mittelpunkt der Studie stehen dabei verschiedene industrielle Baugruppen eines Maschinenbauunternehmens sowie drei informatorische Assistenzsysteme – beamer-, tablet- und datenbrillengestütztes Assistenzsystem –, welche im Rahmen des eingangs erwähnten Forschungsprojekts Montexas4.0 (s. Kap. 1) entwickelt und realisiert worden sind. Einsatzpotenziale und -empfehlungen können dahingehend nur zu den drei angeführten Assistenzsystemtypen aufgezeigt werden.

Der Forschungsstand zur Abschätzung und Prognose der Einsatzpotenziale von informatorischen Assistenzsystemen in bestehenden Arbeitssystemen lässt erkennen, dass zwar erste Ansätze vorhanden sind, aber weiterer Handlungsbedarf besteht (s. Abschn. 3.2). Konkret fehlt es an Ansätzen, die den Beschäftigten in der Montage stärker in den Fokus des Veränderungsprozesses rücken, da diese auch maßgeblich am Erfolg oder Misserfolg einer solchen Systemeinführung beteiligt sind. Darauf Bezug nehmend soll ein Fragebogen zur Ermittlung der subjektiv wahrgenommenen bzw. informatorischen Komplexität eines manuellen Montagesystems entwickelt werden. Ausgangspunkt bildet hierbei die Annahme, dass ein informatorisches Assistenzsystem nur dann notwendig ist, wenn eine hinreichend hohe informatorische Komplexität im bestehenden Arbeitssystem vorliegt. Die Bewertung erfolgt dabei durch die Beschäftigten im Montagesystem selbst, so dass der tatsächliche Unterstützungsbedarf im Arbeitssystem in kurzer Zeit bestimmt werden kann. Ferner sollen die Ergebnisse Handlungsbedarfe bzw. Problemfelder im Montageprozess aufzeigen, anhand derer Kriterien für die Auswahl und Konfiguration von Assistenzsystemen abgleitet werden können.

Aus den gewonnenen Erkenntnissen – Laborstudie und Fragebogenentwicklung – sollen sodann unter der Berücksichtigung der wesentlichen Einflussfaktoren und Phaseninhalte konkrete Hinweise und Empfehlungen für die Auswahl und Gestaltung von informatorischen Assistenzsystemen abgeleitet werden. Dabei werden die einzelnen Phasen sowohl um einzelne Methoden als auch um praxisbezogene Hinweise zur technischen Gestaltung und Umsetzung ergänzt. Im Ergebnis sollen die identifizierten Forschungslücken bzw. Hemmnisse bei der Implementierung eines solchen Systems geschlossen und die breite Nutzung dieser innovativen Systeme ermöglicht werden.

4. Untersuchung der Einsatzpotenziale von Montageassistenzsystemen

Das vorliegende Kapitel beruht auf folgenden Vorveröffentlichungen:

- Bendzioch, S., Hinrichsen, S., & Bornewasser, M. (2020). Produktivität der Montagearbeit. In M. Bornewasser & S. Hinrichsen (Hrsg.), Informatorische Assistenzsysteme in der variantenreichen Montage: Theorie und Praxis (S. 113-134). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-662-61374-0_6
- Bendzioch, S., & Hinrichsen, S. (2020). How to Configure Assembly Assistance Systems – Results of a Laboratory Study. In I. L. Nunes (Hrsg.), Advances in Human Factors and Systems Interaction: Proceedings of the AHFE 2020 Virtual Conference on Human Factors and Systems Interaction, July 16-20, 2020, USA (S. 25-31). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-51369-6_4
- Bendzioch, S., Bläsing, D., & Hinrichsen, S. (2020). Comparison of different Assembly Assistance Systems under Ergonomic and Economic Aspects. In T. Ahram, W. Karwowski, S. Pickl & R. Taiar (Hrsg.), Human Systems Engineering and Design II: Proceedings of the 2nd International Conference on Human Systems Engineering and Design (IHSED2019): Future Trends and Applications, September 16-18, 2019, Universität der Bundeswehr München, Munich, Germany (S. 20-25). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-27928-8_4

4.1 Ziel und Methodik

Der Einsatz von informatorischen Assistenzsystemen kann entscheidend dazu beitragen, die Arbeitsbedingungen für die Beschäftigten in der manuellen Montage zu verbessern – psychische Gesundheit und Arbeitsbereitschaft – als auch die Produktivität der Montagearbeit positiv zu beeinflussen. Erste empirische Studien bestätigen zwar tendenziell die humanorientierten und wirtschaftlichen Potenziale einzelner Systemtypen, lassen aber nur begrenzt Rückschlüsse auf reale Montageaktivitäten im Kontext des Paradigmenwechsels zu (s. Abschn. 3.1). Vor diesem Hintergrund wird in dem vorliegenden Kapitel eine empirische Laborstudie vorgestellt, die die Auswirkungen des Einsatzes von informatorischen Assistenzsystemen unter der Berücksichtigung der gegenwärtigen Gegebenheiten in der Montage untersucht. Im Mittelpunkt stehen dabei drei verschiedene Assistenzsysteme – beamer-, tablet- und datenbrillengestütztes Assistenzsystem – sowie eine papierbasierte Anweisung, welche als Kontrollmedium fungiert. Aus den gewonnenen Erkenntnissen sollen sodann Empfehlungen für den Einsatz der untersuchten Assistenzsystemtypen abgeleitet werden.

4.2 Bestimmung der relevanten Einfluss- und Untersuchungsgrößen

In Abschnitt 2.1.4 wurden bereits verschiedene Größen beschrieben, die den Paradigmenwechsel in der manuellen Montage maßgeblich determinieren. So wurde deutlich, dass durch den Wandel zu variantenreicheren Produkten und der Integration neuer technologischer Möglichkeiten (z. B. Miniaturisierung) mit einem deutlichen Anstieg der kognitiven Anforderungen an die Beschäftigten einhergeht. Während in der Vergangenheit Einfachheit, Unabhängigkeit, Stabilität, Kontrolle und Sicherheit die Montage dominierten, stehen im Zuge der Komplexitätszunahme nun Vielfalt, Dynamik, Abhängigkeiten, Flexibilität und Unsicherheiten im Vordergrund (Bornewasser, 2020; Brinzer & Schneider, 2019). Die Anzahl an einfach strukturierten Montagesystemen nimmt folglich immer weiter ab und die Anzahl an Systemen, die durch Komplexität geprägt sind, zu. Insofern müssen Montagesysteme mehr denn je darauf ausgelegt sein, eine Vielzahl an Montageobjekten und Arbeitsmitteln zur Verfügung zu stellen, um mehrere Varianten bzw. Produkte herstellen zu können. Für den Beschäftigten in der Montage bedeutet diese Anforderung, in kurzer Zeit variierende Aufträge unter der Einhaltung von Produktivitäts- und Qualitätszielen zu bearbeiten.

Ausgehend von diesen Rahmenbedingungen wird deutlich, dass ein informatorisches Assistenzsystem bei der Bewältigung dieser Herausforderungen unterstützen muss, um einen unternehmerischen Nutzen zu generieren. Zu diesem Zweck sollte das System dabei helfen, die Komplexität im Arbeitssystem – hervorgerufen u. a. durch die Vielfalt an Teilen, Varianten und Werkzeugen – zu beherrschen. Allerdings sollte der Einsatz eines solchen Systems nicht zu einer zusätzlichen mentalen Belastung der Beschäftigten führen, sondern vielmehr zu einer Entlastung derer beitragen. In gleicher Weise wird von der Einführung eines informatorischen Assistenzsystems erwartet, dass Einarbeitungszeiten, Ausführungszeiten und Montagefehler abnehmen, mit dem Ziel, die Produktivität und Flexibilität in der Produktion zu erhöhen.

Für die Planung und Durchführung der experimentellen Untersuchung ergibt sich daraus, dass die zuvor beschriebenen Einflussgrößen in der manuellen Montage Berücksichtigung finden müssen, um eine qualitative Aussage über die Einsatzpotenziale von Assistenzsystemen in der Montage treffen zu können. Vor diesem Hintergrund stehen in der vorliegenden Untersuchung drei verschiedene industrielle Baugruppen bzw. Produkte unterschiedlicher Komplexität im Fokus, die den Einsatz mehrerer Werkzeuge erfordern. Ferner lassen sich aus den dargelegten Punkten Indikatoren bzw.

Untersuchungsgrößen ableiten, die für ein anforderungsgerecht gestaltetes Assistenzsystem sprechen. Zu diesen zählen die Anlernzeit, die Ausführungszeit, die Montagefehler, die Kommissionierfehler und die mentale Beanspruchung gemessen an dem in der Zielsetzung festgelegten Vergleichsmedium – papierbasierte Montageanweisung.

4.3 Generelles Vorgehen

4.3.1 Ablauf der Versuchsdurchführung

Zu Beginn einer jeden Versuchsdurchführung wurden die Probanden über das Vorgehen, die allgemeinen Rahmenbedingungen und das Studienziel informiert. Im weiteren Verlauf erfolgte sodann die Erhebung der personenbezogenen Daten und der Einstellung zu neuen Technologien sowie die Überprüfung der motorischen und visuellen Fähigkeiten anhand von ausgearbeiteten Dokumenten und Tests. Ferner wurden die aufgabenspezifischen Vorerfahrungen der Teilnehmenden mündlich erfragt und nur diejenigen berücksichtigt, die keine Erfahrung mit der Montageaufgabe hatten.

Nach der erfolgreichen Aufnahme der Daten erfolgte die Einrichtung des Montagearbeitsplatzes. Da bei allen Versuchssettings bzw. Montageaufgaben der empirischen Laborstudie nur ein standardisierter Steharbeitsplatz zum Einsatz kam, musste die Arbeitshöhe für jede Versuchsperson nur einmal eingestellt werden. Wenngleich die Teilnehmenden hierzu entsprechende Informationen erhielten, kam es letztlich darauf an, dass sie den Eindruck hatten, an dem Arbeitsplatz gut arbeiten zu können.

Mit der Zuweisung eines Unterstützungssystems – informatorisches Assistenzsystem oder Kontrollmedium – folgte die systematische Bearbeitung der Montageaufgaben. Diese bestanden aus der Montage von drei unterschiedlich komplexen industriellen Baugruppen, die jeweils viermal zu montieren waren. Zwischen den einzelnen Wiederholungen der Montageaufgaben gab es jeweils eine Unterbrechung von ca. fünf Minuten, in welcher ein Erhebungsinstrument zur Erfassung der subjektiv empfundenen Beanspruchung ausgefüllt worden ist. Für die aufgewendete Zeit erhielten die Probanden am Ende der Studie eine finanzielle Entschädigung.

4.3.2 Eingesetzte Pre- und Post-Tests

Für die empirische Laborstudie wurden drei verschiedene Pre-Tests und ein Post-Test verwendet, die im Folgenden näher beschrieben werden:

Pre-Test: Erhebung personenbezogener Daten: Die personenbezogenen Daten wurden mit Hilfe eines Fragebogens erhoben. In diesem wurde nach dem Alter, dem Geschlecht und dem beruflichen Status gefragt. Außerdem wurde die Einstellung zu neuen Technologien anhand von drei Fragen erhoben: (1) Wenn ich von neuen Technologien höre, suche ich nach Wegen, mit diesen zu experimentieren. (2) In meinem sozialen Umfeld bin ich normalerweise der erste, der neuen Technologien ausprobiert. (3) Ich experimentiere gerne mit neuen Technologien. Die Beurteilung der aufgeführten Fragen erfolgte anhand einer fünfstufigen Likert-Skala.

Pre-Test: Bestimmung der Sehschärfe: Um eine ausreichende Sehschärfe der Versuchspersonen sicherzustellen, wurde diese mit Hilfe eines Sehtests überprüft. Die Prüfung erfolgte mit einem standardisierten Sehtest nach Mißfeldt (o. J.). Auf diesem sind verschiedene Buchstaben in unterschiedlichen Größen abgebildet, die von den Versuchspersonen vorzulesen waren. Dazu wurde der Test in einer Höhe von 178 cm an einer Wand angebracht (oberste Kante des A4-Blattes). Der Abstand zum Test wurde auf 110 cm festgelegt, dies entspricht der maximalen Entfernung im Versuchsaufbau. Personen, die über eine Sehhilfe verfügten, absolvierten sowohl den Sehtest als auch den anschließenden Versuch mit dieser. Als Referenzwert bzw. Bestehensgrenze wurde die kleinste zu lesende Schrift während des Versuchs verwendet (entspricht der neunten Zeile im Sehtest, s. Mißfeldt (o. J.)).

Pre-Test: Bestimmung der motorischen Fertigkeiten: Zur Sicherstellung eines gleichbleibenden Leistungsniveaus hinsichtlich der motorischen Fertigkeiten in den einzelnen Versuchsgruppen wurde ein aus Legosteinen bestehendes Referenzmodell verwendet. Die Wahl fiel auf ein Lego-Modell, da davon ausgegangen werden kann, dass die Funktionsweise bei allen Versuchspersonen gleichermaßen bekannt ist. Bei dem Modell handelt es sich um ein Lego-Auto, das mit Hilfe einer papierbasierten Montageanleitung zusammengebaut werden musste. Die Anleitung ähnelt im Aufbau und Format derjenigen, die im späteren Hauptversuch Verwendung fand. Das Modell umfasst in Summe sieben Montageschritte, in denen insgesamt 18 Teile montiert worden sind. Während der Montage wurde die benötigte Zeit für den fehlerfreien Zusammenbau des Modells dokumentiert.

Post-Test – Bestimmung der mentalen Beanspruchung: Die mentale Beanspruchung einer Versuchsperson wurde mit Hilfe des subjektiven Erhebungsinstruments NASA-TLX (Task Load Index) erfasst (s. Anh. B). Das Instrument, bei dem es sich um einen standardisierten Fragebogen handelt, gliedert sich nach Hart und

Staveland (1988) in sechs Dimensionen: Geistige Anforderung, körperliche Anforderung, zeitliche Anforderung, Leistung, Anstrengung und Frustrationsniveau. Von der ursprünglichen Gewichtung der einzelnen Dimensionen wird im Folgenden abgesehen, da Untersuchungen von Nygren (1991) gezeigt haben, dass gewichtete und ungewichtete Ergebnisse eine hohe Korrelation zueinander aufweisen. Die jeweilige subjektiv wahrgenommene Beanspruchung wird auf einer numerische Skala von 0 bis 100 in fünfer Schritten erfasst, wobei 0-9 für eine sehr geringe, 10-29 für eine niedrige, 30-49 für eine erhöhte, 50-79 für eine hohe und 80-100 für eine sehr hohe mentale Beanspruchung stehen (vgl. Prabaswari et al., 2019).

4.3.3 Auswertung der Untersuchungsreihen

Die experimentell erhobenen Daten wurden sowohl deskriptiv als auch inferenzstatistisch mit Hilfe des Statistikprogramms SPSS® 28 ausgewertet. Im Rahmen der inferenzstatistischen Analyse wurde der Einfluss ausgewählter informatorischer Assistenzsysteme im Vergleich zum verwendeten Kontrollmedium hinsichtlich der definierten Testmerkmale untersucht. Abhängig von der Datenverteilung – Shapiro-Wilk-Test – kam eine Varianzanalyse mit Messwiederholung – Normalverteilung – oder ein Kruskal-Wallis-Test – keine Normalverteilung – zum Einsatz. Im Falle einer Sphärizitätsverletzung – Mauchly-Test signifikant – wurde zudem eine Korrektur für $\varepsilon < 0{,}75$ nach Greenhouse-Geisser und für $\varepsilon > 0{,}75$ nach Huynh-Feldt vorgenommen. Ergebnisse, die sich als signifikant erwiesen, sind anhand von Post-hoc-Tests – paarweiser Vergleich der Mittelwerte – unter Anwendung der Bonferronie-Korrektur überprüft worden. Das Signifikanz- bzw. Alpha-Niveau lag in allen durchgeführten Analysen bei $\alpha = 0{,}05$, wobei signifikante Ergebnisse ($p < \alpha$) in drei Klassen unterteilt wurden: $0{,}05 > p > 0{,}01$ signifikant, $0{,}01 \geq p > 0{,}001$ sehr signifikant, und $p \leq 0{,}001$ hoch signifikant.

Für signifikante Ergebnisse wurde zudem die Effektgröße partielles Eta-Quadrat (η^2_p) im Falle einer Normalverteilung und der Korrelationskoeffizient (r) im Falle einer Nicht-Normalverteilung berechnet. So entspricht $\eta^2_p < 0{,}06$ bzw. $r < 0{,}30$ einem schwachen Effekt, $0{,}06 \leq \eta^2_p < 0{,}14$ bzw. $0{,}30 \leq r < 0{,}50$ einem mittleren Effekt und $\eta^2_p \geq 0{,}14$ bzw. $r \geq 0{,}50$ einem starken Effekt (vgl. Cohen, 1988; 1992). Neben der inferenzstatistischen Analyse erfolgte, wie oben beschrieben, auch eine deskriptive Analyse der Ergebnisse. Dabei wurden die Daten hinsichtlich ihrer Lage, Verteilung, Abbildungen und Tabellen beschrieben.

4.4 Stichprobe

An der Studie zur Untersuchung der Einsatzpotenziale von informatorischen Assistenzsystemen nahmen insgesamt 56 Versuchspersonen teil – 13 Frauen und 43 Männer. Somit konnten für jede der vier Bedingungskombinationen bzw. Unterstützungssysteme 14 Personen berücksichtigt werden. Diese waren zum Zeitpunkt der Untersuchung zwischen 20 und 37 Jahre alt (M = 25,05; SD = 3,55). Bei den Teilnehmenden handelte es sich fast ausschließlich um Studierende (96,4 %) mit einem überwiegend technischen Hintergrund (85,2 %), was sich auch in ihrer Einstellung bzw. Haltung zu neuen Technologien widerspiegelte (M = 3,74; SD = 0,73; vgl. Abschn. 4.3.2 – Fragen zur Technologieeinstellung). Insofern kann davon ausgegangen werden, dass die Studienteilnehmenden den Systemen grundsätzlich positiv gegenüberstanden.

Im Rahmen der Überprüfung der Sehschärfe bestätigte sich, dass die teilnehmenden Personen alle über eine ausreichende Sehleistung verfügten. Der motorische Test – Montage des Referenzmodells – zeigte zudem, dass sich die Probanden unter Berücksichtigung der vier Teilgruppen Papier, Datenbrille, Beamer und Tablet nicht signifikant voneinander unterscheiden (F(3, 52) = 0,260, p = 0,854; s. a. Tab. 4.1).

Tab. 4.1 Ausführungszeiten des Lego-Referenzmodells

	Mittelwert [s]	Standard-abweichung [s]	Anzahl
Papier	95,86	21,86	14
Datenbrille	95,50	13,76	14
Beamer	90,93	18,43	14
Tablet	92,43	15,07	14
Gesamt	93,68	17,21	56

Ein zusätzlicher Vergleich zwischen den Geschlechtern ergab ebenfalls keine signifikanten Unterschiede weder mit (F(1, 48) = 0,308, p = 0,581) noch ohne Berücksichtigung der Teilgruppen (F(3, 48) = 0,584, p = 0,628). Auch eine Unterteilung des Datensatzes hinsichtlich der mittleren Ausführungszeit – Mean-Split – (M = 93,68; SD = 17,21) verdeutlicht, dass sich die Teilnehmenden unter und über dem Mittelwert recht gleichmäßig auf die vier Teilgruppen verteilen (s. Tab. 4.2). Aus den dargelegten Ergebnissen lässt sich folglich ableiten, dass das Ausgangsniveau der Versuchspersonen in Bezug auf die motorischen Fertigkeiten in etwa gleich groß ist. Die

abschließende Befragung der Probanden zu ihren Vorerfahrungen mit der Versuchsaufgabe – drei industrielle Baugruppen – ergab, dass sie die zu montierenden Teile bzw. Baugruppen vor der Teilnahme am Experiment noch nicht zusammengebaut bzw. keine Erfahrungen damit gemacht hatten.

Tab. 4.2 Verteilung der Versuchspersonen auf die vier Teilgruppen auf Basis des Mean-Splits

	Anzahl Mittelwert < 93,68	Anzahl Mittelwert > 93,68
Papier	8	6
Datenbrille	6	8
Beamer	7	7
Tablet	8	6
Gesamt	29	27

4.5 Untersuchungsdesgin

4.5.1 Eingesetzte Unterstützungssysteme

Die experimentelle Untersuchung umfasste insgesamt vier verschiedene Typen von Unterstützungssystemen für den Zusammenbau der drei industriellen Baugruppen. Einerseits waren dies drei verschiedene informatorische Assistenzsysteme – datenbrillengestütztes Assistenzsystem, tabletgestütztes Assistenzsystem, beamergestütztes Assistenzsystem – und andererseits eine papiergestützte Informationsbereitstellung, welche als Kontroll- bzw. Vergleichsmedium diente.

Der Informationsgehalt bzw. -umfang wurde soweit möglich für alle unterstützenden Systeme gleich aufbereitet. Zu den Informationen zählte eine Schritt-für-Schritt-Anweisung, die die zu verwendenden Komponenten, Werkzeuge und Montageinstruktionen beinhaltete. Bei der Erstellung dieser Informationen wurde insbesondere darauf geachtet, beschreibende Instruktionen auf ein Minimum zu reduzieren und an ihrer Stelle Abbildungen, Bilder oder Symbole zu verwenden. Die Form der Informationsausgabe unterschied sich dabei zum Teil vom verwendeten Kontrollmedium, um die spezifischen Eigenschaften der informatorischen Assistenzsysteme im Versuchsaufbau mit zu berücksichtigen. So wurden bei allen informatorischen Assistenzsystemen die Stücklisteninformationen nicht in Form einer Liste ausgegeben, sondern die Behälterposition im Arbeitssystem visuell dargestellt bzw. angezeigt.

Die im Rahmen der Studie zu bearbeitenden Montageaufgaben wurden für alle Ausgabeeinheiten in gleich viele Teilschritte unterteilt. Lediglich bei der Datenbrille wurden die für einen Teilschritt benötigten Informationen in zwei separate Ansichten – (1) Kommissionierung und (2) Montagausführung – bereitgestellt. Ursache hierfür ist, dass die Datenbrille in ihrer Darstellungskapazität begrenzt ist, so dass aus Gründen der Lesbarkeit der Informationen auf eine einzige Ansicht verzichtet worden ist. Nachfolgend werden die einzelnen Unterstützungssysteme im Detail vorgestellt:

Papiergestützte Informationsbereitstellung

Wie eingangs erwähnt, stellt die papierbasierte Informationsbereitstellung das Kontrollmedium im Versuchsdesign dar. Angesichts der Tatsache, dass Arbeitsanweisungen in der Praxis oft mit Defiziten behaftet sind, wurde bei der Erstellung der papiergebundenen Anweisungen explizit darauf geachtet, diese so umfassend und benutzerfreundlich wie möglich zu gestalten. Gleichermaßen sollte sie aber auch nicht realitätsfern sein und einer in der Praxis genutzten Anweisung entsprechen. Als Orientierungshilfe diente dabei die Studie von Wiesbeck (2013), wonach papierbasierte Arbeitsanweisungen in der Praxis überwiegend mit Texten, Tabellen oder Abbildungen gestaltet werden. Unter Berücksichtigung dieser Hinweise wurde die in Abb. 4.1 dargestellte Anweisung erstellt. Die Ausgabe der Anweisungen erfolgte auf ausgedruckten DIN-A4-Zetteln, die für jede der drei Baugruppen mit einer Heftklammer in der linken oberen Ecke zusammengetackert worden sind. Auf eine feste Platzierung der Anweisungen im Arbeitssystem wurde dabei verzichtet, so dass die Teilnehmenden die Anweisungen frei am Arbeitsplatz platzieren konnten.

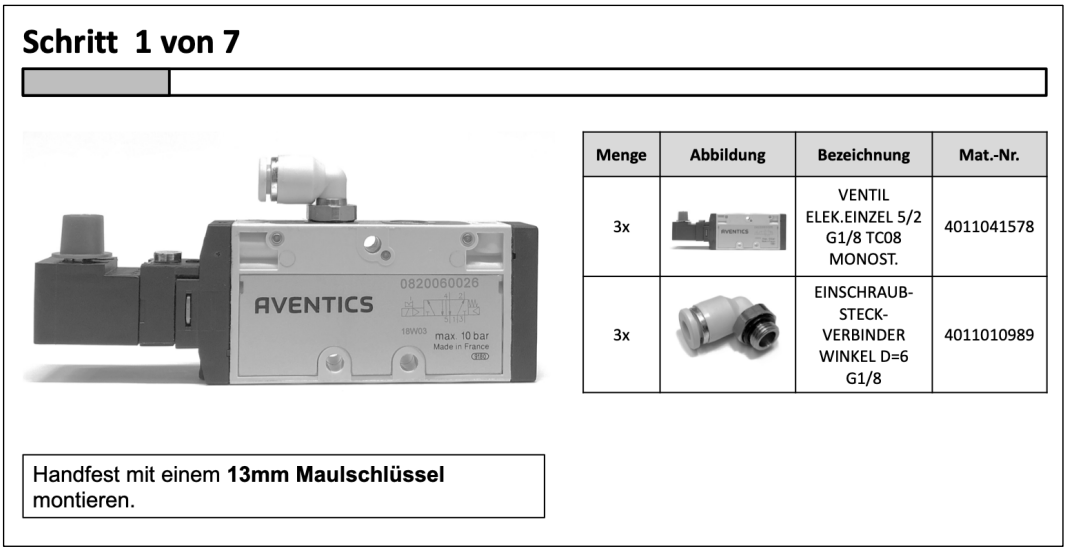


Abb. 4.1 Papiergestützte Informationsbereitstellung – Kontrollmedium

Datenbrillengestütztes Assistenzsystem

Die Hardware für das datenbrillengestützte Assistenzsystem bestand aus einer Vuzix M300. Diese zeichnet sich durch ein geringes Gewicht von ca. 130g aus und kann sowohl von Personen mit als auch ohne Sehhilfe getragen werden. Sie basiert auf einem Android-Betriebssystem, welches werksseitig mit einer Vielzahl an Apps ausgestattet ist. Eine dieser Apps ist eine Bild-App, die zur Ausgabe der montagerelevanten Informationen genutzt wurde. In Abb. 4.2 ist die Informationsausgabe sowie die zuvor beschriebene Aufteilung der Informationen in Teilschritte zu sehen. So wurde der Versuchsperson jeweils in einem ersten Schritt angezeigt, wo die erforderlichen Einzelteile zu finden sind – Behälterposition und Menge –, und in einem zweiten Schritt, wie die Bauteile zu montieren sind. Die einzelnen Schritte sind dabei über die Funktionstasten der Datenbrille zu steuern. Zur Sicherstellung einer ausreichenden Stromversorgung wurde die Datenbrille während der gesamten Versuchsdauer zusätzlich mit einer Powerbank geladen.

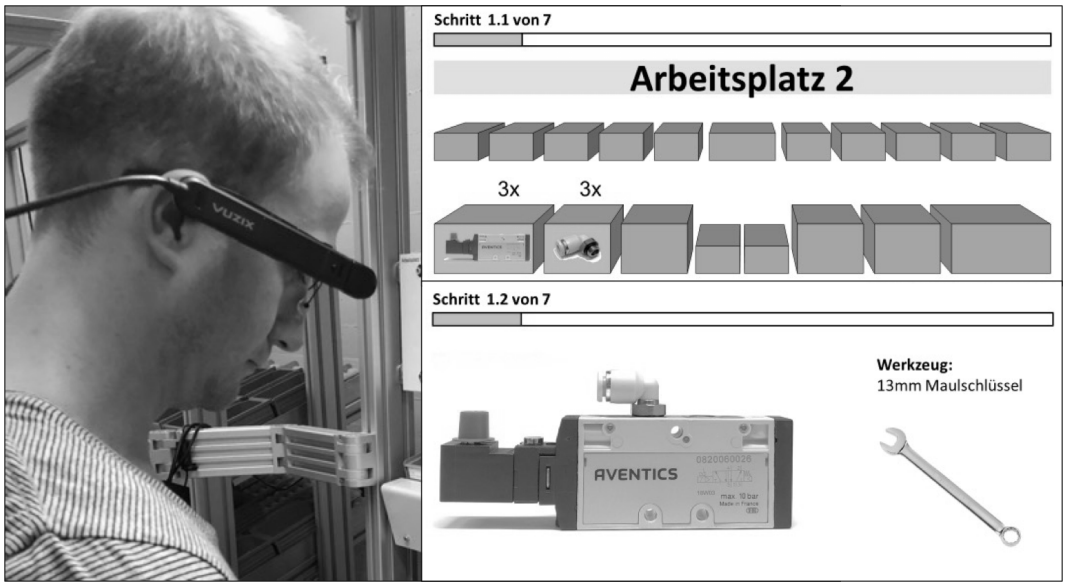


Abb. 4.2 Datenbrillengestütztes Assistenzsystem

Tabletgestütztes Assistenzsystem

Als Hardware für das tabletgestütze Assistenzsystem wurde ein Microsoft Surface Pro 3 mit einer Bildschirmdiagonale von 12 Zoll verwendet. Für eine zentrale Bedienbarkeit bzw. Einsehbarkeit der Informationen wurde das Gerät in der Mitte des Arbeitssystems positioniert und mit Hilfe einer entsprechenden Halterung angebracht. Die Ausgabe der erforderlichen Informationen erfolgte dabei über eine

spezielle Softwarelösung. Mit dieser lassen sich umfangreiche Konfigurations- und Darstellungsmöglichkeiten von Montageanleitungen realisieren und verwalten. Für das im Versuch eingesetzte Assistenzsystem wurde die in Abb. 4.3 gezeigte Darstellung verwendet. Auch bei dieser sind die Behälterpositionen sowie die Anzahl der zu entnehmenden Teile durch ein Abbild der realen Behälterpositionen gekennzeichnet. Die Steuerung des Systems erfolgte dabei wahlweise über den Touchscreen des Tablets oder über Taster auf der Arbeitsfläche.

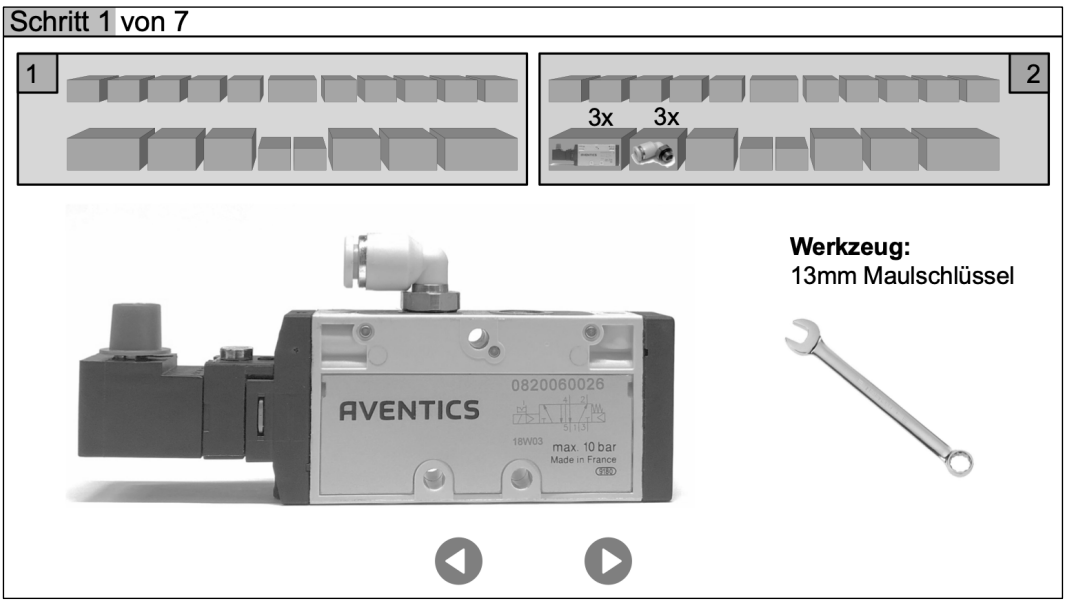


Abb. 4.3 Tabletgestütztes Assistenzsystem

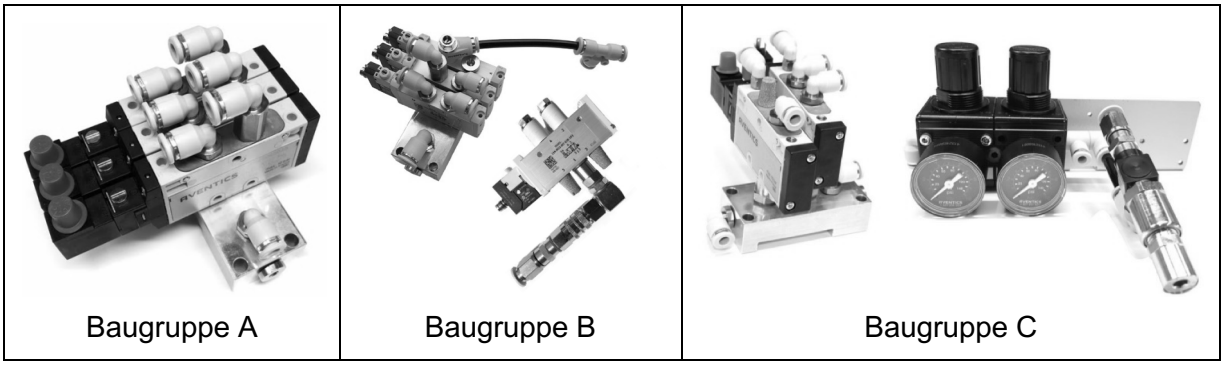
Beamergestütztes Assistenzsystem

Anders als bei den bisher beschriebenen Ausgabemedien beschränkte sich die Darstellung der relevanten Informationen beim beamergestützten Assistenzsystem nicht auf eine Bildschirmanzeige oder ein Blatt Papier, vielmehr wurden diese in die reale Montageumgebung projiziert (s. Markierungen in Abb. 4.4). Die Aufbereitung und Ausgabe der benötigten Informationen erfolgte hierbei, wie bei dem tabletgestützten Assistenzsystem, mit Hilfe einer speziellen Software. Diese war auf einem Desktop-PC installiert und wurde über ein am Arbeitsplatz angebrachten Touch-Display (21,5 Zoll Bildschirmdiagonale) bedient. Als Ausgabe bzw. Projektionseinheit für die montagerelevanten Informationen fanden zwei lichtstarke Kurzdistanzbeamer des Herstellers Canon mit jeweils 5000 Lumen Verwendung, welche fest über dem Arbeitsplatz montiert wurden (s. Abschn. 4.5.3). Die Steuerung der Montageschritte erfolgte dabei über fest installierte Taster auf der Arbeitsfläche.

Abb. 4.4 Beamergestütztes Assistenzsystem

4.5.2 Untersuchungsaufgabe

Ziel der Untersuchung war es, die vermeintliche Überlegenheit von drei verschiedenen informatorischen Assistenzsystemen im Vergleich zu einer konventionellen papierbasierten Informationsbereitstellung unter Berücksichtigung der gegenwärtigen Veränderungen in der Montage anhand verschiedener Indikatoren zu überprüfen und zu bewerten (s. Abschn. 4.2). Vor diesem Hintergrund umfasste die Studie drei verschiedene experimentelle Aufgaben, die zwar im Labor durchgeführt wurden, aber die Montage von industriellen Baugruppen mit Originalteilen und -werkzeugen beinhaltete. Bei den Baugruppen handelte es sich um Pneumatikbaugruppen eines Maschinenherstellers, die sich durch eine Vielzahl an Konfigurationsmöglichkeiten und eine hohe Ähnlichkeit der einzelnen Komponenten zueinander auszeichnen (s. Abb. 4.5). Kennzeichnend für die drei ausgewählten Baugruppen sind die unterschiedlichen Komplexitätsgrade: Baugruppe A – „leicht“, Baugruppe B – „mittel“ und Baugruppe C – „schwer“.



Baugruppe A | Baugruppe B | Baugruppe C

Abb. 4.5 Berücksichtigte Baugruppen im Forschungsdesign

Die Einteilung in die drei Komplexitätsgrade leicht, mittel und schwer erfolgte mit Hilfe des Entropiemaßes (H). Dieses stammt aus der Informationstheorie und misst den Grad an Unsicherheit vor dem Eintreten eines Ereignisses, zum Beispiel bei der Auswahl eines Bauteils, und wird wie folgt berechnet (z. B. Schlick et al., 2018a):

$$H = -\sum_{i=1}^{N} p_i \, log_2 \, p_i$$

Die Entropie entspricht damit dem Informationsgehalt einer Aufgabe (Bit) und kann als die Menge an Informationen interpretiert werden, die verarbeitet werden muss, um eine Aufgabe auszuführen (Jeske, 2013) (s. a. Abschn. 2.2.2). Tab. 4.3 zeigt die sich daraus ergebende Einteilung für die drei ausgewählten Pneumatikbaugruppen sowie weitere Bezugsgrößen. Aus der Tab. geht ebenfalls hervor, dass der größte Komplexitätszuwachs zwischen den Baugruppen A und B mit einer Zunahme von 1,24 Bit zu verzeichnen ist.

Tab. 4.3 Bezugsgrößen der Untersuchungsaufgabe

	Baugruppe A	Baugruppe B	Baugruppe C
Komplexitätsgrad	Leicht	Mittel	Schwer
Entropiemaß [Bit]	2,59	3,83	4,47
Anzahl Einzelteile	21	39	48
Anzahl unterschiedlicher Einzelteile	7	20	27
Anzahl Werkzeug	3	7	11

Während der Versuchsdurchführung wurden die Baugruppen jeweils viermal in einer festgelegten Reihenfolge – von leicht zu schwer – zusammengebaut. Die Wiederholung des Zusammenbaus hat den Hintergrund, die in Abschn. 4.2 angeführte Anlernzeit im Forschungsdesign mit zu berücksichtigen. Untersuchungen von Jeske (2013) haben in diesem Zusammenhang gezeigt, dass der Umfang von vier Wiederholungen – Montageausführungen – ausreicht, um einen hinreichend hohen Anlerneffekt zu erkennen.

4.5.3 Untersuchungsaufbau

Die empirische Laborstudie wurde an einem standardisierten Steharbeitsplatz der Firma RK Rose+Krieger durchgeführt – Arbeitsfläche 2.420 x 540 mm mit einer Grundarbeitshöhe von 933 mm. Bedingt durch die Vielzahl an Teilen und Werkzeugen, die für die Montage der Versuchsaufgaben benötigt wurden, bestand der Arbeitsplatz aus zwei Einzelarbeitsplätzen mit zusätzlichen Rollenbahnen für die Teilezuführung mittels Greifbehältern (s. Abb. 4.6). Die beiden Teilarbeitsplätze waren dabei sowohl mechanisch als auch elektronisch miteinander verbunden, so dass die in Abschnitt 4.3.1 beschriebene Höhenverstellung – elektronisch via Hubsäulen 400 mm – synchron verlief. Mit der Zielsetzung, einen möglichst hohen Praxisbezug in der Laborstudie zu erreichen, stellt der gezeigte Versuchsaufbau u. a. ein Ausschnitt eines Montagearbeitsplatzes eines Maschinenherstellers dar.

Abb. 4.6 Versuchsaufbau der empirischen Laborstudie

Die Anordnung der Teile im Arbeitssystem erfolgte in Anlehnung an dem von Sehr und Moriz (2019) entwickelten Algorithmus zur Teileanordnung im Arbeitssystem. Dieser hat die Zielgröße, Geh- und Greifwege auf ein Minimum zu reduzieren. Demzufolge lassen sich bestimmte Montageaufgaben bevorzugt an Teilarbeitsplatz eins und andere an Teilarbeitsplatz zwei montieren. Zur besseren Unterscheidung der Teilarbeitsplätze wurden diese entsprechend beschriftet und durch eine blaue und rote Arbeitsfläche optisch voneinander getrennt – relevant für die Ausgabe der Behälterpositionen in den informatorischen Assistenzsystemen (z. B. Abb. 4.3). In gleicher Weise wurden auch die Greifbehälter am Arbeitsplatz mit der Teilebezeichnung und der Materialnummer gekennzeichnet. Die zur Montage benötigten Werkzeuge wurden teilarbeitsplatzspezifisch über den Greifbehältern mit Hilfe von Werkzeugklemmen angebracht und ebenfalls mit einer Kennzeichnung versehen.

Zur Gewährleistung einer ausreichenden Ausleuchtung des Arbeitsplatzes wurde dieser mit zwei LED-Leuchtmitteln der Firma Waldmann ausgestattet. Fest im Arbeitssystem installiert waren zudem das beamer- und tabletgestützte Assistenzsystem (s. Abschn. 4.5.1). Um äußere Einflüsse während der Untersuchung durch den Versuchsleitenden auf ein Minimum zu reduzieren, wurden zusätzlich zwei IP-Kameras oberhalb des Arbeitsplatzes montiert (s. Abb. 4.6). Auf diese Weise konnte der Versuchsablauf live über einen Bildschirm (22 Zoll Bildschirmdiagonale) in ausreichender Entfernung zur Versuchsperson – mehr als 5 m – an einem separaten Arbeitsplatz verfolgt werden.

4.5.4 Unabhängige und abhängige Variablen

Die unabhängigen Variablen unterteilen sich aufgrund der Tatsache, dass es sich bei dem Forschungsdesign um ein 4x3 faktorielles Forschungsdesign handelt, in zwei Faktoren. Innerhalb des ersten Faktors wurde die Art der Unterstützung über vier Stufen variiert: (1) Datenbrillengestütztes Assistenzsystem, (2) Tabletgestütztes Assistenzsystem, (3) Beamergestütztes Assistenzsystem und (4) papiergestützte Informationsbereitstellung (Kontrollgruppe). Mit dem zweiten Faktor wurde die Montageaufgabe hinsichtlich der Komplexitätszunahme über drei Stufen variiert: (1) Baugruppe A – „leicht“, (2) Baugruppe B – „mittel“ und (3) Baugruppe C – „schwer“. Dabei wurde die Dauer der Arbeitsausführung für jede Wiederholung, die Anzahl der Montage- und Kommissionierfehler für jeden Montagedurchgang und die subjektiv wahrgenommene mentale Beanspruchung der Versuchspersonen nach jeder Wiederholung als abhängige Variable erfasst.

4.5.5 Untersuchungsdurchführung

Der grundsätzliche Ablauf der Studie wurde bereits in Abschn. 4.3.1 beschrieben und wird im Folgenden durch Details zur Studien- bzw. Aufgabendurchführung ergänzt. So wurde der Versuchsperson im Anschluss an die zuvor genannten Pre-Tests nach dem Zufallsprinzip ein Unterstützungssystem zugewiesen, mit welchem sämtliche Versuchsaufgaben durchzuführen waren. Dabei wurden die Versuchspersonen mit Hilfe von ausgearbeiteten Dokumenten in das jeweilige Unterstützungssystem eingewiesen, mit dem Ziel, eine einheitliche Informationsbasis und damit Ausgangsbedingungen für den Versuch zu schaffen. Lediglich bei der Datenbrille wurde aufgrund der ungewohnten Funktion und der schwierigen Positionierung vor dem Auge neben den ausgearbeiteten Unterlagen auch ein Lego-Modell zu Schulungszwecken montiert.

Daran anschließend wurden die Versuchspersonen über wichtige Aspekte bei der Versuchsdurchführung am Arbeitsplatz informiert. Es wurde vor allem auf die Besonderheiten bei der Montage von pneumatischen Bauteilen hingewiesen und darauf, dass während der Montage keine besonderen Kraftaufwendungen erforderlich sind. Ebenso wurde die Funktion und Handhabung der verschiedenen Werkzeuge erläutert und dazu appelliert, das Werkzeug am Ende eines jeden Montageschrittes zurückzulegen.

Mit dem Aufruf der jeweiligen Montageanleitung bzw. durch das Umblättern der papierbasierten Anweisung zum ersten Montageschritt einer jeden Baugruppe begann die experimentelle Untersuchung. Die Ausführungszeit wurde dabei vom Versuchsleitenden mit Hilfe einer Excel-Tabelle erfasst und bezieht sich immer auf die Gesamtzeit, die zur Fertigstellung einer Baugruppe benötigt wurde. Montagefehler wurden hingegen in einer zuvor erstellten Fehlerliste notiert, die die folgenden Merkmale enthält: Kommissionierfehler – falsches Werkzeug gegriffen, falsches Teil gegriffen und/ oder zu viele/ zu wenige Teile gegriffen – und Montagefehler – Werkzeug nicht benutzt, an falscher Position montiert, falsche Orientierung des Bauteils, Bauteil nicht verbaut und sonstiger Fehler bei der Montage. Zur Gewährleistung einer einheitlichen Fehlerklassifizierung sind die einzelnen Fehlermerkmale und Bewertungshinweise in einem separaten Dokument (s. Anh. C) beschrieben worden. Anzumerken ist hierbei, dass alle Montagefehler erfasst wurden, auch diejenigen, die während der Montage korrigiert werden konnten. Nach der Beendigung einer Montageaufgabe musste der Proband den Post-Test (NASA-TLX Fragebogen) ausfüllen, so dass die subjektiv empfundene Belastung für jede Montagedurchführung und Baugruppe ermittelt werden konnte.

4.6 Hypothesen

Im Rahmen der empirischen Laborstudie wurden sechs Hypothesen aufgestellt und hinsichtlich ihrer Gültigkeit überprüft:

1. Der Einsatz eines informatorischen Assistenzsystems führt mit zunehmender Komplexität der Montageaufgabe zu geringeren Ausführungszeiten im Vergleich zur Verwendung einer papierbasierten Montageanleitung.
2. Der Einsatz eines informatorischen Assistenzsystems führt mit zunehmender Komplexität der Montageaufgabe zu geringeren Anlernzeiten im Vergleich zur Verwendung einer papierbasierten Montageanleitung.
3. Der Einsatz eines informatorischen Assistenzsystems führt unabhängig von der Komplexität bzw. Baugruppe bei der erstmaligen Montageausführung zu geringeren Ausführungszeiten im Vergleich zur Verwendung einer papierbasierten Montageanleitung.
4. Der Einsatz eines informatorischen Assistenzsystems führt unabhängig von der Komplexität bzw. Baugruppe zu einer geringeren Anzahl an Montagefehlern im Vergleich zur Verwendung einer papierbasierten Montageanleitung.
5. Der Einsatz eines informatorischen Assistenzsystems führt unabhängig von der Komplexität bzw. Baugruppe zu einer geringeren Anzahl an Kommissionierfehlern im Vergleich zur Verwendung einer papierbasierten Montageanleitung.
6. Der Einsatz eines informatorischen Assistenzsystems führt zu einer geringeren mentalen Beanspruchung im Vergleich zur Verwendung einer papierbasierten Montageanleitung.

4.7 Ergebnisse

4.7.1 Untersuchungen zur Anlern- und Ausführungszeit

Im Rahmen der ersten Hypothese wird die Auswirkung eines informatorischen Assistenzsystems auf die Ausführungszeit in Abhängigkeit von der Komplexität einer Montageaufgabe untersucht. Dabei wird erwartet, dass die eingesetzten Assistenzsysteme mit zunehmender Komplexität der Montageaufgabe – Baugruppe B und C – signifikante Unterschiede zum Kontrollmedium aufweisen. Eine Analyse der Daten weist diesbezüglich auf einen signifikanten Haupteffekt zwischen der Ausführungszeit und den verwendeten Unterstützungssystemen für Baugruppe A $F(3, 52) = 3{,}61$, $p = 0{,}019$, Baugruppe B $F(3, 52) = 7{,}08$, $p < 0{,}001$ und Baugruppe C $F(3, 52) = 4{,}12$, $p = 0{,}011$ hin.

Die dazugehörigen Effektstärken bestätigen einen starken Effekt: Baugruppe A η^2_p= 0,17, Baugruppe B η^2_p = 0,29 und Baugruppe C η^2_p = 0,19. Paarweise Vergleich zwischen den eingesetzten Unterstützungssystemen auf Basis der Ausführungszeit zeigen zudem einen statistisch relevanten Unterschied für die Baugruppen B und C auf. Für Baugruppe B ergibt sich somit ein signifikanter Unterschied zwischen der Nutzung eines tablet- und beamergestützten Assistenzsystems im Vergleich zum eingesetzten Kontrollmedium (Beamer p = 0,003 und Tablet p = 0,005). Hingegen führt bei der Baugruppe C nur der Einsatz eines beamergestützten Assistenzsystems zu kürzeren Ausführungszeiten im Vergleich zur papierbasierten Informationsbereitstellung (p = 0,028). Folglich kann die erste Hypothese lediglich für das beamergestützte Assistenzsystem in vollem Umfang bestätigt werden. Deskriptiv lassen sich jedoch auch für alle anderen eingesetzten informatorischen Assistenzsysteme Potenziale zur Verkürzung der Ausführungszeit im Vergleich zum Kontrollmedium feststellen (s. Tab. 4.4).

Tab. 4.4 Verkürzung der Ausführungszeit im Vergleich zum Kontrollmedium

	Baugruppe A	Baugruppe B	Baugruppe C	Gesamt
Datenbrille	- 0,64 %	- 5,32 %	- 3,65 %	- 3,77 %
Beamer	- 14,33 %	- 21,53 %	- 13,83 %	- 16,80 %
Tablet	- 16,31 %	- 20,31 %	- 12,34 %	- 16,00 %
Bezugsgröße ist die Gesamtausführungszeit des Kontrollmediums mit 35 Stunden 12 Minuten				

Aus der Tab. 4.4 geht hervor, dass sich die Ausführungszeit über alle Baugruppen hinweg am stärksten mit dem beamer- und tabletgestützten Assistenzsystem reduzieren lässt. Hieraus resultiert eine durchschnittliche Verkürzung der Ausführungszeit von rund 25 Minuten je Probanden im Vergleich zur papiergestützten Anweisung für die beiden zuvor genannten Systeme. Mit Blick auf die Komplexitätszunahme der Montageaufgabe zeigen die eingesetzten Assistenzsysteme das größte Anwendungspotenzial bei der Montage der Baugruppe B, in welcher auch im Gesamtvergleich die größte Komplexitätszunahme erfolgte (Wechsel von Baugruppe A zu B, s. a. Abschn. 4.5.2).

Der zu erwartende Leistungszuwachs bzw. das Auftreten eines sogenannten Anlerneffekts bestätigt sich unabhängig vom Unterstützungssystem durch signifikante Haupteffekte für die drei Baugruppen – Grundbedingung für Hypothese zwei: Baugruppe A

F(1,74, 90,26) = 161,28, p < 0,001, Baugruppe B F(1,77, 91,84) = 242,95, p < 0,001 und Baugruppe C F(1,64, 85,44) = 320,44, p < 0,001. Diesen Haupteffekten sind ausschließlich starke Effektstärken zuzuordnen (Baugruppe A η^2_p= 0,76, Baugruppe B η^2_p = 0,82 und Baugruppe C η^2_p = 0,86). Dabei unterscheidet sich der Verlauf des Lernens – Verringerung der Ausführungszeit von Ausführung zu Ausführung – bereits deskriptiv zwischen den einzelnen Unterstützungssystemen innerhalb einer jeden Baugruppe (s. Abb. 4.7). Auf der Basis der Ausführungszeiten lässt sich dieser Zusammenhang für die Baugruppen B und C durch einen signifikanten Interaktionseffekt von Ausführungswiederholung und Unterstützungssystem nachweisen: Baugruppe B F(5,30, 91,84) = 2,53, p = 0,032 und Baugruppe C F(4,93, 85,44) = 3,85, p = 0,004. Für Baugruppe B ergibt sich daraus eine mittlere Effektstärke (η^2_p = 0,13) und für Baugruppe C eine starke Effektstärke (η^2_p = 0,18).

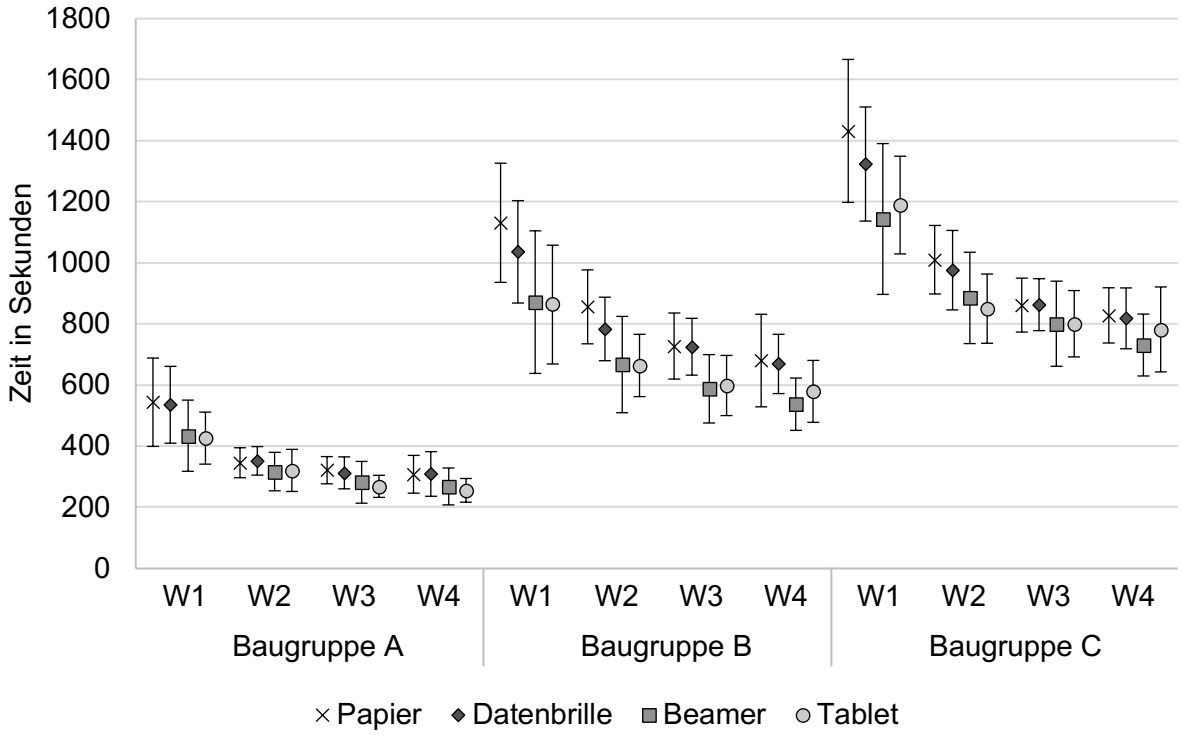


Abb. 4.7 Mittlere Ausführungsdauer der Wiederholungen (W) in Abhängigkeit von den Baugruppen

Grundsätzlich kann also bestätigt werden, dass mit zunehmender Komplexität der Baugruppen ein signifikanter Einfluss des Unterstützungssystems auf die Ausführungszeit besteht. Offen bleibt allerdings, inwiefern sich die Ausgabemedien voneinander unterscheiden und in welchen Wiederholungen der Einfluss vorliegt. Durchgeführte Post-hoc-Tests haben in diesem Zusammenhang ergeben, dass sich alle vier Ausführungen

in Baugruppe B sowie die ersten beiden Ausführungen in Baugruppe C signifikant zwischen den Gruppen unterscheiden. So unterscheiden sich das beamer- und das tabletgestützte Assistenzsystem in der Baugruppe B wie folgt vom Kontrollmedium (s. a. Tab. 4.5): Beamer in W1 (p = 0,010), W2 (p = 0,002), W3 (p = 0,007) und W4 (p = 0,012) und beim Tablet in W1 (p = 0,007), W2 (p = 0,001) und W3 (p = 0,014). Analog zur Baugruppe B unterscheiden sich auch in Baugruppe C (s. Tab. 4.6) das beamer- und das tabletgestützte Assistenzsystem von der papierbasierten Informationsbereitstellung (Beamer in W1 (p = 0,006) und Tablet in W1 (p = 0,029) und W2 (p = 0,014)). Hypothese zwei kann damit für das beamer- und das tabletgestützte Assistenzsystem angenommen werden.

Tab. 4.5 Mittelwertdifferenzen der Arbeitsausführungszeit von Baugruppe B im Vergleich zum Kontrollmedium je Wiederholung [Sekunden]

	W1	W2	W3	W4
Datenbrille	- 95,07	- 72,36	- 2,21	- 11,07
Beamer	- 259,71*	- 188,93*	- 139,93*	- 142,86*
Tablet	- 267,79*	- 191,86*	- 129,14*	- 100,93
** Die Mittelwertdifferenz ist signifikant p < 0,05*				

Tab. 4.6 Mittelwertdifferenzen der Arbeitsausführungszeit von Baugruppe C im Vergleich zum Kontrollmedium je Wiederholung [Sekunden]

	W1	W2	W3	W4
Datenbrille	- 108,50	- 34,21	1,36	- 9,714
Beamer	- 288,43*	- 125,07	- 61,00	- 97,00
Tablet	- 242,79*	- 160,21*	- 61,07	- 46,00
** Die Mittelwertdifferenz ist signifikant p < 0,05*				

Neben den signifikanten Unterschieden zwischen dem Kontrollmedium und den eingesetzten informatorischen Assistenzsystemen können auch welche zwischen den Assistenzsystemen ausgemacht werden. Diesbezüglich zeigt sich im Vergleich zwischen den Assistenzsystemen, dass die Ausführungszeiten mit der Datenbrille in Baugruppe B in den Durchgängen W3 (Beamer p = 0,008 und Tablet p = 0,017) und W4

(Beamer p = 0,025) signifikant langsamer sind. Ein Einfluss des datenbrillengestützten Assistenzsystems auf die Anlernzeit kann demnach nicht nachgewiesen werden, wenngleich diese geringfügig kürzer sind als die des Kontrollmediums.

Mit Blick auf die erste bzw. erstmalige Ausführungszeit einer Baugruppe (Hypothese drei), z. B. im Rahmen einer Individualmontage, ist bereits aus Tab. 4.7 ersichtlich, dass die Zeiten zwischen den Unterstützungssystemen voneinander abweichen. Dieser Eindruck kann durch einen signifikanten Haupteffekt zwischen den Unterstützungssystemen auf Basis der Ausführungszeit unabhängig von der Baugruppe bestätigt werden ($F(3, 52) = 5{,}76$, $p = 0{,}002$, $\eta^2_p = 0{,}25$). Paarweise Vergleiche der Ausgabemedien belegen zudem signifikante Unterschiede zwischen dem papierbasierten Kontrollmedium und dem projektions- und tabletbasierten Assistenzsystem (Beamer p = 0,006 und Tablet p = 0,010). Hypothese drei kann somit für das beamer- und tabletgestützte Assistenzsystem verifiziert werden. Für das datenbrillengestützte Assistenzsystem haben sich hingegen keine nennenswerten Unterschiede ergeben (s. Tab. 4.7).

Tab. 4.7 Mittelwertdifferenzen der ersten Arbeitsausführungszeit über alle Baugruppen [Sekunden]

	Papier	Datenbrille	Beamer	Tablet
Papier		70,64	219,24*	209,33*
Datenbrille	- 70,64		148,60	138,69
Beamer	- 219,24*	- 148,60		- 9,90
Tablet	- 209,33*	- 138,69	9,90	
** Die Mittelwertdifferenz ist signifikant p < 0,05*				

4.7.2 Untersuchungen zu den Montage- und Kommissionierfehlern

Die durchschnittliche Anzahl an Fehlern über alle Baugruppen und Wiederholungen ist in Abb. 4.8 dargestellt. Aus dieser geht hervor, dass sich die einzelnen Unterstützungssysteme nur geringfügig voneinander unterscheiden. Wenngleich mit den informatorischen Assistenzsystemen im Durchschnitt weniger Fehler auftreten als bei der Verwendung des Kontrollmediums, verzeichnen alle Systeme größere Abweichung im Standardfehler. Statistisch besteht in dieser Hinsicht kein signifikanter Unterschied zwischen den untersuchten Systemen ($H(3) = 2{,}11$, $p = 0{,}550$). Hypothese vier muss

daher verworfen werden. Deskriptiv lassen sich dennoch Potenziale für den Einsatz eines informatischen Assistenzsystems feststellen. So können in der dargelegten experimentellen Untersuchung die Montagefehler mit der Datenbrille um 31 %, mit dem Beamer um 15 % und mit dem Tablet um 26 % gegenüber dem Kontrollmedium reduziert werden.

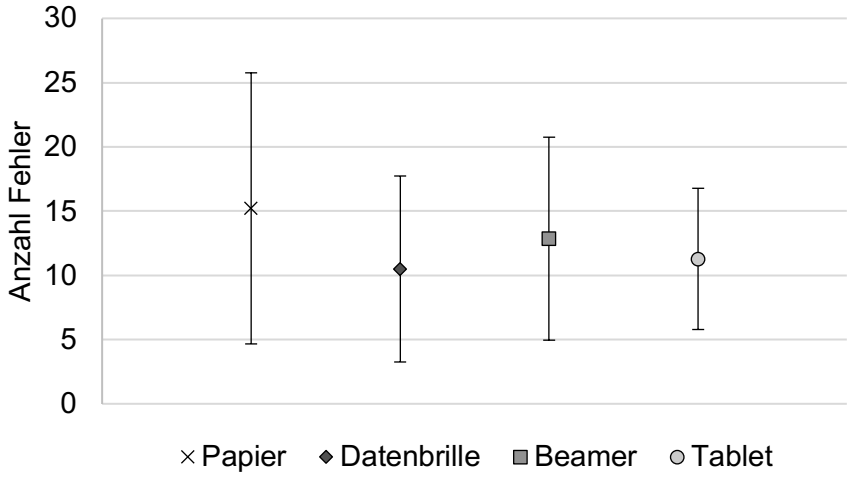


Abb. 4.8 Montagefehler über alle Baugruppen und Wiederholungen

Die postulierte Reduktion von Kommissionierfehlern durch den Einsatz von informatorischen Assistenzsystemen im Vergleich zum Kontrollmedium lässt sich bereits deskriptiv aus Abb. 4.9 erkennen. Diesbezüglich zeigen alle drei Assistenzsysteme Potenziale zur Reduzierung von Fehlern gegenüber dem Kontrollmedium auf, wenn auch mit unterschiedlichem Ausmaß. Das weitaus beste Ergebnis erzielt dabei das beamergestützte Assistenzsystem, bei welchem die Fehlerquote im Vergleich zum Kontrollmedium um 75 % gesenkt werden konnte. Neben der geringen Fehlerrate zeichnet sich das System durch eine vergleichsweise geringe Streuung aus (s. Standardfehler Abb. 4.9). Ein in etwa gleich großes Potential zur Fehlerreduktion weist hingegen das datenbrillen- und tabletgestützte Assistenzsystem mit ca. 42 % auf (Datenbrille - 41 % und Tablet - 42 % gegenüber dem Kontrollmedium). Die aus Abb. 4.9 aufgezeigten Tendenzen lassen sich durch einen signifikanten Haupteffekt zwischen der Fehleranzahl und den verwendeten Unterstützungssystemen bestätigen ($H(3) = 16{,}86$, $p < 0{,}001$, $r = 0{,}54$). Paarweise Vergleiche bestätigen darüber hinaus einen statischen Unterschied zwischen der Kontrollgruppe und der Gruppe mit dem beamergestützten Assistenzsystem ($z = 4{,}08$, $p < 0{,}001$, $r = 0{,}77$). Die fünfte Hypothese kann folglich nur für das beamergestützte Assistenzsystem belegt werden.

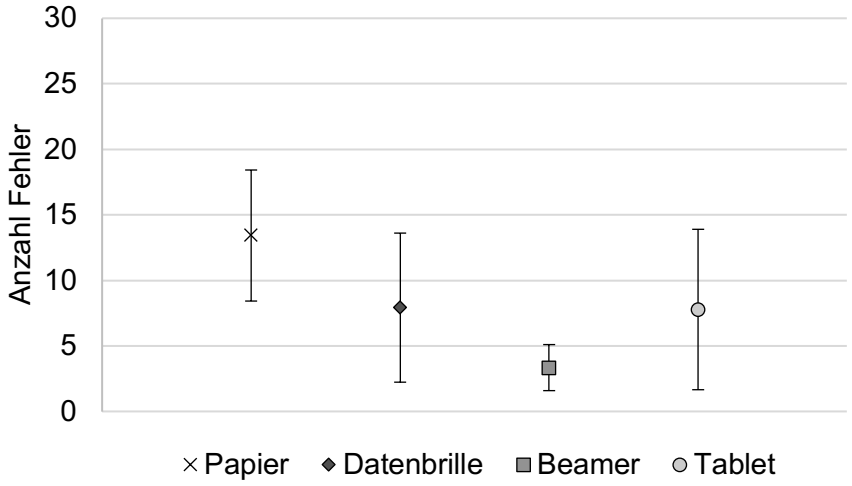


Abb. 4.9 Kommissionierfehler über alle Baugruppen und Wiederholungen

4.7.3 Untersuchungen zur Arbeitsperson

Mit der sechsten Hypothese wird der Einfluss von informatorischen Assistenzsystemen auf die mentale Beanspruchung der Versuchspersonen im Vergleich zum Kontrollmedium untersucht. Wie in Abschn. 4.3.2 beschrieben, wurden dazu die sechs Dimensionen des NASA-TLX-Fragebogens für jede Wiederholung einer Baugruppe erfasst. Für die Bewertung bzw. Beurteilung der mentalen Beanspruchung zwischen den untersuchten Unterstützungssystemen wird der NASA-TLX-Gesamtscore verwendet, der sich aus den Mittelwerten der sechs Einzeldimensionen berechnet. Die in Abb. 4.10 dargestellten Ergebnisse des Scores deuten darauf hin, dass der Einsatz von informatorischen Assistenzsystemen zu ähnlichen Ergebnissen bzw. Beanspruchungen führt wie der des eingesetzten Kontrollmediums. Eine inferenzstatistische Analyse der Daten konnte diese deskriptive Einschätzung nicht widerlegen, weshalb Hypothese sechs abzulehnen ist (Baugruppe A ($H(3) = 3{,}95$, $p = 0{,}267$, Baugruppe B ($H(3) = 3{,}69$, $p = 0{,}297$ und Baugruppe C ($H(3) = 2{,}75$, $p = 0{,}431$). Gleichwohl zeigen die Ergebnisse, dass der Einsatz von informatischen Assistenzsystemen zu keiner signifikanten Mehrbelastung der Teilnehmenden geführt hat, bei gleichzeitiger Steigerung ihrer Arbeitsleistung. Die empfundene Beanspruchung variierte dabei im Mittel über alle drei Baugruppen zwischen einer niedrigen und einer hohen Beanspruchung. Über die Baugruppen hinweg ähnelt der Beanspruchungsverlauf innerhalb einer Baugruppe dem einer Lernkurve (s. Abb. 4.10). Tendenziell nimmt damit die Beanspruchung während des Anlernprozesses von Wiederholung zu Wiederholung ab.

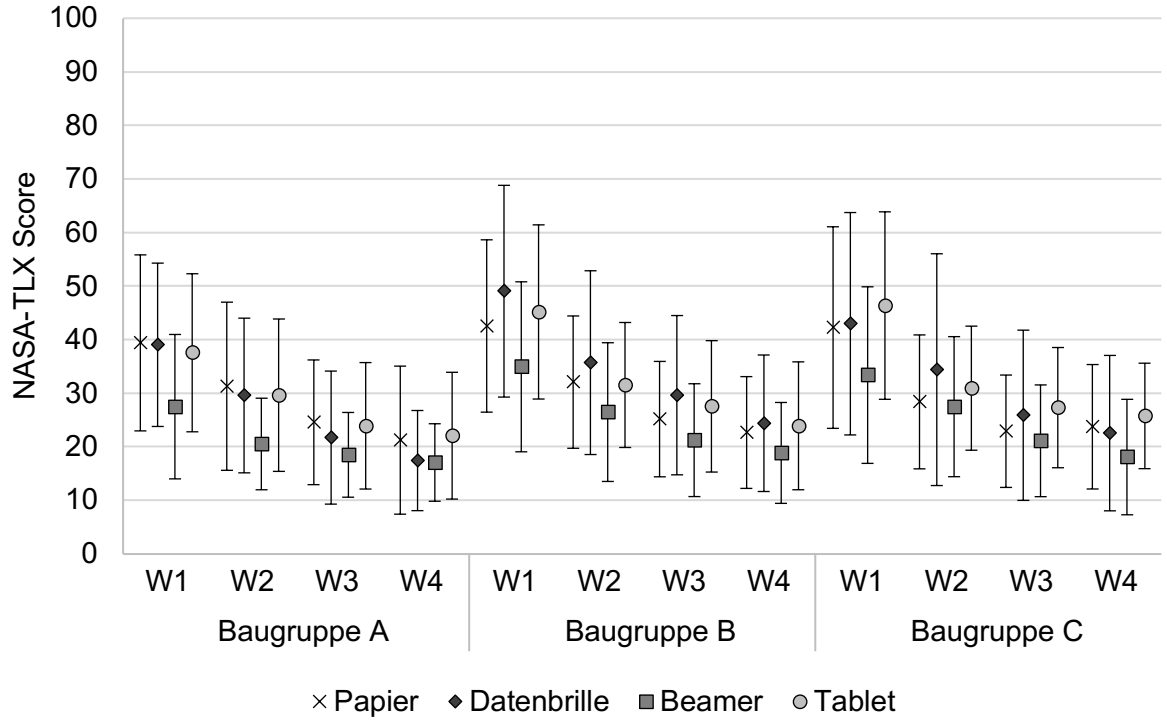


Abb. 4.10 Mittlerer NASA-TLX Gesamtscore für jede Wiederholung der drei Baugruppen

Weiterhin ist aus den Beanspruchungsverläufen der einzelnen Assistenzsysteme ersichtlich (s. Abb. 4.10), dass die geringste durchschnittliche Beanspruchung beim Einsatz des beamergestützten Assistenzsystems auftritt. Für das tablet- und datenbrillengestützte Assistenzsystem ergibt sich hingegen eine höhere Beanspruchung im Vergleich zum Kontrollmedium Papier. Dies gilt insbesondere für die Baugruppen B und C, wenngleich der zu verzeichnende Anstieg minimal ist. Ein abschließender paarweiser Vergleich der Mittelwerte bestätigt diese Befunde (s. Tab. 4.8).

Tab. 4.8 Mittelwertdifferenzen der mentalen Beanspruchung im Vergleich zum Kontrollmedium je Baugruppe und gesamt

	Baugruppe A	Baugruppe B	Baugruppe C	Gesamt
Datenbrille	- 2,19	4,08	2,13	1,34
Beamer	- 8,23	- 5,24	- 4,30	- 5,92
Tablet	- 0,86	1,43	3,27	1,28

4.8 Interpretation und kritische Würdigung der Ergebnisse

Die vorgestellten Befunde belegen vor allem für das beamer- und tabletgestützte Assistenzsystem signifikante Unterschiede zum Kontrollmedium hinsichtlich einzelner Untersuchungsaspekte bzw. Hypothesen (s. Tab. 4.9). Für das datenbrillengestützte Assistenzsystem ergeben sich hingegen keine statistisch relevanten Unterschiede im Rahmen der empirischen Untersuchung. Aufgestellte Hypothesen können somit nur für einzelne Assistenzsystemtypen, nicht aber über alle Assistenzsysteme bestätigt werden. Diese Tatsache kann zum einen an der hohen inhaltlichen Qualität der papierbasierten Montageinstruktion liegen, welche die Vorteile der informatorischen Assistenzsysteme nicht in vollem Umfang zur Geltung kommen lässt. Zum anderen kann das Ergebnis auch auf das gewählte Versuchsdesign – wie z. B. Stichprobengröße, Versuchsdauer, Montageaufgabe, Hardware der Assistenzsysteme – zurückzuführen sein.

Tab. 4.9 Zusammenfassung der empirischen Untersuchungsergebnisse

	Untersuchungs-schwerpunkt	Datenbrille	Beamer	Tablet
Untersuchungen zur Anlern- und Ausführungszeit				
Hypothese 1	Ausführungszeit [1]	×	✓	(✓)
Hypothese 2	Anlernzeit [1]	×	✓	✓
Hypothese 3	Erstmalige Ausführungszeit [2]	×	✓	✓
Untersuchungen zu den Montage- und Kommissionierfehlern				
Hypothese 4	Montagefehler [2]	×	×	×
Hypothese 5	Kommissionierfehler [2]	×	✓	×
Untersuchungen zur Arbeitsperson				
Hypothese 6	Mentale Beanspruchung [2]	×	×	×

[1] Abhängig von der Komplexität der Baugruppe
[2] Unabhängig von der Komplexität bzw. Baugruppe

✓ *Hypothese bestätigt*
(✓) *Hypothese teilweise bestätigt*
× *Hypothese nicht bestätigt*

Im Hinblick auf die Hypothesen eins bis drei zeigt sich, dass informatorische Assistenzsysteme einen Beitrag zur Verkürzung der Anlern- und Ausführungszeit leisten können.

Am stärksten lassen sich diese durch den Einsatz des beamer- und tabletgestützten Assistenzsystems reduzieren. Bestätigt wird dies durch signifikante Unterschiede zum Kontrollmedium Papier in allen drei Hypothesen mit der Ausnahme des tabletgestützten Assistenzsystems, welches die erste Hypothese nur teilweise erfüllt (s. Tab. 4.9). Beide Ausgabemedien weisen damit angesichts des Paradigmenwechsels in der manuellen Montage ein großes Einsatzpotenzial auf. So zeigen auf der einen Seite die Ergebnisse der Hypothesen eins und zwei, dass das Einsatzpotenzial zur Reduzierung der Ausführungs- und Anlernzeit mit der Zunahme der Aufgabenkomplexität steigt. Auf der anderen Seite belegt Hypothese drei, dass die erstmalige Ausführungszeit, z. B. im Rahmen einer Individualmontage mit der Losgröße eins, signifikant schneller ist als mit dem verwendeten Kontrollmedium Papier. Die Ergebnisse sind vermutlich darauf zurückzuführen, dass durch die zentrale Informationsbereitstellung – Beamer projiziert die Informationen auf die Arbeitsfläche sowie auf relevante Positionen im Arbeitssystem und das Tablet stellt die Informationen auf Augenhöhe zur Verfügung – die Informationsaufnahme wesentlich einfacher und schneller erfolgen kann als bei der papierbasierten Montageanweisung. Hierdurch können Informationsverarbeitungsprozesse für den Beschäftigten gänzlich entfallen bzw. erleichtert werden, z. B. durch die Visualisierung der jeweiligen Behälterpositionen im Arbeitssystem. Gleichermaßen müssen wichtige Informationen nicht unbedingt im Gedächtnis behalten werden, da sie jederzeit im Arbeitsbereich sichtbar sind. Demgegenüber wurde bei den papierbasierten Anweisungen beobachtet, dass diese nach der Informationsaufnahme schnell beiseitegelegt wurden, um mit der Montage zu beginnen.

Von den bisherigen Ergebnissen und Interpretationen der Hypothesen eins bis drei ausgenommen ist das datenbrillengestützte Assistenzsystem, welches lediglich deskriptive Unterschiede zum Kontrollmedium aufweist (s. Tab. 4.9). Diese Unterschiede treten vor allem in den ersten Wiederholungen auf, bis sie auf das Niveau des Kontrollmediums abfallen bzw. sogar schlechter sind als dieses. Mögliche Ursachen für das schlechte Abschneiden des Assistenzsystems können zum einen in der ungewohnten Informationsvermittlung liegen und zum anderen in der Tatsache, dass während der Montage immer wieder zwischen nah und fern akkommodiert werden muss.

Die Untersuchungen zu den aufgetretenen Montagefehlern – Hypothese vier – haben gezeigt, dass sich die informatorischen Assistenzsysteme nicht signifikant von dem Kontrollmedium unterscheiden. Gleichwohl ergeben sich Potenziale für den Einsatz dieser Systeme. Montagefehler konnten diesbezüglich über alle Assistenzsysteme um

durchschnittlich 3,66 Fehler je Versuchsdurchführung im Vergleich zum Kontrollmedium reduziert werden. Die größten Potenziale haben sich dabei für das datenbrillen- und tabletgestützte Assistenzsystem ergeben – Datenbrille – 31 % und Tablet – 26 % im Vergleich zur papierbasierten Anweisung. Ein möglicher Grund für dieses Ergebnis könnte sein, dass die Montageinformationen zentral auf einem Bildschirm zur Verfügung gestellt werden, wodurch sie während der Montage schnell einsehbar sind, um beispielsweise den Montageprozess abzugleichen. Im Unterschied dazu sind die Informationen des beamergestützten Assistenzsystems – 15 % weniger Montagefehler – über das gesamte Arbeitssystem verteilt, woraus sich schnell Flüchtigkeitsfehler ergeben können. Die papiergebundene Anweisung ist hingegen, wie bereits zuvor angeführt, ortsunabhängig im Arbeitssystem, weshalb Informationen nicht so oft verglichen werden, da sie schnell aus dem Blickfeld des Beschäftigten rücken.

Die prognostizierte Abnahme von Kommissionierfehlern im Vergleich zum Kontrollmedium – Hypothese fünf – konnte für das beamergestützte Assistenzsystemen mit einem signifikanten Ergebnis bestätigt werden – 75 % weniger Kommissionierfehler. Dieses Resultat lässt sich vermutlich darauf zurückführen, dass die Behälterposition im Kontrollmedium nicht visuell dargestellt wurde, sondern nur durch eine Stückliste ausgegeben worden ist. Gestützt wird diese These durch die Tatsache, dass auch alle anderen Assistenzsysteme zu einer deutlichen Reduzierung der Kommissionierfehler – im Durchschnitt 42 % weniger Fehler – beitragen.

Die bisherigen Ergebnisse und Interpretationen legen nahe, dass informatorische Assistenzsysteme einen Beitrag dazu leisten können, Informationen bedarfsgerechter und wirtschaftlicher aufzubereiten. Es bleibt jedoch zu klären, welchen konkreten Beitrag diese Systeme zur Steigerung der Arbeitsproduktivität leisten können. Um diese Frage zu beantworten, wurde die Arbeitsproduktivität auf der Grundlage der generierten Ausführungszeiten für alle Baugruppen und Unterstützungssysteme berechnet, unter der Annahme, dass alle Baugruppen fehlerfrei montiert worden sind (s. Abb. 4.11). Die resultierenden Ergebnisse zeigen, dass alle informatorischen Assistenzsysteme Potenzial zur Steigerung der Arbeitsproduktivität aufweisen. Am deutlichsten hebt sich hierbei das beamer- und tabletgestützte Assistenzsystem von der papiergestützten Informationsbereitstellung ab (s. Abb. 4.11). Bei der Planung von produktivitätssteigernden Maßnahmen sollten demnach nicht nur klassische arbeitsgestalterische Maßnahmen berücksichtigt werden, sondern auch innovative Montageassistenzsysteme, die den Beschäftigten bei der jeweiligen Aufgabe unterstützen.

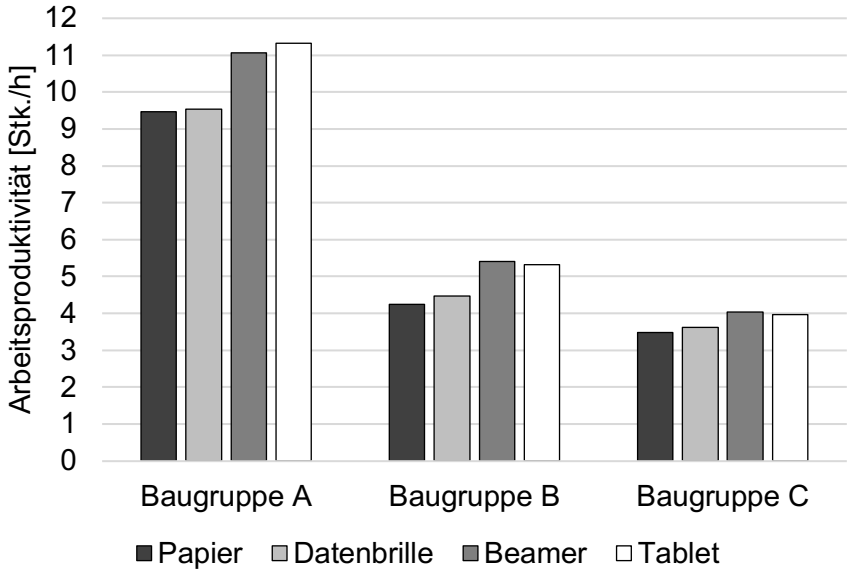


Abb. 4.11 Arbeitsproduktivität für die drei Baugruppen der empirischen Untersuchung

Die erzielten Produktivitätssteigerungen konnten dabei ohne eine signifikante Mehrbeanspruchung der Versuchspersonen erreicht werden. Andererseits lässt sich auch die in Hypothese sechs prognostizierte Abnahme der Beanspruchung nicht bestätigen. Die im Verlauf des Versuchs erhobenen Beanspruchungen sind bei allen eingesetzten Unterstützungssystemen weitestgehend konstant – im Mittel zwischen einer niedrigen und einer hohen Beanspruchung im Verlauf der Bearbeitung –, wenngleich sich für das beamergestützte Assistenzsystem tendenziell Potenziale zur Reduzierung der Beanspruchung zeigen. Eine mögliche Erklärung für das Ergebnis ist, dass bei der Bewertung der Beanspruchung die Bewältigung der Montageaufgabe im Fokus des Betrachters stand, wodurch die Beurteilung der Systeme in direktem Zusammenhang mit dem persönlichen Beanspruchungsempfinden einer Person steht.

In Summe zeigen die Ergebnisse, dass informatorische Assistenzsysteme einen entscheidenden Beitrag zur Steigerung der Arbeitsproduktivität in der manuellen Montage leisten, ohne die Beschäftigten mental stärker zu beanspruchen. Weiterhin ergeben sich aus den Rahmenbedingungen der experimentellen Untersuchung unterschiedliche Einsatzpotenziale in Abhängigkeit von den untersuchten Variablen bzw. Hypothesen. So eignet sich das tabletgestützte Assistenzsystem einerseits zur Verkürzung der Anlernzeiten, andererseits aber auch für die Montage von kleinen Losgrößen – Individualmontage. Im Unterschied dazu trägt das beamergestützte Assistenzsystem darüber hinaus zu weniger Kommissionierfehlern und kürzeren Ausführungszeiten bei. Die

beiden Beispiele veranschaulichen, dass bei der Planung bzw. Auswahl eines informatorischen Assistenzsystems die jeweilige Problemstellung in der Montage bzw. die zu beeinflussende Zielgröße zu berücksichtigen ist. Um diesbezüglich eine Orientierungshilfe hinsichtlich entscheidender Bezugsgrößen im Kontext des Paradigmenwechsels in der Montage bereitzustellen, wurden auf Basis der Studienergebnisse Empfehlungen für den Einsatz der untersuchten Montageassistenzsysteme abgeleitet (s. Tab. 4.10). An dieser Stelle sei angemerkt, dass sich die Empfehlungen auf einen Einzelarbeitsplatz bzw. auf eine Steh-Geh-Linie beziehen und für andere Formen der Montageorganisation durchaus anders ausfallen können. Es sollte auch nicht außer Acht gelassen werden, dass sich einzelne Ausgabegeräte, wie z. B. die Datenbrille, durchaus dynamisch weiterentwickeln und sich die Beurteilungen daher im Laufe der Zeit schnell verändern können. Ebenso könnten die Ergebnisse für die Datenbrille bei einem Versuchsdesign mit einer ortsunabhängigen Montageaufgabe aufgrund der hohen Mobilität des Systems gänzlich anders ausfallen.

Tab. 4.10 Empfehlungen für den Einsatz von informatorischen Assistenzsystemen auf Basis der Studienergebnisse

	Datenbrille	Beamer	Tablet
Ausführungszeit	●○○	●●●	●●○
Anlernen	●○○	●●●	●●●
Individualmontage	●○○	●●●	●●●
Montagefehler	●●○	●○○	●●○
Kommissionierfehler	●●○	●●●	●●○
Beanspruchung	○○○	●○○	○○○

●●● *Sehr hilfreich*
●●○ *Hilfreich*
●○○ *Wenig hilfreich*
○○○ *Nicht hilfreich*

5. Prognosemodell zum Einsatz von Montageassistenzsystemen

Das vorliegende Kapitel beruht auf folgenden Vorveröffentlichungen:

- Bendzioch, S., Hinrichsen, S., & Bornewasser, M. (2020). Validierung eines Instruments zur Ermittlung der Einsatzpotenziale von informatorischen Montageassistenzsystemen. In Gesellschaft für Arbeitswissenschaft (Hrsg.), Digitaler Wandel, digitale Arbeit, digitaler Mensch?: Bericht zum 66. Frühjahrskongress der Gesellschaft für Arbeitswissenschaft e. V. (GfA) vom 16.03.- 18.03.2020 in Berlin (B.18.4). GfA-Press.
- Bendzioch, S., Hinrichsen, S., Adrian, B., & Bornewasser, M. (2020). Method for Measuring the Application Potential of Assembly Assistance Systems. In I. L. Nunes (Hrsg.), Advances in Human Factors and Systems Interaction: Proceedings of the AHFE 2019 International Conference on Human Factors and Systems Interaction, July 24-28, 2019, Washington D.C., USA (S. 3-11). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-20040-4_1
- Bendzioch, S., Bornewasser, M., Hinrichsen, S., & Adrian, B. (2019). Messung der informatorischen Komplexität zur Abschätzung der Einsatzpotenziale von Montageassistenzsystemen. In Gesellschaft für Arbeitswissenschaft e. V. (Hrsg.), Arbeit interdisziplinär analysieren - bewerten - gestalten: Bericht zum 65. Frühjahrskongress der Gesellschaft für Arbeitswissenschaft e. V. (GfA) vom 27.02.- 01.03.2019 in Dresden (C.9.1). GfA-Press.
- Bendzioch, S., Hinrichsen, S., Adrian, B., & Bornewasser, M. (2018). Assessing the Economic and Human-Centered Potential of Assembly Assistance Systems. In F. J. Villmer & E. Padoano (Hrsg.), Production Engineering and Management: Proceedings 8th International Conference. Oktober 04 - 05, 2018 in Lemgo, Germany (S. 127-136). Hochschule Ostwestfalen-Lippe.

5.1 Ziel und Methodik

Für den wirtschaftlichen und bedarfsgerechten Einsatz eines informatorischen Assistenzsystems ist es entscheidend, die Einsatzpotenziale in bestehenden Arbeitssystemen zu ermitteln, um Fehlinvestitionen und psychische Folgen bei den Beschäftigten, wie Antriebslosigkeit oder mangelnde Motivation, zu vermeiden sowie unternehmerische Erwartungshaltungen zu erfüllen (Hold et al., 2017; Keller et al., 2021). Bestehende Ansätze zur Identifizierung von geeigneten Montagesystemen gestalten sich in ihrer Anwendung ausgesprochen zeit-, kosten- und personalintensiv und wenig personenzentriert (vgl. Abschn. 3.2). Vor diesem Hintergrund wird in diesem Kapitel ein Fragebogen zur Ermittlung der Einsatzpotenziale von informatorischen Montageassistenzsystemen namens CORAA (Complexity Rating for Assembly Assistance) vorgestellt. Dieser basiert auf der Messung der subjektiv wahrgenommenen informatorischen

Komplexität des Beschäftigten in einem manuellen Arbeitssystem. Im Ergebnis wird sowohl die Ermittlung einer zentralen Kennzahl als auch die Ermittlung von Teilkennzahlen zu den einzelnen Konstrukten des Fragebogens angestrebt. Mit der aggregierten Kennzahl soll schließlich eine Aussage darüber getroffen werden können, ob die Einführung eines informatorischen Montageassistenzsystems in dem jeweils betrachteten Arbeitssystem sinnvoll ist. Demgegenüber soll die Teilkennzahl darüber Auskunft geben, in welchem spezifischen Kontext die Unterstützungsleistung benötigt wird.

Das Vorgehen bei der Fragebogenentwicklung gleicht einem iterativen Prozess, so dass ein erster Fragebogenentwurf, der auf einer deduktiven Konstruktionsmethode beruhte – Ableitung aus einer Theorie bzw. festgelegten Konstrukten –, empirisch nicht bestätigt werden konnte (Bendzioch et al., 2018; 2019; 2020b). Darauf Bezug nehmend wird im Rahmen eines zweiten Ansatzes auf Basis einer qualitativen Literaturrecherche ein Itempool generiert, der mit Hilfe einer explorativen Faktorenanalyse – induktive Konstruktionsmethode, z. B. Bühner (2011a) – auf latente Variablen bzw. Konstrukte überprüft wird. Nachstehend wird diesbezüglich ausschließlich auf den zweiten Ansatz eingegangen, aus welchem auch der oben genannte CORAA-Fragebogen hervorgeht. Um den späteren Einsatz in der betrieblichen Praxis theoretisch und empirisch zu begründen, wird der Fragebogen abschließend im Hinblick auf die drei wichtigsten Gütekriterien bei der Fragebogenentwicklung – Objektivität, Reliabilität und Validität, z. B. Bühner (2011a) – validiert.

5.2 Fragebogen- und Itemkonstruktion

5.2.1 Definition des zu erfassenden Konstrukts

Der Einsatz von informatorischen Assistenzsystemen erfolgt im Wesentlichen, um die Auswirkungen des Paradigmenwechsels in der manuellen Montage zu kompensieren (s. Abschn. 2.1.4). Ursächlich hierfür ist vor allem die Zunahme an Informationsverarbeitungsprozessen infolge der steigenden Komplexität in einem Arbeitssystem (Alkan et al., 2016; Bornewasser, 2020; Schenk et al., 2016). Ausgangspunkt für die Entwicklung des Fragebogens bildet damit die Annahme, dass ein informatorisches Assistenzsystem nur dann erforderlich ist, wenn eine hinreichend hohe Komplexität im Arbeitssystem vorliegt. Diese Annahme kann bereits durch die Ergebnisse der empirischen Untersuchung aus Abschn. 4.7.1 bestätigt werden (s. Hypothese eins und zwei). Demnach steigt das Einsatzpotential der Systeme mit der Zunahme der Aufgabenkomplexität. In Anlehnung an die Definition von Klabunde (2003) bedeutet dies: Je mehr

Varianten, Relationen und Dynamiken ein System aufweist, desto höher ist die Art und Anzahl der möglichen Systemzustände und damit auch der Grad der Komplexität, der vom Beschäftigten kognitiv verarbeitet werden muss. Um das Einsatzpotenzial für ein informatorisches Assistenzsystem dahingehend zu ermitteln, liegt es nahe, die Auswirkungen der Komplexität auf den Beschäftigten in einem Arbeitssystem zu messen. Im Mittelpunkt des Fragebogens steht insofern die subjektiv wahrgenommene informatorische Komplexität des Beschäftigten. Voraussetzung für die Messung ist, dass die Komplexitätstreiber bzw. -auslöser in der manuellen Montage identifiziert und die daraus resultierenden Einflussgrößen auf die Arbeitsperson mit Hilfe des Fragebogens messbar gemacht werden. Diese Auswirkungen sind subjektiver Natur, so dass eine objektive Messung, z. B. anhand der Aufgabenkomplexität, nicht den gewünschten Einfluss auf die Arbeitsperson widerspiegeln würde und begründet somit die Entwicklung des hier vorgestellten Fragebogens.

5.2.2 Bestimmung der relevanten Einflussgrößen

Für die Entwicklung des Fragebogens ist es, wie in Abschn. 5.2.1 beschrieben, entscheidend, die Komplexitätstreiber in der manuellen Montage zu identifizieren. Zu diesem Zweck wurde eine qualitative Literaturrecherche nach Mayring (2000) durchgeführt, die es ermöglicht, Texte oder Daten nach einem vorgegebenen Selektionskriterium in Kategorien zusammenzufassen. Dabei wurden sowohl Veröffentlichungen gesichtet, die Arbeitsanalysemethoden zur Komplexitätsmessung in der Montage enthalten, als auch Veröffentlichungen, die sich mit Komplexitätstreibern in der manuellen Montage beschäftigen. Die Literaturrecherche erhebt dabei keinen Anspruch auf Vollständigkeit, vielmehr sollte sie einen Querschnitt der Komplexitätstreiber aufzeigen. An dieser Stelle sei nochmals darauf hingewiesen (s. a. Abschn. 3.2), dass die bestehenden Methoden zur Komplexitätsmessung u. a. darauf abzielen, die Produkt- oder Prozesskomplexität zu ermitteln, nicht aber den möglichen Einsatz von Montageassistenzsystemen zu bewerten. Im Ergebnis wurden 24 Publikationen berücksichtigt, die mit Hilfe des definierten Selektionskriteriums Komplexitätstreiber in der manuellen Montage systematisch durchsucht worden sind. Ausschlaggebend war dabei, dass die Publikationen konkrete Auslöser für Komplexität in einem Arbeitssystem benennen bzw. berücksichtigen. So wurden im Rahmen dieses Prozesses neun Publikationen von der weiteren Analyse ausgeschlossen, da sie das vorgegebene Selektionskriterium nicht enthielten bzw. sich auf bereits berücksichtigte Publikationen bezogen. Durch die Generalisierung und Reduktion entscheidender Textpassagen der verbleibenden 15

Publikationen konnten schließlich vier Kategorien von Komplexitätstreibern in der manuellen Montage identifiziert werden: (1) Montageobjekt, (2) Montageprozess, (3) Arbeitsmittel und (4) Arbeitsplan (s. Tab. 5.1).

Tab. 5.1 Kategorien von Komplexitätstreibern in der manuellen Montage (Bendzioch et al., 2020e, modifiziert)

	Montage-objekt	Montage-prozess	Arbeitsmittel	Arbeitsplan
Zhu et al. (2008)	●	●	●	○
Zeltzer et al. (2012)	●	●	●	○
ElMaraghy und Urbanic (2003; 2004)	●	●	●	●
Falck et al. (2012; 2014; 2015; 2017); Falck und Rosenqvist (2012)	●	●	●	●
Fast-Berglund et al. (2013)	●	○	○	●
Asadi et al. (2016)	●	●	●	○
Schuh et al. (2015)	●	●	○	○
Mattsson et al. (2011; 2012; 2014)	●	●	●	●
● *berücksichtigt;* ○ *nicht berücksichtigt*				

Diesen vier übergeordneten Kategorien von Komplexitätstreibern sind wiederum jeweils weitere Komplexitätstreiber im Sinne von Unterkategorien zugeordnet (s. Tab. 5.2). So erhöht beispielsweise die Produkt- und Teilevielfalt die Komplexität des Montageobjekts und des Montageprozesses. Durch eine solche Zunahme muss der Beschäftigte in der Montage mehr und mehr Informationen aufnehmen und bewusst verarbeiten, um zwischen den verschiedenen Handlungsalternativen eine Entscheidung treffen zu können (s. Abschn. 2.1.4 und 2.2.2). Somit steigt mit jeder Erhöhung der Komplexität, sei es durch das Montageobjekt, den Montageprozess, die Arbeitsmittel oder den Arbeitsplan, auch die wahrgenommene informatorische Komplexität des Beschäftigten im Arbeitssystem. Im Hinblick auf die Entwicklung des Fragebogens lassen sich in diesem Zusammenhang auf Basis der qualitativen Literaturrecherche 39 Komplexitätstreiber in der manuellen Montage benennen, die bei der Erstellung des Itempools zu berücksichtigen sind.

Tab. 5.2 Identifizierte Komplexitätstreiber in der manuellen Montage

	Komplexitätstreiber
Montageobjekt	Produktvarianten; Produkt- und Teilevielfalt; Technologievielfalt in den Produkten; Häufigkeit von Produkt- und Teileänderungen; Ähnlichkeit zwischen Varianten und Bauteilen; Produktdesign
Montageprozess	Anzahl an Arbeitsmethoden und -positionen; uneindeutige Montagepositionen; unterschiedliche Anpassungsaufwände zwischen den Produkten/ Bauteilen; Genauigkeits- und Präzisionsanforderungen; fehlende Rückmeldung über ordnungsgemäße durchgeführte Arbeiten; Anzahl der Aufgaben; inhaltliche Prozessvielfalt; zeitaufwändige Arbeiten; Produktionsvolumen; Fertigungsorganisation, Qualitätssicherung, festgelegt Montagesequenzen
Arbeitsmittel	Anzahl der Maschinen; Anzahl der Werkzeuge; Anzahl der Vorrichtung; Anzahl an verschiedenen Behältern; Art der Teilebereitstellung; Distanz zu Materialien; Art der Arbeitsmittelbereitstellung; Arbeitsplatzgestaltung; Anzahl an Programmen
Arbeitsplan	Art der Informationsbereitstellung; Anzahl der Arbeitsanweisungen; Menge und Inhalt an Informationen; uneindeutige und veraltete Montageinformationen

5.2.3 Generierung des initialen Itempools

In dem Abschn. 5.2.1 wurden verschiedene Treiber bzw. Auslöser für Komplexität in einem manuellen Montagesystem vorgestellt, die es nun in Fragen bzw. Items abzubilden gilt. Bei der Generierung eines solchen Itempools sind eine Reihe an Entscheidungen hinsichtlich der formalen Ausgestaltung zu treffen. Dazu gehört die Bestimmung der zu befragenden Zielgruppe ebenso wie die Festlegung des Itemformats, des Antwortformats und die Polung der Items (z. B. Bühner, 2011a). Die Bestimmung der Zielgruppe erlangt dabei einen wichtigen Stellenwert, da sie sich auf die Gestaltung des Fragebogens auswirkt. So beeinflussen beispielsweise die Bildung und die Sprachkenntnisse der Zielgruppe das Format und die Formulierung der Items (Bühner, 2011a). Wie bereits in der Zielsetzung erwähnt, soll der Fragebogen von den Beschäftigten in der manuellen Montage ausgefüllt werden, das heißt, es werden unmittelbar die Personen befragt, die der Komplexität in einem Montagesystem ausgesetzt sind. Fragen können damit auf bestimmte Situationen oder Arbeitsabläufe abzielen, sollten aber auch den Sprachgebrauch der Personengruppe berücksichtigen. Ein technisches Grundverständnis kann dabei vorausgesetzt werden, wobei spezielle oder nicht gebräuchliche Fachbegriffe vermieden werden sollten.

Hinsichtlich der Form der Frage – Itemformat – ist ein gebundenes bzw. geschlossenes Antwortformat – Festgelegte Antwortmöglichkeiten – gewählt worden. Von einem offenen oder halboffenen Format – freie Beantwortung der Fragen – wurde abgesehen, um die Bandbreite der Antworten in einem definierten Rahmen zu kategorisieren und gleichzeitig vergleichbar zu machen (s. z. B. Bortz & Döring, 2006; Hollenberg, 2016). Die Anzahl der Abstufungen im Antwortformat hängt nach Bühner (2011a) zum einen davon ab, wie kleinschrittig ein Merkmal zu differenzieren ist und zum anderen davon, wie genau eine Person das Merkmal differenzieren kann. Darauf Bezug nehmend wurde eine fünfstufige unipolare Likert-Skalierung bzw. verbale Ratingskala gewählt (s. Abb. 5.1). Neben der fünfstufigen Unterteilung von „Stimme gar nicht zu“ bis „Stimme voll zu“ steht auch die Kategorie „Weiß ich nicht“ zur Verfügung. Letztere soll dazu beitragen, dass eine Person nicht zu einer ungewollten Antwort genötigt bzw. gedrängt wird, wenn z. B. zu einem geschilderten Sachverhalt keine Aussage gemacht werden kann (vgl. Jonkisz et al., 2012). Auf eine unterschiedliche Polung bzw. Invertierung der Items wird im Sinne der Vermeidung von Flüchtigkeitsfehlern bei der Beantwortung der Fragen verzichtet. Daraus ergibt sich ein Wertebereich von null bis fünf, wobei fünf für „Stimme voll zu“ bis eins für „Stimme gar nicht zu“ steht, im Unterschied zur Antwort „Weiß ich nicht“, die mit null codiert ist.

Stimme gar nicht zu	Stimmer eher nicht zu	Stimme teilweise zu	Stimme eher zu	Stimme voll zu	Weiß ich nicht
☐	☐	☐	☐	☐	☐

Abb. 5.1 Festgelegtes Antwortformat des Fragebogens

Ausgehend von den oben genannten und festgelegten Randbedingungen der Fragebogengestaltung und den identifizierten Komplexitätstreibern aus Abschn. 5.2.1 wurde unter Berücksichtigung einschlägiger Regeln zur Itemformulierung ein initialer Itempool mit 40 Fragen erstellt. Zu den Regeln der Itemformulierung gehören z. B. keine doppelten Verneinungen verwenden, die Vermeidung von Begriffen mit mehreren Bedeutungen, keine Fremdwörter, keine langen und komplexen Fragen bzw. Satzkonstrukte zu nutzen (nähere Informationen z. B. Bühner, 2011a; Jonkisz et al., 2012; Porst, 2011). Eine Eingrenzung und Bewertung des initialen Itempools erfolgte sodann im Rahmen eines Expertenworkshops, an dem zwei Professoren aus den Forschungsbereichen Arbeitspsychologie und Industrial Engineering sowie fünf Industrievertreter aus

den Bereichen Produktionsleitung und Arbeitsvorbereitung teilnahmen, welche allesamt über umfangreiche Erfahrungen in der manuellen Montage verfügen. Das Vorgehen gleicht damit dem erfahrungsgeleiteten-intuitiven Ansatz (s. Bühner, 2011a), der darauf abzielt, auf Basis von Expertenwissen Indikatoren bzw. Items zu identifizieren, die das angestrebte Konstrukt – wahrgenommene informatorische Komplexität – messen. Als Ergebnis dieses Workshops konnte ein Itempool mit 26 Items finalisiert werden. Dieser stellt sich wie folgt dar (MO - Montageobjekt, MP - Montageprozess, AM - Arbeitsmittel und AP -Arbeitsplan):

MO1	Angesichts der Vielfalt an Bauteilen besteht die Gefahr, dass Bauteile falsch oder nicht verbaut werden.
MO2	Die Vielfalt an Produkten oder Teilen erhöht die Verwechslungsgefahr.
MO3	Es liegen so unterschiedliche Teile bereit, dass es schwer fällt zu erkennen, welches Teil zu welchem Produkt gehört.
MO4	Es gibt einige Bauteile, die sich in Aussehen oder Funktion ähneln und zur Verwechslungsgefahr führen.
MO5	Es werden mehrere Varianten eines Produkts montiert.
MP1	Arbeitsergebnisse sind nach umfangreichen Vorgaben zu kontrollieren (z. B. Sichtprüfung, Messung).
MP2	Unterbrechungen durch andere Aktivitäten beeinträchtigen die Konzentration auf die wesentlichen Informationen während der Montage (z. B. Dokumentation, Buchungen, Übertragung von Daten oder Messwerten).
MP3	Montageschritte müssen immer wieder mit der Konstruktionszeichnung/ Stückliste abgeglichen werden.
MP4	Es braucht Zeit, bis ein Montageprozess sicher beherrscht wird.
MP5	Die Montage erfordert immer wieder Neu- oder Umlernen.
MP6	Die Reihenfolge der Montageschritte muss eingehalten werden.
MP7	Es ist oft unklar, welches Bauteil als nächstes zu montieren ist.
MP8	Arbeitsinhalte sind von Änderungen geprägt (z. B. Änderung der Auftragsreihenfolge, Montage neuer Produktvarianten, Bereitstellen neuer Montageanweisungen).
MP9	Die Montage beinhaltet umfangreiche Arbeitsinhalte.
AM1	Montageanweisungen sind lückenhaft aufbereitet, so dass Zusatzinformationen besorgt werden müssen.
AM2	Die bereitgestellten Werkzeuge und/ oder Bauteile können verwechselt werden.
AM3	Die bereitgestellten Teilebehälter sind nicht eindeutig beschriftet.

AP1	Montageanweisungen sind lückenhaft aufbereitet, so dass Zusatzinformationen besorgt werden müssen.
AP2	Montageanweisungen weisen unnötige Information auf.
AP3	Zur Aufgabenerfüllung werden vielfältige Informationen benötigt.
AP4	Wichtige Informationen fallen nicht direkt ins Auge.
AP5	Montagerelevante Informationen müssen im Kopf behalten werden.
AP6	Die Suche nach erforderlichen Informationen führt zu Verzögerungen in der Montage.
AP7	Montageinformationen werden nicht zur richtigen Zeit bereitgestellt.
AP8	Fehlende oder nicht eindeutige Montageinformationen erfordern zeitaufwändige Abstimmungen mit den Kollegen.
AP9	Es fließen Informationen aus unterschiedlichen Quellen gleichzeitig auf einen ein.

Bevor der generierte Itempool an erste Probanden ausgegeben und erprobt werden kann, ist es notwendig, den Fragebogen in eine vorläufige Testversion zu überführen. Dazu muss die Reihenfolge der Items, die Instruktion in den Fragebogen sowie das Layout festgelegt werden (Jonkisz et al., 2012). Die Zuordnung bzw. Reihenfolge der generierten Items wird zunächst anhand der identifizierten Komplexitätstreiber – Montageobjekt, Montageprozess, Arbeitsmittel und Arbeitsplan – vorgenommen. Vor der Bearbeitung des Fragebogens erhalten die Befragten Informationen über den Hintergrund des Fragebogens sowie Hinweise zum Ausfüllen und zum Datenschutz. Daran anschließend werden die personenbezogenen Daten erhoben, ehe der eigentliche Fragebogen ausgefüllt wird. Zu den personenbezogenen Daten gehören die folgenden Angaben: Alter, Geschlecht, Betriebszugehörigkeit, Beschäftigungsverhältnis, betrachtetes Arbeitssystem, Beschäftigung im besagten Arbeitssystem und Umfang der Beschäftigung. Der Fragebogen wird über die Software EvaSys ausgegeben, so dass das Layout bzw. die Gestaltung durch das System weitestgehend vorgegeben ist (s. Anh. D). Es wurde jedoch besonders auf eine gute Lesbarkeit geachtet, indem eine ausreichend große Schriftgröße und abwechselnde Schattierungen zwischen den Items gewählt worden sind. Außerdem wurden die einzelnen Themenblöcke, z. B. allgemeine Informationen oder personenbezogenen Daten, durch separate Überschriften gekennzeichnet.

5.2.4 Itemselektion und -überprüfung

Die Itemselektion und -überprüfung zielt darauf ab, Items zu identifizieren, die zu Verständnisproblemen führen und/ oder nicht von praktischer Relevanz sind (Jonkisz et al., 2012). Zu diesem Zweck wurde die zuvor erstellte Testversion des Fragebogens (s. Anh. D) mit Hilfe von Erprobungsmethoden unter möglichst realitätsnahen Bedingungen und unter Einbeziehung der anvisierten Zielgruppe überprüft. Als Untersuchungsmethoden kamen kognitive Pre-Tests und retrospektive Befragungen zum Einsatz, auf die im Folgenden näher eingegangen wird.

Beginnend mit den kognitiven Pre-Tests wurde der erstellte Fragebogenentwurf unter Einbeziehung von sechs Beschäftigten aus der manuellen Montage überprüft. Bei dieser Methode werden die Befragten dazu aufgefordert, die einzelnen Fragestellungen vorzulesen und ihre Gedanken zu der jeweiligen Frage laut zu äußern bzw. zu erörtern – dieses Vorgehen wird auch als „Thinking aloud“ bezeichnet. Allgemein konnte im Rahmen dieses Tests festgestellt werden, dass die Probanden mit einigen Items Schwierigkeiten hinsichtlich des Verständnisses von Begriffen und der Abgrenzung von Sachverhalten hatten. So kommt es beispielsweise bei den Items zu den Montageobjekten durch die Unterscheidung zwischen Produkten und Bauteilen zu Verständnisproblemen und folglich zu Fehleinschätzungen und -bewertungen. Daher wurden die Items zum Montageobjekt unter Berücksichtigung der Anmerkungen der Befragten neu formuliert und umstrukturiert (s. Tab. 5.3).

Tab. 5.3 Kognitive Pre-Test induzierte Itemveränderungen – Montageobjekt

	Ursprüngliche Version der Items	Abgeänderte Version der Items
MO1	~~Angesichts der Vielfalt an Bauteilen besteht die Gefahr, dass Bauteile falsch oder nicht verbaut werden.~~	*In dem Arbeitssystem wird eine Vielfalt an Baugruppen montiert.*
MO2	~~Die Vielfalt an Produkten oder Teilen erhöht die Verwechslungsgefahr.~~	*Es werden mehrere Varianten einer Baugruppe montiert.*
MO3	~~Es liegen so unterschiedliche Teile bereit, dass es schwer fällt zu erkennen, welches Teil zu welchem Produkt gehört.~~	*Baugruppen ähneln sich in Funktion oder Aussehen.*
MO4	~~Es gibt einige Bauteile, die sich in Aussehen oder Funktion ähneln und zur Verwechslungsgefahr führen.~~	*Es kommt zu häufigen Änderungen oder Wechseln von Baugruppen.*
MO5	~~Es werden mehrere Varianten eines Produkts montiert.~~	*In dem Arbeitssystem steht eine Vielfalt an Bauteilen bereit.*

Tab. 5.3 Fortsetzung

	Ursprüngliche Version der Items	Abgeänderte Version der Items
MO6	–	*Es werden mehrere Varianten eines Bauteils montiert.*
MO7	–	*Bauteile ähneln sich in Funktion oder Aussehen.*
MO8	–	*Es kommt zu häufigen Änderungen oder Wechseln von Bauteilen.*
Änderungen sind durch unterstrichene und kursiv gesetzte Begriffe gekennzeichnet		

In Bezug auf die Items zum Montageprozess und den Arbeitsmitteln hat sich herausgestellt, dass der Themenblock der Arbeitsmittel aufgrund von inhaltlichen Überschneidungen den Montageprozessen zuzuordnen ist. Darüber hinaus stellten die Probanden Formulierungen und Begriffe fest, die zu Verständnisproblemen führten. Im Zuge der Einarbeitung dieser Anmerkungen wurden die Items MP3 und MP6 zusammengefasst und das Item MP8 aufgrund von inhaltlichen Überschneidungen mit den neu formulierten Items aus dem Themenblock Montageobjekt entfernt. In diesem Zusammenhang wurden auch drei weitere Items entfernt – Item MP6, AM1 und AM3 –, die die Probanden als schwierig zu beurteilen bzw. zu differenzieren empfanden. Anhand der Anmerkungen und Überlegungen zu den gestellten Fragen konnten in gleicher Weise drei neue Items in den Itempool aufgenommen werden – MP10, MP11 und MP12. In Tab. 5.4 ist der überarbeitete Itempool zu den Montageprozessen aufgeführt.

Tab. 5.4 Kognitive Pre-Test induzierte Itemveränderungen – Montageprozess

	Ursprüngliche Version der Items	Abgeänderte Version der Items
MP1	Arbeitsergebnisse sind nach umfangreichen Vorgaben zu kontrollieren (z. B. Sichtprüfung, Messung).	*Montageschritte* sind nach Vorgaben zu kontrollieren (z. B. Sichtprüfung, Messung).
MP2	Unterbrechungen durch andere Aktivitäten beeinträchtigen die Konzentration auf die wesentlichen Informationen während der Montage (z. B. Dokumentation, Buchungen, Übertragung von Daten oder Messwerten).	*Andere Tätigkeiten* beeinträchtigen die Konzentration auf die Montage (z. B. Dokumentation, Buchungen, Übertragung von Daten oder Messwerten).
MP4	Es braucht Zeit, bis ein Montageprozess sicher beherrscht wird.	Es braucht Zeit, bis ein Montageprozess sicher beherrscht wird.
MP5	Die Montage erfordert immer wieder Neu- oder Umlernen.	Die *Arbeitsaufgabe* erfordert immer wieder Neu- oder Umlernen.

Tab. 5.4 Fortsetzung

	Ursprüngliche Version der Items	Abgeänderte Version der Items
MP7	Es ist oft unklar, welches Bauteil als nächstes zu montieren ist.	Es ist oft unklar, welches Bauteil als nächstes zu montieren ist.
MP9	Die Montage beinhaltet umfangreiche Arbeitsinhalte.	Die Montage *umfasst eine Vielzahl an unterschiedlichen Arbeitsschritten.*
AM2	Die bereitgestellten Werkzeuge und/ oder Bauteile können verwechselt werden.	Die bereitgestellten Werkzeuge können verwechselt werden *(z. B. verschiedene Größen, Formen)*.
MP10	–	*Einige Bauteile haben keine eindeutige Einbaulage und können falsch montiert werden*.
MP11	–	*Fehlende oder falsche Bauteile erfordern zusätzlichen Aufwand oder Abstimmungsbedarf*.
MP12	–	*Die Auftragsreihenfolge ist nicht immer vorgegeben*.
Änderungen sind durch unterstrichene und kursiv gesetzte Begriffe gekennzeichnet		

Hinsichtlich des verbleibenden Themenblocks, Arbeitsplan, wurden von den Probanden nur wenige bis gar keine Anmerkungen gemacht, die durch Änderungen in der Satzstruktur und/ oder Terminologie berücksichtigt werden konnten. Dennoch wurden drei Items – Item AP5, AP6 und AP9 – von der weiteren Betrachtung ausgeschlossen, da sie von den Probanden falsch interpretiert worden sind und somit Überschneidungen mit bestehenden Items aufwiesen. Ferner wurde das Item AP1 im Hinblick auf die Kernaussage des Entscheidungsprozesses umfassend umformuliert, da dies aus dem bisherigen Item nicht ausreichend hervorging. Weiterhin wurde der Aspekt der Änderungshäufigkeit aus Item MP8 in ein separates Item überführt. Damit umfasst der Abschnitt „Arbeitsplan“ nun sieben Items (s. Tab. 5.5).

Tab. 5.5 Kognitive Pre-Test induzierte Itemveränderungen – Arbeitsplan

	Ursprüngliche Version der Items	Abgeänderte Version der Items
AP1	Montageanweisungen sind lückenhaft aufbereitet, so dass Zusatzinformationen besorgt werden müssen.	*Es müssen oft Entscheidungen getroffen werden, ohne dass ausreichende Informationen zur Verfügung stehen.*
AP2	Montageanweisungen weisen unnötige Information auf.	Montageanweisungen weisen *überflüssige* Information auf.
AP3	Zur Aufgabenerfüllung werden vielfältige Informationen benötigt.	Zur Aufgabenerfüllung werden *unterschiedliche Informationsquellen* benötigt.

Tab. 5.5 Fortsetzung

	Ursprüngliche Version der Items	Abgeänderte Version der Items
AP4	Wichtige Informationen fallen nicht direkt ins Auge.	Wichtige Informationen fallen nicht direkt ins Auge *(z. B. Drehmoment, Schraubensicherung, Montagehinweise)*.
AP7	Montageinformationen werden nicht zur richtigen Zeit bereitgestellt.	Montageinformationen werden nicht zur richtigen Zeit bereitgestellt *(z. B. Zeichnung, Auftragsinformationen, Stückliste)*.
AP8	Fehlende oder nicht eindeutige Montageinformationen erfordern zeitaufwändige Abstimmungen mit den Kollegen.	Fehlende oder *unklare* Montageinformationen erfordern *zusätzliche Abstimmungen.*
AP10	–	*Es kommt zu häufigen Änderungen der Montageanweisungen/ -informationen.*
Änderungen sind durch unterstrichene und kursiv gesetzte Begriffe gekennzeichnet		

Aus dem kognitiven Pre-Test geht somit ein Itempool mit 25 Fragen hervor (s. Anh. E), der mit Hilfe der retrospektiven Befragung von acht weiteren Beschäftigten aus dem Bereich der manuellen Montage nochmals überprüft worden ist. Bei der retrospektiven Befragung wurden die Teilnehmenden nach dem Ausfüllen des Fragebogens zu Schwierigkeiten beim Ausfüllen und bei der Entscheidungsfindung zu den einzelnen Items befragt. Dabei haben sich nur kleinere Anmerkungen zu Formulierungen, Begriffen oder den in den Fragestellungen angeführten Beispielen ergeben (s. Anh. F). Der finalisierte Itempool zur Messung der subjektiv wahrgenommenen informatorischen Komplexität eines Arbeitssystems stellt sich diesbezüglich wie folgt dar:

Montageobjekt

MO1	In dem Arbeitssystem wird eine Vielfalt an Baugruppen montiert.
MO2	Es werden mehrere Varianten einer Baugruppe montiert.
MO3	Baugruppen ähneln sich in Funktion und/ oder Aussehen.
MO4	Es kommt zu häufigen Änderungen oder Neuentwicklungen der Baugruppen.
MO5	In dem Arbeitssystem steht eine Vielfalt an Bauteilen bereit.
MO6	Es werden mehrere Varianten eines Bauteils montiert.
MO7	Bauteile ähneln sich in Funktion und/ oder Aussehen.
MO8	Es kommt zu häufigen Änderungen oder Wechseln der Bauteile.

Montageprozess

MP1	Montageschritte sind nach Vorgaben zu kontrollieren (z. B. Sichtprüfung, Messung).
MP2	Vor, während oder nach der Montage muss eine Vielzahl an anderen Tätigkeiten ausgeführt werden (z. B. Dokumentation, Buchungen, Überprüfung von Daten oder Messwerten).
MP4	Es braucht Zeit, bis ein Montageprozess sicher beherrscht wird.
MP5	Die Arbeitsaufgabe erfordert immer wieder Neu- oder Umlernen.
MP7	Im Produktionsalltag werden wechselnde Baugruppen montiert.
MP9	Die Montage umfasst eine Vielzahl an unterschiedlichen Arbeitsschritten.
MP10	Bauteile haben keine eindeutige Einbaulage und können falsch montiert werden.
MP11	Fehlende oder falsche Bauteile erfordern zusätzlichen Aufwand oder Abstimmungsbedarf.
MP12	Die Auftragsreihenfolge ist nicht immer vorgegeben.
AM2	Zwischen den bereitgestellten Werkzeugen bestehen Ähnlichkeiten (z. B. ähnliche Größen oder Formen).

Arbeitsplan

AP1	Es müssen oft Entscheidungen getroffen werden, ohne dass ausreichende Informationen zur Verfügung stehen.
AP2	Montageanweisungen weisen überflüssige Information auf (z. B. Abbildungen, Maße, Informationen, Zeichnungen).
AP3	Zur Aufgabenerfüllung werden unterschiedliche Informationsquellen benötigt.
AP4	Wichtige Informationen fallen nicht direkt ins Auge (z. B. Drehmoment, Schraubensicherung, wichtige Montagehinweise).
AP7	Montageinformationen werden nicht zur richtigen Zeit bereitgestellt (z. B. Zeichnung, Auftragsinformationen, Stückliste).
AP8	Fehlende oder unklare Montageinformationen erfordern zusätzliche Aufwand oder Abstimmungen.
AP10	Es kommt zu häufigen Änderungen der Montageanweisungen/ -informationen.

5.3 Statistische Überprüfung des Itempools und Normierung

5.3.1 Vorgehen und Anspruchsniveaus

Die statistische Auswertung des generierten Itempools, zwecks Überprüfung auf eine zugrunde liegende Faktorenstruktur, erfolgt mit Hilfe des Statistikprogramms SPSS® 28 unter Anwendung der explorativen Faktorenanalyse. Dieses Verfahren ermöglicht es, Variablen zu reduzieren und zu strukturieren (Backhaus et al., 2016). Voraussetzung für die Durchführung einer explorativen Faktorenanalyse ist die Beurteilung der Dateneignung. Einen ersten Aufschluss über die Eignung der Daten liefert die Korrelationsmatrix, in der die Bündelungsfähigkeit bzw. die Interaktionen zwischen einzelnen Variablen aufgezeigt wird. Abhängig von der Datenverteilung – Shapiro-Wilk-Test – wird der Korrelationskoeffizient nach Perason – Normalverteilung – oder Spearman – keine Normalverteilung – berechnet. Die Ergebnisse sind dabei wie folgt zu interpretieren (Cohen, 1988): 0,1 bis 0,3 schwache Korrelation, 0,3 bis 0,5 moderate Korrelation und größer 0,5 starke Korrelation. Als weiteres Prüfkriterium wird das Kaiser-Meyer-Olkin-Kriterium (KMO) herangezogen, das auf der Anti-Image-Korrelationsmatrix basiert. Das KMO-Kriterium gibt dabei Auskunft über die Gesamteignung der Daten, wobei ein Wert > 0,7 als anzustrebendes Niveau festgelegt wird – s. Kaiser und Rice (1974) für nähere Informationen. Neben dem KMO-Wert wird auch der MSA-Wert (Measure of Sampling Adequacy) der einzelnen Variablen der Anti-Image-Korrelationsmatrix berücksichtigt, welcher angibt, inwieweit eine Variable mit allen anderen korreliert und sich somit für eine Faktorenanalyse eignet. Ausgeschlossen werden dabei Variablen, bei denen der individuelle MSA-Wert ≤ 0,6 beträgt (Backhaus et al., 2016; Field, 2009; Hartmann & Reinecke, 2013; Tabachnick & Fidell, 2013). Nach Stewart (1981) gelten beide Kennziffern als robuste Verfahren zur Überprüfung der Dateneignung für eine Faktorenanalyse.

Mit der Feststellung der Dateneignung, einschließlich etwaiger Anpassungen im Datensatz – Ausschluss von Variablen bzw. Items –, folgt die eigentliche Faktorenanalyse. Zur Extraktion der Faktoren wird die Hauptkomponentenanalyse verwendet. Diese hat zum Ziel, die Datenstruktur mit möglichst wenigen Faktoren so umfassend wie möglich wiederzugeben (Backhaus et al., 2016). Als Rotationsmethode wird die Varimax-Rotation gewählt, bei der davon ausgegangen wird, dass die Achsen bzw. Faktoren nicht miteinander korrelieren (Bühner, 2011b). Die Bestimmung der zu extrahierenden Faktoren erfolgt anhand des Kaiser-Kriteriums und des Scree-Tests. Das Kaiser-Kriterium

besagt, dass Faktoren mit einem Eigenwert größer eins als Faktoren interpretiert werden können. Maßgebend ist jedoch, dass nur Faktoren extrahiert werden, die sich sinnvoll interpretiert lassen (Bühner, 2011b). Die von der Faktorenlösung erklärte Gesamtvarianz sollte über 50 % liegen (Litfin et al., 2000). In gleicher Weise sollte auch die Faktorladung, welche angibt, wie stark eine Variable auf einen Faktor lädt, größer als 0,5 sein (Backhaus et al., 2016). Eventuelle Querladungen sind so klein wie möglich zu halten bzw. inhaltlich zu erklären, so dass eine klare Differenzierung zwischen den Faktoren möglich ist. Mit jeder Eliminierung eines oder mehrerer Items aus dem Itempool erfolgt ein erneuter Durchlauf der beschriebenen Schritte der Faktorenanalyse und Bewertung der Gütekriterien. Die Faktorenanalyse gilt als abgeschlossen, wenn mit einer möglichst geringen Anzahl an Items eine ausreichend hohe Messgenauigkeit und Inhaltsvalidität erreicht wird als auch die einzelnen Faktoren sinnvoll interpretiert werden können (vgl. Bühner, 2011a). Als Maß für die innere Konsistenz eines Faktors wird der standardisierte Wert Cronbachs Alpha herangezogen, wobei das Anspruchsniveau 0,6 beträgt (Nawi et al., 2020). Für Faktoren mit weniger als vier Variablen wird dieser Wert auf 0,5 herabgesetzt (vgl. Cratzius, 2003). Darüber hinaus wird auch der Anteil der Varianz, der durch die Faktoren einer jeden Variablen erklärt wird – Kommunalität –, berücksichtigt, welcher mindestens 50 % betragen sollte (Bühner, 2011b; Fürntratt, 1969; Litfin et al., 2000). In Tab. 5.6 sind die wesentlichen Gütekriterien und Anspruchsniveaus für die explorative Faktorenanalyse zusammengefasst.

Tab. 5.6 Berücksichtigte Gütekriterien im Rahmen der explorativen Faktorenanalyse (in Anlehnung an Litfin et al. (2000) und Cratzius (2003))

Gütekriterien zur Beurteilung der Dateneignung	
Kaiser-Meyer-Olkin Kriterium (KMO)	> 0,7
Measure of Sampling Adequacy (MSA)	> 0,6
Gütekriterien zur Beurteilung der generierten Faktorlösungen	
Kaiser-Kriterium	Eigenwert ≥ 1
Erklärte Gesamtvarianz	≥ 50 %
Faktorladung	≥ 0,5
Cronbachs Alpha	≥ 0,6 (bei weniger als vier latente Variablen ≥ 0,5)
Kommunalität	≥ 50 %

5.3.2 Untersuchungsrahmen und Stichprobe

Ausgangspunkt für die Überprüfung des generierten Itempools bildet die Datenerhebung bei einem Hersteller für kundenspezifische LKW-Aufbauten. Dieser verfügt über umfangreiche Produktionsbereiche, in denen komplexe Baugruppen überwiegend von Hand montiert werden. Im Rahmen der Datenerhebung konnten insgesamt 78 Beschäftigte – 2 Frauen und 76 Männer – mit Hilfe des eingesetzten Fragebogens (s. Anh. G) befragt werden. Diese waren zum Zeitpunkt der Befragung zwischen 18 und 65 Jahre alt (M = 37,56; SD = 12,76). 86 % der Befragten waren in einem unbefristeten Arbeitsverhältnis und rund 82 % arbeiteten ausschließlich in dem jeweils genannten Arbeitssystem. Insgesamt wurden bei der Datenerhebung fünf verschiedene Arbeitssysteme berücksichtigt, wobei die durchschnittliche Erfahrung in den jeweiligen Systemen zwischen einem und fünf Jahren lag. Basierend auf den personenbezogenen Daten kann folglich davon ausgegangen werden, dass die Befragten über umfangreiche Erfahrungen in ihrem Arbeitssystem verfügten und somit eine Aussage über die wahrgenommene informatorische Komplexität treffen können.

5.3.3 Explorative Faktorenanalyse

Die deskriptive Analyse der erhobenen Daten im Hinblick auf die Itemverteilung zeigt, dass alle Items von einer Normalverteilung abweichen – Kolmogorov-Smirnov-Test signifikant. Dieses Ergebnis ist angesichts der Tatsache, dass die subjektiv wahrgenommene informatorische Komplexität erfasst wird, nicht verwunderlich. Vielmehr war das Ergebnis zu erwarten, da eine hohe Komplexität des Arbeitssystems zwangsläufig auch zu einer hohen Zustimmungsrate bei der Bewertung führt – keine Komplexität niedrige Ausprägung und hohe Komplexität hohe Ausprägung. Diesbezüglich wurde eine rechtssteile bzw. linksschiefe Verteilung der Daten erwartet, welche durch eine Analyse der Schiefe und Kurtosis der einzelnen Variablen bestätigt werden kann – überwiegend linksschief (18 von 25 Items) und abgeflacht im Verlauf. Die Abweichung von der Normalverteilung ist für die weitere Analyse keinesfalls hinderlich, denn nach Backhaus et al. (2016) setzt die Faktorenanalyse keine Normalverteilung voraus.

Wie in Abschn. 5.3.1 beschrieben, kann die Korrelationsmatrix erste Hinweise auf die Eignung der Daten für eine Faktorenanalyse liefern. Voraussetzung dafür ist, dass Korrelationen zwischen den einzelnen Items vorliegen die idealerweise in Gruppen zusammengefasst werden können (Schwarz et al., 2022). In Tab. 5.7 ist die Korrelationsmatrix nach Spearman für alle 25 Items dargestellt.

Tab. 5.7 Korrelationskoeffizient nach Spearman-Rho für alle 25 Items

Korrelationen[c] – Spearman-Rho (einseitig)

	MO5	MO7	MO6	MO8	MO1	MO3	MO2	MO4	AP3	AP8	AP2	AP4	AP1	AP7	AP10	MP12	MP7	MP1	MP2	MP5	MP10	AM2	MP9	MP11
MO5	–																							
MO7	,143	–																						
MO6	,260*	**,322****	–																					
MO8	,055	,236*	**,424****	–																				
MO1	**,305****	**,299****	**,318****	**,385****	–																			
MO3	,002	**,570****	**,360****	**,314****	**,408****	–																		
MO2	,142	,233*	**,673****	**,509****	**,379****	**,413****	–																	
MO4	,023	,170	**,249***	**,562****	,239*	,243*	**,268***	–																
AP3	,177	**,234***	,159	,043	,190	,140	,116	**,275***	–															
AP8	,128	,076	,066	**,229***	**,252***	,017	,151	**,223***	**,306****	–														
AP2	,128	,092	**,271***	**,278***	,187	,010	,062	**,365****	**,269***	**,407****	–													
AP4	-,041	-,014	-,088	,111	-,112	-,049	-,154	-,057	,083	**,349****	,164	–												
AP1	-,101	,004	,026	**,405****	,093	,032	,028	**,306****	,092	**,414****	**,334****	**,463****	–											
AP7	-,186	,174	-,086	**,316****	,177	,061	,101	,169	,116	,127	,051	**,225***	**,455****	–										
AP10	**-,213***	,069	,141	**,405****	,095	,079	,092	**,520****	,126	,170	**,256***	,143	**,499****	**,313****	–									
MP12	,039	-,154	,189	**,250***	,058	,011	,159	,084	,102	,153	-,006	,020	,161	,185	**,275***	–								
MP7	**,354****	-,107	,151	,199	**,302****	-,073	,168	**,277***	,053	**,390****	**,242***	,180	,204	-,049	**,310****	**,227***	–							
MP1	**,404****	,156	**,228***	,084	**,439****	,146	,204	,159	**,388****	**,211***	**,254***	-,038	-,030	-,084	-,155	-,185	0,205	–						
MP2	,158	-,012	**,253***	**,327****	**,252***	,028	**,214***	**,262***	,164	**,223***	**,271***	,171	**,316****	,155	,193	,142	**,309****	**,317****	–					
MP4	**,242***	,161	,016	,194	,203	,087	,028	,095	**,208***	**,257***	,051	**,229***	,191	,166	,033	,115	**,271***	**,213***	**,344****	–				
MP5	,182	**,259***	,077	**,357****	,184	,076	,101	**,369****	**,401****	,185	,156	,064	**,315****	,164	,121	,165	,062	**,295****	**,279***	**,573****	–			
MP10	,056	**,302****	,024	**,368****	**,262***	**,294****	,176	,121	,109	**,302****	-,009	-,001	**,321****	**,450****	**,269***	**,314****	,092	-,025	,197	**,382****	**,223***	–		
AM2	-,133	,114	**,224***	,174	,039	,094	,179	,061	,132	,125	,035	,078	**,277***	,142	,146	,109	-,201	-,004	**,419****	**,249***	**,236***	**,267***	–		
MP9	**,323****	**,385****	**,377****	**,283***	**,510****	,091	**,343****	**,269***	**,352****	**,331****	,207	-,070	,189	**,232***	,082	-,012	**,318****	**,378****	**,348****	**,362****	**,358****	**,283***	**,217***	–
MP11	,041	,128	,131	,027	**,220***	-,001	,152	,154	,089	**,327****	-,014	,058	**,296****	**,222***	,179	-,020	**,313****	**,260***	**,432****	**,303****	,117	**,373****	**,380****	**,471****

* Die Korrelation ist auf dem 0,05 Niveau signifikant (grau hinterlegt); **. Die Korrelation ist auf dem 0,01 Niveau signifikant (grau hinterlegt und fett gedruckt); c. Listenweises N= 64

Aus der Korrelationsmatrix geht hervor, dass zwischen den Items zahlreiche Korrelationen bestehen, die zwischen -0,213 und 0,673 liegen. Insgesamt sind 133 der 300 möglichen Korrelationen signifikant (44%). Das Korrelationsniveau liegt dabei vorwiegend in einem mittleren Bereich – moderate Korrelationen. Es kann also davon ausgegangene werden, dass die Korrelationen in der Stichprobe nicht zufällig zustande gekommen sind, sondern Zusammenhänge zwischen den einzelnen Items bestehen. Die Vielzahl an Korrelationen lassen jedoch nicht direkt auf eine Struktur schließen, was nach Fromm (2008) durchaus üblich ist.

Weiterführend wird die Anti-Image-Korrelationsmatrix betrachtet, die Aufschluss darüber geben soll, ob die Struktur der Korrelationen für eine Faktorenanalyse geeignet ist. Demnach sind die Daten mit einem KMO-Wert von 0,629 nur mäßig für eine Faktorenanalyse nach der Klassifikation von Kaiser und Rice (1974) geeignet und erfüllen damit nicht das definierte Anforderungsniveau von > 0,7. Einen Hinweis darauf, welche spezifischen Items sich nicht eignen bzw. nur geringe Zusammenhänge zu den übrigen Items aufweisen, liefert der variablenspezifische MSA-Wert der Anti-Image-Korrelationsmatrix (s. Tab. 5.8).

Tab. 5.8 MSA-Werte der Anti-Image-Korrelationsmatrix

Item	MSA		Item	MSA		Item	MSA
MO1	0,701		AP2	0,548*		MP5	0,618
MO2	0,634		AP3	0,632		MP7	0,594*
MO3	0,448*		AP4	0,435*		MP9	0,781
MO4	0,717		AP7	0,559*		MP10	0,656
MO5	0,629		AP8	0,645		MP11	0,582*
M06	0,555*		AP10	0,687		MP12	0,406*
MO7	0,511*		MP1	0,719		AM2	0,637
MO8	0,737		MP2	0,790			
AP1	0,627		MP4	0,678			
** MSA-Wert entspricht nicht dem Anforderungsniveau von > 0,6*							

Die MSA-Werte belegen, dass insgesamt neun Variablen von der weiteren Analyse auszuschließen sind, da sie den vorgegebenen Schwellenwert von > 0,6 nicht erfüllen. Demzufolge weisen die deklarierten Items statistisch gesehen nur wenig

Gemeinsamkeiten mit den anderen Items auf. Unter Ausschluss der neun Variablen ergibt die erneute Berechnung der Anti-Image-Korrelationsmatrix einen KMO-Wert von 0,749 und MSA-Werte zwischen 0,665 und 0,852. Damit erfüllt der Datensatz das definierte Anforderungsniveau zur Durchführung der explorativen Faktorenanalyse. In Anlehnung an Kaiser und Rice (1974) kann die Eignung der Daten als „ziemlich gut" eingestuft werden.

Die explorative Faktorenanalyse wird wie in Abschn. 5.3.1 beschrieben mit Hilfe der Hauptkomponentenanalyse und Varimax-Rotation durchgeführt. Die Analyse weist auf das Vorliegen von fünf latenten Faktoren mit einem Eigenwert größer eins hin – Kaiser-Kriterium –, s. Abb. 5.2, die eine Gesamtvarianz von 63,62 % erklären.

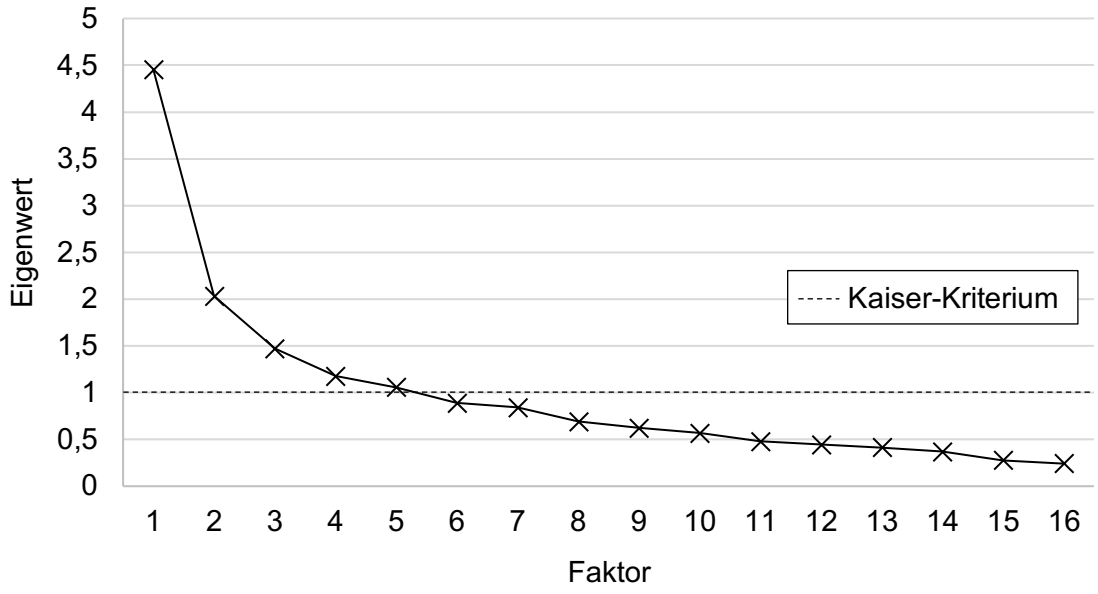


Abb. 5.2 Scree-Plot zu den Eigenwerten der verbleibenden 16 Variablen

Abweichend von dem Kaiser-Kriterium hat sich im weiteren Verlauf der Analyse eine vierfaktorielle Lösung als zielführender herausgestellt. Dies begründet sich zum einen darin, dass der fünfte Faktor nur zwei Variablen mit hohen Querladungen zu den übrigen Faktoren umfasst und zum anderen, dass die resultierenden Faktoren sich inhaltlich nicht interpretieren lassen. Nach Backhaus et al. (2016) und Fromm (2008) ist ein Abweichen von diesem Kriterium nicht ungewöhnlich, da es keine eindeutigen Vorschriften zur Bestimmung der Faktorenanzahl gibt. Dabei besteht das wesentliche Ziel darin, mit möglichst wenigen Faktoren so viel Varianz wie möglich im Datensatz zu erklären (Fromm, 2008).

Mit der Extraktion der vier Faktoren reduziert sich die erklärte Gesamtvarianz auf 57,03 % und entspricht damit weiterhin dem vorgegebenen Anforderungsniveau von > 50 %. Die Überprüfung der Dateneignung – KMO- und MSA-Werte – bleibt von der Änderung der Faktorenzahl unberührt. In Tab. 5.9 sind die rotierten Faktorladungen der vierfaktoriellen Lösung dargestellt. Es zeigt sich, dass insgesamt mehrere Items auf nur einem Faktor hoch laden und recht gleichmäßig auf die Faktoren verteilt sind. Weiterhin geht aus der Tabelle hervor, dass die Variable AP8 mit einer Faktorladung von 0,415 auf dem zweiten Faktor das Anforderungsniveau nicht erfüllt und diesbezüglich von der weiteren Analyse ausgeschlossen wird.

Tab. 5.9 Rotierte Faktorladungsmatrix (N = 69; 16 Variablen; Faktorladungen > 0,4)

	Faktor 1	Faktor 2	Faktor 3	Faktor 4
MO5			0,612	
MO8	0,690			
MO1			0,736	
MO2			0,615	
MO4	0,751			
AP3				0,760
AP8		0,415*		
AP1	0,601			
AP10	0,745			
MP1			0,520	0,568
MP2		0,509		
MP4		0,731		
MP5		0,425		0,669
MP10		0,720		
AM2		0,614		
MP9			0,544	

** Faktorladung entspricht nicht dem Anforderungsniveau von > 0,5*

Die Eliminierung der Variable AP8 hat zur Folge, dass auch die Eignung des Datensatzes für eine Faktorenanalyse erneut zu prüfen ist. So ergibt die Berechnung der Anti-Image-Korrelationsmatrix einen KMO-Wert von 0,756 und MSA-Werte zwischen 0,684 und 0,841. Damit erfüllt der Datensatz weiterhin das definierte Anforderungsniveau zur Durchführung der explorativen Faktorenanalyse. Mit dem Wegfall der Variablen AP8 werden durch die Extraktion von vier Faktoren 59,35 % der Gesamtvarianz erklärt, was

einer Zunahme von 2,32 % entspricht. Dabei verteilen sich die Anteile der einzelnen Faktoren an der erklärten Gesamtvarianz nach der Rotation relativ gleichmäßig auf die vier Faktoren: Faktor 1 16,12 %, Faktor 2 15,49 %, Faktor 3 14,79 % und Faktor 4 12,95 %. Die sich aus der Analyse ergebenden Faktorladungen für die einzelnen Variablen sowie deren Zuordnung zu einem Faktor entsprechend der maximalen Ladungshöhe einer Variablen sind in Tab. 5.10 dargestellt.

Tab. 5.10 Rotierte Faktorladungsmatrix (N = 69; 15 Variablen) (Bendzioch et al., 2020e, modifiziert)

	Faktor 1	Faktor 2	Faktor 3	Faktor 4
MO8	0,669	0,450	0,197	-0,008
MO4	0,741	0,229	-0,101	0,359
AP1	0,631	-0,158	0,321	0,077
AP10	0,754	0,068	0,188	-0,042
MO5	-0,343	0,578	0,126	0,272
MO1	0,151	0,744	0,099	0,104
MO2	0,345	0,650	0,012	-0,083
MP9	0,085	0,545	0,311	**0,359**
MP2	0,178	0,247	0,513	0,268
MP4	-0,089	0,161	0,732	0,319
MP10	0,172	0,287	0,700	-0,203
AM2	0,227	-0,114	0,647	0,032
AP3	0,117	0,061	0,022	0,767
MP1	-0,168	**0,493**	0,001	0,583
MP5	0,161	0,048	0,446	0,664

Felder mit schwarzem Hintergrund entsprechen der Item-Faktor Zuordnung; Bedeutsame Querbeladungen sind fett gedruckt

Gemäß dieser Aufteilung laden die Variablen überwiegend auf nur einem Faktor hoch und verteilen sich gleichmäßig auf die vier Faktoren, mit Ausnahme von Faktor 4, welcher aufgrund der ungeraden Anzahl an Items nur drei Variablen enthält. Aus der Tabelle ist ferner ersichtlich, dass Querladungen bestehen – Ladungen größer als ± 0,3 –, die jedoch mit Ausnahme der Variablen MP1 und MP9 als unbedeutend angesehen werden können, da die Ladungsdifferenzen größer als ± 0,20 sind (Schwarz et al., 2022). Grundsätzlich lassen sich die resultierenden Faktoren sowie die Querladungen der Items MP1 und MP9 sinnvoll interpretieren bzw. erklären, allerdings sind zunächst die noch ausstehenden Gütekriterien interne Konsistenz und Kommunalität zu

thematisieren. Die interne Konsistenz gibt darüber Auskunft, wie gut die Items einer Skala zusammenpassen bzw. wie genau der Test misst, unabhängig davon, ob er das misst, was er messen soll (Keller, 2017). Wie aus Tab. 5.11 hervorgeht, weisen die vier Faktoren Werte zwischen 0,610 und 0,746 auf. Nach Nawi et al. (2020) liegen die Ergebnisse damit in einem mittleren bis guten Bereich – Anforderungsniveau erfüllt. Die einzelnen Variablen weisen dabei überwiegend eine gute Trennschärfe auf, d. h. wie stark die einzelnen Items mit dem gemessenen Gesamtkonstrukt korrelieren (vgl. Kelava & Moosbrugger, 2020). Lediglich die Variablen MO5, MO2 und MP1 weisen eine mittlere Trennschärfe auf, liegen aber noch deutlich über dem Grenzwert von > 0,3 (Weise, 1975). Die Spalte „Cronbachs Aplha, wenn Item weggelassen“ verdeutlicht zudem, dass die Homogenität der Skala durch das Weglassen eines beliebigen Items nicht verbessert werden kann.

Tab. 5.11 Cronbachs Alpha der vier identifizierten latenten Faktoren

	Variable	Trennschärfe	Cronbachs Aplha, wenn Item weggelassen	Cronbachs Alpha
Faktor 1	MO8	0,566	0,673	0,746
	MO4	0,562	0,675	
	AP1	0,458	0,740	
	AP10	0,591	0,664	
Faktor 2	MO5	0,332	0,638	0,643
	MO1	0,510	0,511	
	MO2	0,340	0,630	
	MP9	0,521	0,503	
Faktor 3	MP2	0,449	0,590	0,662
	MP4	0,476	0,574	
	MP10	0,423	0,609	
	AM2	0,425	0,607	
Faktor 4	AP3	0,444	0,472	0,610
	MP1	0,375	0,570	
	MP5	0,438	0,481	

Als abschließendes Gütekriterium zur Beurteilung der resultierenden Faktorenlösung wird der Anteil der erklärten Kommunalität betrachtet, welcher angibt, wie gut ein Item durch alle Faktoren erklärt werden kann und stellt somit das Pendant zur erklärten

Gesamtvarianz dar. Die Kommunalität der 15 Variablen liegt überwiegend über den angestrebten Prozentsatz von > 50 %. Nur die Items MP2 und AM2 weichen von diesem Grenzwert ab – MP2 42,8 % und AM2 48,5 %. Gleichwohl belegen die bisherigen Ergebnisse, dass beide Variablen eindeutig den jeweiligen Faktoren zugeordnet werden können und von inhaltlicher Relevanz sind, so dass die Variablen trotz der Abweichung beibehalten werden. Die Ergebnisse der explorativen Faktorenanalyse lassen somit auf eine vierfaktorielle Lösung mit 15 Variablen schließen, die im nachstehenden Abschn. (5.3.4) hinsichtlich ihrer zugrunde liegenden latenten Variablen bzw. Konstrukte interpretiert werden.

5.3.4 Faktoreninterpretation

Ausgehend von der Bestimmung und der Anzahl an Faktoren, welche zunächst rein abstrakte Größen darstellen, gilt es, diese inhaltlich in Bezug auf die zugrunde liegenden latenten Variablen bzw. Konstrukte zu interpretieren, welche die wahrgenommene informatorische Komplexität messen sollen (vgl. Backhaus et al., 2016). Eine latente Variable wird demnach durch einzelne Items in Form von Indikatoren bestimmt sowie messbar gemacht. Das Item stellt somit das beobachtbare Verhalten bzw. die subjektive Einstellung einer Person dar – manifeste Variable –, während die latente Variable jene verborgene Größe darstellt, die durch die Beantwortung der Items kausal erklärt wird (Bühner, 2011d). Basis für eine solche Interpretation bilden die Faktorladungen der explorativen Faktorenanalyse (s. Tab. 5.10).

Es zeigt sich, dass der erste Faktor besonders mit den Veränderungen bzw. den dynamischen Gegebenheiten in der Montage und den damit verbundenen Entscheidungen korreliert. So erfordern beispielsweise die durch die Dynamik implizierten Veränderungen der Bauteile oder Baugruppen ein hohes Maß an Flexibilität von den Beschäftigten – Item MO8 und MO4. In diesem Zusammenhang müssen immer wieder neue Informationen aufgenommen, verarbeitet und in entsprechendes Handeln umgesetzt werden – Item AP10. Derartige Veränderungen sind zumeist ungeplant, so dass oft Entscheidungen getroffen werden müssen, ohne dass ausreichende Informationen zur Verfügung stehen – Item AP1. Der erste Faktor umfasst demnach die Dynamik von Bauteilen, Baugruppen und Montageanweisungen/-informationen und den damit verbundenen Entscheidungen. Gleichermaßen erfasst der Faktor die erforderliche Flexibilität des Beschäftigten hinsichtlich des Arbeitsprozesses, so dass der erste Faktor mit dem Begriff Dynamik und Flexibilität bezeichnet wird, s. Tab. 5.12.

Tab. 5.12 Faktor 1 des Fragebogens CORAA – Dynamik und Flexibilität

Items		Faktorladung
MO8	Es kommt zu häufigen Änderungen oder Wechseln der Bauteile.	0,669
MO4	Es kommt zu häufigen Änderungen oder Neuentwicklungen der Baugruppen.	0,741
AP1	Es müssen oft Entscheidungen getroffen werden, ohne dass ausreichende Informationen zur Verfügung stehen.	0,631
AP10	Es kommt zu häufigen Änderungen der Montageanweisungen/-informationen.	0,754

Die Items des zweiten Faktors haben gemein, dass sie sich auf die Produkt- und Montagevielfalt beziehen, s. Tab. 5.13. Insofern muss der Beschäftigte in der Lage sein, zwischen verschiedenen Bauteilen, Baugruppen, Varianten und Arbeitsschritten differenzieren und auswählen zu können. Der Faktor kann somit als zentraler Bestandteil und Auslöser des Paradigmenwechsels in der manuellen Montage verstanden werden, welcher durch die Zunahme an Varianten gekennzeichnet ist. Mit der Zunahme an Varianten nimmt auch die Anzahl an Abhängigkeiten bzw. Konnektivitäten zwischen den einzelnen Elementen zu. In diesem Kontext müssen immer wieder Informationen aufgenommen, verknüpft und abgeglichen werden, um beispielsweise die richtigen Komponenten für einen Auftrag auswählen zu können. Der zweite Faktor wird folglich als Produkt- und Montagevielfalt bezeichnet.

Tab. 5.13 Faktor 2 des Fragebogens CORAA – Produkt- und Montagevielfalt

Items		Faktorladung
MO5	In dem Arbeitssystem steht eine Vielfalt an Bauteilen bereit.	0,578
MO1	In dem Arbeitssystem wird eine Vielfalt an Baugruppen montiert.	0,744
MO2	Es werden mehrere Varianten einer Baugruppe montiert.	0,650
MP9	Die Montage umfasst eine Vielzahl an unterschiedlichen Arbeitsschritten.	0,545

Im Rahmen des dritten Faktors werden Indikatoren für die im Montageprozess auftretenden kognitiven Zusatzbelastungen des Beschäftigten erfasst. So sind etwa Werkzeuge schwer zu unterscheiden – Item AM2 –, die Einbaulage von Bauteilen nicht

eindeutig – Item MP 10 – oder es müssen neben dem eigentlichen Montagevorgang noch eine Vielzahl weiterer Tätigkeiten ausgeführt werden – Item MP2. Eng mit den zuvor genannten Items verbunden ergeben sich zudem zusätzliche kognitive Belastungen durch zeitaufwändige Anlernzeiten – Item MP4. Dementsprechend zeichnet sich der dritte Faktor durch zusätzliche kognitive Belastungen und damit einhergehenden Zeitaufwendungen des Beschäftigten aus.

Tab. 5.14 Faktor 3 des Fragebogens CORAA – Kognitive Zusatzbelastung und Zeitaufwendungen

Items		Faktorladung
MP2	Vor, während oder nach der Montage muss eine Vielzahl an anderen Tätigkeiten ausgeführt werden (z. B. Dokumentation, Buchungen, Überprüfung von Daten oder Messwerten).	0,513
MP4	Es braucht Zeit, bis ein Montageprozess sicher beherrscht wird.	0,732
MP10	Bauteile haben keine eindeutige Einbaulage und können falsch montiert werden.	0,700
AM2	Zwischen den bereitgestellten Werkzeugen bestehen Ähnlichkeiten (z. B. ähnliche Größen oder Formen).	0,647

Die Interpretation des vierten Faktors legt nahe, dass die Items MA1, MP1 und MP5 die latente Variable Informationsbedarf und -umfang gemeinsam haben, s. Tab. 5.15. Demzufolge erfordern komplexe Bauteilstrukturen eine an den Beschäftigten angepasste Informationsbereitstellung, um Arbeitsaufträge zu erfüllen – Item MA1 –, Tätigkeiten nach Vorgaben zu überprüfen – Item MP1 – und/ oder Aufgaben zu erlernen bzw. umzulernen – Item MP5. Hierzu müssen alle notwendigen Informationen in der richtigen Form und zum richtigen Zeitpunkt bereitgestellt werden, um Qualitätsmängel und/ oder Produktivitätsverluste in der Montage zu vermeiden.

Tab. 5.15 Faktor 4 des Fragebogens CORAA – Informationsbedarf und -umfang

Items		Faktorladung
MA1	Zur Aufgabenerfüllung werden unterschiedliche Informationsquellen benötigt.	0,767
MP1	Montageschritte sind nach Vorgaben zu kontrollieren (z. B. Sichtprüfung, Messung).	0,583
MP5	Die Arbeitsaufgabe erfordert immer wieder Neu- oder Umlernen.	0,664

Ausgehend von den dargelegten Faktoreninterpretationen können die in Tab. 5.10 aufgezeigten Querladungen der Variablen MP1 und MP9 im Folgenden näher thematisiert werden. Beide Variablen lassen sich eindeutig den jeweiligen Faktoren zuordnen, aber auch die vorliegenden Querladungen lassen sich sinnvoll interpretieren. Zum einen erfordert eine hohe Produkt- und Montagevielfalt auch eine Vielzahl an Prüfschritten – Querladung der Variabel MP1 auf Faktor 2 – und zum anderen setzt eine Vielzahl an Arbeitsschritten auch eine Fülle an Informationen auf Seiten des Beschäftigten voraus, um diese richtig ausführen zu können – Querladung der Variabel MP9 auf Faktor 4. Damit spiegeln die Ergebnisse der Faktorenanalyse und -interpretation insgesamt ein zufriedenstellendes Gesamtbild wider. Die wahrgenommene informatorische Komplexität wird durch vier latente Faktoren (1) Dynamik und Flexibilität, (2) Produkt- und Montagevielfalt, (3) Kognitive Zusatzbelastung und Zeitaufwand und (4) Informationsbedarf und -umfang bestimmt. Diese decken das theoretische Konstrukt der Komplexität, welches nach Klabunde (2003) durch Varietät, Konnektivität und Dynamik gekennzeichnet ist, trotz der Reduzierung der Anzahl an Items hinreichend genau ab – die Beurteilung fand unter erneuter Einbeziehung des Expertengremiums statt (s. Abschn. 5.2.3).

5.3.5 Normierung und Interpretation der Fragebogenskala

Mit der Festlegung der endgültigen Form des Fragebogens ist es erforderlich, eine geeignete Evaluierungsstrategie für das entwickelte Instrument festzulegen. Ohne eine solche Strategie und Normierung lassen sich die Ergebnisse des Fragebogens weder einheitlich bewerten noch interpretieren. Da alle Faktoren in etwa gleich stark zur Aufklärung der Gesamtvarianz beitragen, wird bei der Berechnung des Gesamtergebnisses von einer Gewichtung einzelner Faktoren abgesehen. Nach Marcus und Bühner (2009) erfolgt die Berechnung der Skalenwerte bzw. -ergebnisse in der Regel über die Summe oder den Mittelwert der einzelnen, einem Faktor zugeordneten Itemwerte. Unter Berücksichtigung, dass sich die Anzahl der Items in den Faktoren voneinander unterscheidet, wird für die Berechnung der Mittelwert herangezogen. Datensätze mit fehlenden Werten sollten nach Möglichkeit ausgeschlossen werden, um Verzerrungen der Skalenwerte zu vermeiden.

Wie bereits in den Zielsetzungen erwähnt, soll der Fragebogen sowohl das Gesamteinsatzpotenzial für ein informatorisches Assistenzsystem in einem Arbeitssystem aufzeigen als auch darüber Auskunft geben, in welchem spezifischen Kontext die Unterstützungsleistung benötigt wird. Die Auswertung erfolgt diesbezüglich in zwei Schritten.

In einem ersten Schritt wird für jede Fragebogenkategorie (Faktoren 1 bis 4) der Mittelwert berechnet. Das Ergebnis ist somit eine Zahl zwischen eins und fünf. Mit Hilfe der vier aggregierten Teilkennzahlen können auf Basis der Faktoreninterpretation einerseits Problemfelder und andererseits Schwerpunkte für die Entwicklung eines informatorischen Assistenzsystems abgeleitet werden (nähere Informationen s. Abschn. 6.3.1). Ein hoher Wert für den vierten Faktor deutet beispielsweise auf einen hohen Informationsbedarf und der Bereitstellung eines breiten Spektrums an Informationen zur Erfüllung der Aufgabe hin – zur Interpretation der Kennzahlen s. Tab. 5.16. In einem zweiten Schritt wird aus den vier aggregierten Mittelwerten der Gesamtmittelwert über alle Faktoren berechnet. Dieser ermittelte Gesamtwert, CORAA-Score, spiegelt das Einsatzpotenzial für den Einsatz eines informatorischen Assistenzsystems wider und bildet damit die Entscheidungsgrundlage für die Einführung oder Nicht-Einführung eines solchen Systems.

Die Interpretation der aggregierten Kennzahlen erfolgt anhand einer Transformation der definierten Antwortformate des Fragebogens in Komplexitätsgrade bzw. Einsatzpotenziale, s. Tab. 5.16. So führen die Antwortmöglichkeiten „Stimme gar nicht zu“ und „Stimme eher nicht zu“ zu einer geringen Komplexitätswahrnehmung und damit zu einem geringen Einsatzpotenzial für ein informatorisches Assistenzsystem – es werden andere Verbesserungsmaßnahmen empfohlen. Ein mittleres Einsatzpotenzial ergibt sich demzufolge aus einer tendenziellen Zustimmung der Beschäftigten – Antwort „Stimme teilweise zu“. Aggregierte Kennzahlen > 4 deuten auf ein hohes Einsatzpotenzial für ein informatorisches Assistenzsystem hin, da die Mehrheit der Befragten den Items eher bzw. voll zustimmt.

Tab. 5.16 Hinweise zur Interpretation der Fragebogenauswertung

	Antwortformat	Komplexität	Einsatzpotenzial Assistenzsysteme
< 3	Stimme gar nicht zu Stimme eher nicht zu	Niedrig	Weniger hilfreich
≥ 3 < 4	Stimme teilweise zu	Mittel	Hilfreich
≥ 4	Stimme eher zu Stimme voll zu	Hoch	Sehr hilfreich

5.4 Überprüfung der Hauptgütekriterien des Fragebogens

5.4.1 Objektivität

Die Objektivität eines Fragebogens gibt Auskunft darüber, wie unabhängig das Testergebnis von jeglichen Einflussfaktoren außerhalb der befragten Person ist (Rammstedt, 2004). Dabei wird zwischen der Objektivität der Durchführung, Auswertung und Interpretation differenziert (z. B. Bühner, 2006). Insofern sollte die Befragung unter möglichst standardisierten Bedingungen sowohl für die zu befragende Person als auch für den Befragenden durchgeführt werden. Für die Befragten bedeutet dies, dass sie eindeutige Informationen erhalten, wie der Fragebogen auszufüllen ist und worin das Ziel der Befragung besteht. Beide Punkte können als gegeben angesehen werden, da die Personen zu Beginn der Befragung neben dem Hinweis zum Datenschutz schriftlich darüber informiert werden.

Demgegenüber muss der Befragende eindeutige Informationen zur Auswertung und Interpretation des Fragebogens erhalten. Bereits bei der Konstruktion des Fragebogens wurde explizit darauf geachtet, ausschließlich geschlossene Fragen zu verwenden, die wenig Spielraum für Interpretationen lassen, wie es beispielsweise bei offenen Fragen der Fall ist. Ebenso erfolgte keine Invertierung der Items, um Flüchtigkeitsfehler beim Ausfüllen und bei der Auswertung zu vermeiden. Hinweise zur Auswertung und Interpretation der Ergebnisse finden sich in Abschn. 5.3.5. Es kann somit festgehalten werden, dass der konstruierte Fragebogen das Gütekriterium der Objektivität in vollem Maße erfüllt.

5.4.2 Reliabilität

Der Begriff Reliabilität beschreibt die Genauigkeit, mit der eine Skala ein Merkmal misst, unabhängig davon, was das Instrument zu messen vermag (Bühner, 2006; Rammstedt, 2004). Die Reliabilität umfasst dabei drei Aspekte, Stabilität, Konsistenz und Äquivalenz, welche an bestimmte Verfahren gekoppelt sind (nähere Informationen s. z. B. Rammstedt (2004), Bühner (2011c)): Retest-Reliabilität, Paralleltest-Reliabilität, Interrater-Reliabilität, Split-Half-Reliabilität und Konsistenzanalyse. Unter Berücksichtigung der jeweiligen Verfahrensanforderungen, zeitlichen Restriktionen und der gegebenen Stichprobengröße wird zur Bestimmung der Reliabilität des entwickelten Fragebogens die Konsistenzanalyse sowie die Retest-Reliabilität angewendet.

Die Konsistenzanalyse bzw. interne Konsistenz gibt Auskunft darüber, wie gut die

Items einer Skala zusammenpassen, indem alle Items eines Faktors miteinander korreliert werden. Als Maß für die interne Konsistenz eines Faktors dient der standardisierte Wert Cronbachs Alpha. Dieser wurde bereits für alle vier Faktoren im Rahmen der explorativen Faktorenanalyse überprüft (s. Abschn. 5.3.3), mit dem Ergebnis, dass alle vier Faktoren das Anforderungsniveau erfüllen, s. Tab. 5.11.

Das zweite Reliabilitätsmaß, die Retest-Reliabilität, dient zur Bestimmung der zeitlichen Stabilität des Messinstruments (Bühner, 2006). Zu diesem Zweck wird der Fragebogen denselben Befragten zu zwei verschiedenen Messzeitpunkten vorgelegt. Der Abstand zwischen den beiden Messpunkten wird in der Literatur nicht näher spezifiziert, er hängt jedoch in der Regel von der Stabilität des zu messenden Merkmals ab (Rammstedt, 2004). Dabei besteht das Dilemma darin, einerseits die Zeitabstände zwischen den Messpunkten so groß wie möglich zu halten, um Erinnerungseffekte zu minimieren, so dass zwei möglichst unabhängige Messungen entstehen, und andererseits die Zeitabstände so klein wie möglich zu halten, um Veränderungen im zu messenden Merkmal auszuschließen (Beauducel & Leue, 2014; Rammstedt, 2004).

Ausgehend von den obigen Beschreibungen wurde ein Zeitabstand von vier Wochen festgelegt, welcher in der Praxis vielfach Anwendung findet (z. B. Rammstedt, 2010). Abweichend von diesem Erhebungsintervall konnte die zweite Erhebung aus betriebsbedingten Gründen erst nach 10,57 Wochen – 74 Tage – erfolgen. Angesichts des großen Abstands zwischen der ersten und der zweiten Erhebung konnten lediglich 23 Datensätze erhoben und zugeordnet werden (33 % der ursprünglichen Stichprobengröße). Um die Retest-Reliabilität zu ermitteln, wurden die erhobenen Datensätze miteinander korreliert – Korrelation nach Spearman. Dabei ergaben sich Korrelationskoeffizienten zwischen 0,514 und 0,699 (s. Tab. 5.17). Nach Andrews et al. (1993) können die Werte wie folgt interpretiert werden (s. a. Häßler & Reis, 2005): > 0,9 ausgezeichnet, 0,8 bis 0,9 gut, 0,5 bis 0,7 moderat und 0,3 bis 0,5 niedrig. Bei der Interpretation ist jedoch zu beachten, dass Persönlichkeitstests, zu denen der Fragebogen aufgrund der Abfrage von subjektiven Einschätzungen am ehesten zugeordnet werden kann, eine wesentlich geringere Stabilität aufweisen als Leistungstests und nach Janke (1973) meist in einem Bereich zwischen 0,5 und 0,7 liegen (s. a. Amelang & Schmidt-Atzert, 2006; Schuerger et al., 1989). Weiterhin ist bei der Interpretation zu berücksichtigen, dass die Höhe des Reliabilitätskoeffizienten mit der Vergrößerung des Zeitabstands entscheidend abnimmt. An dieser Stelle sei auch angemerkt, dass durch die Montage von wechselnden Aufträgen von vornherein ein gewisser Veränderungsfaktor

besteht, indem z. B. besondere Vorkommnisse oder Aufträge auf den Befragten einwirken. Unter Berücksichtigung dieser Hinweise und Randbedingungen können die erzielten Ergebnisse als zufriedenstellend eingestuft werden, so dass die Reliabilität des Fragebogens insgesamt als gegeben angesehen werden kann.

Tab. 5.17 Retest-Reliabilität des Fragebogens CORAA (n = 23)

	Faktor 1	Faktor 2	Faktor 3	Faktor 4
Korrelationskoeffizient	0,514	0,645	0,581	0,699
Signifikanzniveau	0,006**	< 0,001**	0,002**	< 0,001**
*** Die Korrelation ist auf dem 0,01 Niveau (1-seitig) signifikant; Sperman-Rho*				

5.4.3 Validität

Die Validitätsprüfung hat zum Ziel, den Grad der Genauigkeit eines Verfahrens in Bezug auf das zu messende Konstrukt zu überprüfen (Rammstedt, 2004). Es stellt sich also die Frage, ob der Fragebogen das misst, was er zu messen vorgibt. Durch die Einbindung von Experten in die Entwicklung des Itempools sowie in die Beurteilung des resultierenden Fragebogens kann grundsätzlich von einem inhaltsvaliden Instrument ausgegangen werden, welches das zu messende Konstrukt, die wahrgenommene informatorische Komplexität eines Montagesystems, hinreichend genau abdeckt. Um die Gültigkeit dieser internen Validität zu überprüfen wird in der Literatur ein Vergleich mit einem anderen Instrument empfohlen, welches ein stark verwandtes oder gar das gleiche Konstrukt misst – Überprüfung der externen Validität (z. B. Rammstedt, 2004). Ausgehend davon, dass in Abschn. 3.2 keine Methode zur Komplexitätsmessung identifiziert werden konnte, die das gleiche Konstrukt misst, wird an dieser Stelle ein Vergleichsinstrument herangezogen, das ein eng verwandtes Konstrukt erfasst und ebenfalls auf einem subjektiven Ansatz beruht. Im Ergebnis konnte lediglich der CXI-Fragebogen (CompleXity Index) als Vergleichsinstrument identifiziert werden. Dieser hat zum Ziel, die wahrgenommene Produktionskomplexität zu messen (weitere Informationen, s. z. B. Mattsson et al., 2013) und wurde für den vorliegenden Vergleich vom Englischen ins Deutsche übersetzt (s. Anh. H).

Die Datenerhebung mit dem CXI-Fragebogen fand parallel mit der ersten Datenerhebung des CORAA-Fragebogens statt. Da die beiden Fragebögen unterschiedliche Dimensionen bzw. Konstrukte und Zielsetzungen beinhalten, ist ein „Eins-zu-eins-

Vergleich“ nicht möglich. Insofern werden die Ergebnisse der beiden Fragebögen miteinander verglichen und nicht die einzelnen Konstrukte miteinander korreliert. Neben dem Einsatz eines Vergleichsinstruments wurde zur Sicherstellung der externen Validität auch die Expertenmeinung von vier leitenden Angestellten der fünf Arbeitssysteme eingeholt, die allesamt über langjährige Erfahrungen in Bezug auf die fünf Arbeitssysteme verfügen. Dazu wurde eine Ratingskala mit Stufen von 1 bis 10 verwendet, wobei 1 für eine niedrige Komplexität, 5 für eine mittlere Komplexität und 10 für eine hohe Komplexität steht. Die Ergebnisse der externen Validitätsprüfung sind in Tab. 5.18 dargestellt.

Tab. 5.18 Ergebnisse der externen Validitätsprüfung

		Station 1	Station 2	Station 3	Station 4	Station 5
CORAA (n = 69)	Score	4,1	3,88	3,63	3,28	3,50
	Rang	1	2	3	5	4
Experten-einschät-zung (n = 4)	Score	8,00	8,50	7,50	6,00	4,00
	Rang	2	1	3	4	5
CXI (n = 78)	Score	4,28	3,80	4,11	3,67	3,86
	Rang	1	4	2	5	3

Wie aus der Tab. 5.18 hervorgeht, weichen die Ergebnisse des CORAA-Fragebogens nicht erheblich von der Expertenmeinung ab. Demnach unterscheiden sich jeweils die ersten beiden sowie die letzten beiden Positionen im Ranking der Arbeitsstationen – Rangfolge von eins bis fünf. Vor dem Hintergrund, dass die Wahrnehmung zwischen der ausführenden Person und dem Vorgesetzten durchaus variieren kann, sind die Ergebnisse des Fragebogens als positiv zu bewerten, da sie nicht gänzlich voneinander abweichen. Vielmehr waren Unterschiede zu erwarten bzw. mit dem Fragebogen angestrebt, um die unterschiedlichen Wahrnehmungen der Personengruppen zum Ausdruck zu bringen. Die Ergebnisse des CXI-Fragebogens unterscheiden sich in dieser Hinsicht deutlich stärker. So wird die Komplexität der Arbeitsstation zwei im Vergleich zu den anderen Arbeitsstationen als deutlich geringer wahrgenommen, gemessen an den Bewertungen der Experten und den Bewertungen der Beschäftigten mit Hilfe des CORAA-Fragebogens. Bedingt durch diese Abweichung bzw. differenzierte Bewertung der Arbeitsstation ergeben sich auch für die Stationen drei und fünf abweichende

Bewertungen. In Anbetracht der Tatsache, dass der CXI-Fragebogen eine andere Zielsetzung – Messung der Produktionskomplexität – hat, waren Abweichungen zu erwarten, zumal der Fragebogen Dimensionen berücksichtigt, die im CORAA-Fragebogen nicht berücksichtigt werden, wie z. B. das Layout der Arbeitsstation. Angesicht dieser Angaben und der beschriebenen Randbedingungen können die erzielten Ergebnisse als zufriedenstellend eingestuft werden, so dass die Validität des Fragebogens als grundsätzlich gegeben angesehen werden kann.

5.5 Interpretation und kritische Würdigung der Ergebnisse

Das hier vorgestellte Verfahren bzw. Instrument (s. Anh. I) zeigt eine weitere Möglichkeit auf, wie bestehende Montagesysteme hinsichtlich der Einsatzpotenziale von informatorischen Assistenzsystemen bewertet werden können. Grundlage dafür bildet die wahrgenommene informatorische Komplexität des Beschäftigten in der manuellen Montage. Diese wird mit Hilfe der vier Konstrukte des entwickelten Fragebogens erhoben bzw. erfasst: (1) Dynamik und Flexibilität, (2) Produkt- und Montagevielfalt, (3) Kognitive Zusatzbelastung und Zeitaufwand und (4) Informationsbedarf und Umfang. Auf diese Weise werden zum einen unmittelbar die Personen befragt, die auch eine Unterstützungsleistung erhalten sollen, und zum anderen werden die unterschiedlichen Wahrnehmungen der einzelnen Personen erfasst, die bekanntlich durchaus variieren können. Der CORAA-Fragebogen verfolgt damit einen gänzlich neuen Ansatz, da die bisherigen Verfahren zur Potenzialabschätzung auf objektiven Daten beruhen (s. Abschn. 3.2), bei denen folglich nicht die Person im Mittelpunkt des Veränderungsprozesses steht.

Die Anwendung des CORAA-Fragebogens gestaltet sich dabei besonders intuitiv, da keine komplexen Berechnungen oder aufwendigen Erhebungen notwendig sind. Mögliche Vorbehalte gegenüber dem Einsatz des Instruments, z. B. hinsichtlich des Erhebungs- und Schulungsaufwands, werden damit auf ein Minimum reduziert. So kann die Methode z. B. im Rahmen eines Einführungsprojektes vom betrieblichen Anwender schnell eingesetzt werden, um verschiedene Arbeitssysteme für die Einführung eines informatorischen Assistenzsystems auszuwählen oder aber ein spezifisches Arbeitssystem hinsichtlich des Einsatzpotenzials zu bewerten. Der resultierende CORAA-Score repräsentiert dabei sowohl das humanorientierte als auch das wirtschaftliche Einsatzpotenzial, wobei eine monetäre Bewertung gegenwärtig noch nicht möglich ist. Aus den vier Dimensionen des Fragebogens lassen sich darüber hinaus – ergänzend

zum CORAA-Score – Problemfelder bzw. Handlungsfelder ableiten, die bei der Entwicklung eines informatischen Assistenzsystems berücksichtigt werden sollten. Dazu werden hohe Teilindikatoren und deren Items näher untersucht bzw. analysiert, um daraus Erkenntnisse und Schlüsse für die Entwicklung eines Assistenzsystems zu ziehen. Bestehende Defizite bzw. Forschungslücken in bestehenden Verfahren, die in ihrer Anwendung äußerst zeit-, kosten- und personalintensiv und wenig personenzentriert sind, werden mit dem vorliegenden Fragebogen geschlossen. Schließlich können Assistenzsysteme nur dann humanorientiert und wirtschaftlich eingesetzt werden, wenn die Person in der Montage auch den Bedarf hat und folglich im Mittelpunkt der Potenzialanalyse steht. Andernfalls kann es zu Fehlinvestitionen und psychischen Folgen bei den Beschäftigten kommen, wie z. B. Antriebs- oder Motivationslosigkeit (Hold et al., 2017; Keller et al., 2021).

Neben dem erfolgreichen Abschluss der explorativen Faktorenanalyse erfüllt der CORAA-Fragebogen auch die drei zentralen Gütekriterien der Fragebogenentwicklung – Objektivität, Reliabilität und Validität –, so dass es sich bei dem Fragebogen um ein geeignetes Instrument zur Prognose der Einsatzpotenziale von informatorischen Assistenzsystemen in bestehenden Arbeitssystemen handelt. Es ist jedoch zu berücksichtigen, dass die erhobene Datenbasis nur die Mindestanforderung in Bezug auf die Stichprobengröße darstellt (vgl. Bühner, 2011b). In Zukunft sollte der CORAA-Fragebogen daher weiter erprobt und optimiert werden.

6. Leitfaden zur Einführung von Montageassistenzsystemen

Das vorliegende Kapitel beruht auf folgender Vorveröffentlichung:

- Bendzioch, S., Bornewasser, M., & Hinrichsen, S. (2020). Einführung von Montageassistenzsystemen. In M. Bornewasser & S. Hinrichsen (Hrsg.), Informatorische Assistenzsysteme in der variantenreichen Montage: Theorie und Praxis (S. 135-157). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-662-61374-0_7

6.1 Ziel und Methodik

Die Einführung von informatorischen Montageassistenzsystemen birgt für jedes Unternehmen individuelle Herausforderungen und Hürden. Bestehende Ansätze zur Auswahl, Konfiguration und Implementierung von Assistenzsystemen bieten hierbei keine ausreichende methodische Unterstützung (s. Abschn. 3.3). Sie konzentrieren sich zum einen auf die konzeptionelle Gestaltung von Assistenzsystemen und zum anderen auf die organisatorischen und personellen Aspekte ihrer Einführung, womit eine ganzheitliche Betrachtung der Faktoren Mensch, Technik und Organisation fehlt. Die mit der Implementierung eines solchen Systems verbundenen Herausforderungen und Hürden sind dabei ebenso vielfältig wie die Gestaltungsmöglichkeiten der Assistenzsysteme selbst. Zu nennen sind hierbei z. B. die folgenden Punkte (Bendzioch et al., 2020b):

- Interdisziplinäre Zusammenarbeit zwischen gewöhnlich streng getrennten Bereichen bzw. Abteilungen wie der IT, Konstruktion und Arbeitsvorbereitung.
- Auswahl der „richtigen“ Aus- und Eingabegeräte für das informatorische Assistenzsystem aus der Vielzahl der am Markt angebotenen Geräte bzw. Technologien.
- Festlegung des Einführungsprozesses und der Projektorganisation, aber auch der finanziellen und personellen Ressourcen für die Durchführung einerseits und für die Aufrechterhaltung des Assistenzsystems andererseits.
- Berücksichtigung der bestehenden IT-Infrastruktur bei der Entwicklung bzw. dem Zukauf von Software, um Insellösungen, Wartungs- und Akzeptanzprobleme zu vermeiden.
- Auseinandersetzung mit den Risiken bei der Implementierung eines solchen Systems, insbesondere hinsichtlich der Akzeptanz und der Amortisationsdauer.

Bestätigt werden diese Herausforderungen und Hürden durch Studien von Geissbauer et al. (2014) und Kasselmann und Willeke (2018) mit dem Ergebnis, dass die

Einführung von informatorischen Assistenzsystemen häufig an fehlenden Implementierungsstrategien scheitert. Es bedarf also der Entwicklung eines ganzheitlichen Handlungsleitfaden zur Implementierung von informatorischen Assistenzsystemen in bestehenden Montagesystemen. Dabei bieten vor allem Phasen- und Vorgehensmodelle den Nutzenden einen bewährten Standard, der durch konkrete Vorgaben und Hinweise Orientierung, Sicherheit und Unterstützung schafft. Daher soll, wie bereits in Abschn. 1.3 und 3.4 beschrieben, im Rahmen der vorliegenden Arbeit ein Handlungsleitfaden entwickelt werden, der bei der bedarfsgerechten und wirtschaftlichen Konfiguration und Implementierung dieser Systeme unterstützt.

Basis für die Entwicklung des Handlungsleitfadens bildet der Leitfaden zur Einführung von informatorischen Assistenzsystemen von Kleineberg et al. (2017a, 2017b) (s. Abschn. 3.3). Dieser basiert auf dem praxisbewährten Sechs-Phasen-Modell des REFA-Standardprogramms zur Arbeitssystemgestaltung (REFA-Bundesverband e.V., 2014): (1) Analyse und Projektrahmen, (2) Ziele konkretisieren, (3) Grobplanung, (4) Feinplanung, (5) Realisieren und (6) Einsetzen. Konkret soll der Leitfaden um ausgewählte Inhalte, insbesondere hinsichtlich der technischen Ausgestaltung und Umsetzung, ergänzt werden, um Mensch, Technik und Organisation gleichermaßen zu berücksichtigen. Grundlage für die Weiterentwicklung des Leitfadens bilden die aus der Laborstudie (s. Kap. 4) und dem entwickelten Fragebogen (s. Kap. 5) gewonnenen Erkenntnisse, aus denen unter Berücksichtigung der wesentlichen Einflussfaktoren und Phaseninhalte Hinweise und Empfehlungen für die Auswahl und Konfiguration von informatorischen Assistenzsystemen abgeleitet werden sollen. Dabei werden die einzelnen Phasen sowohl um einzelne Methoden als auch um praxisbezogene Hinweise zur technischen Ausgestaltung und Umsetzung ergänzt. Die praxisbezogenen Inhalte basieren dabei zum einen auf zwei Einführungsprojekten (nähere Informationen s. Adrian et al. (2020) und Sehr et al. (2020)) und zum anderen auf Expertenworkshops aus dem eingangs erwähnten Forschungsprojekt „Montexas4.0“. An den Expertenworkshops nahmen zwei Professoren aus den Forschungsbereichen Arbeitspsychologie und Industrial Engineering, fünf wissenschaftliche Mitarbeitende aus den Bereichen Informatik, Industrial Engineering und Arbeitspsychologie sowie fünf Industrievertreter aus den Bereichen Produktionsleitung und Arbeitsvorbereitung teil. Diese verfügen allesamt über umfangreiche Erfahrungen in der manuellen Montage und haben bereits die Einführung eines informatorischen Assistenzsystems begleitet. Das Vorgehen orientiert sich damit an dem erfahrungsgeleiteten-intuitiven Ansatz (z. B. Bühner, 2011a), mit dem Ziel, auf

Basis von Expertenwissen Anforderungen zu identifizieren, die für die bedarfsgerechte Einführung eines informatorischen Assistenzsystems entscheidend sind. Folglich kann bei dem entwickelten Handlungsleitfaden von einem inhaltvaliden Instrument ausgegangen werden – qualitative Bewertung durch die Experten. Im Ergebnis sollen die identifizierten Forschungslücken bzw. Hemmnisse bei der Implementierung von informatorischen Assistenzsystemen geschlossen und die breite Nutzung dieser innovativen Systeme ermöglicht werden.

6.2 Herausforderungen und Rahmenbedingungen

Die Auswahl, Konfiguration und Einführung eines informatorischen Assistenzsystems ist durch eine Vielzahl bzw. ein Konglomerat an Einflussgrößen gekennzeichnet, welche im Rahmen des Handlungsleitfadens zu berücksichtigen bzw. zu thematisieren sind. Dabei besteht das Ziel darin, die wesentlichen Konfigurations- und Gestaltungsmöglichkeiten eines Assistenzsystems zu bestimmen ebenso wie den Einführungsprozess zu begleiten. Zu den wesentlichen Konfigurations- und Gestaltungsmöglichkeiten gehört die Festlegung, in welcher Form die Informationsausgabe, Informationsvermittlung und Informationseingabe erfolgen soll und über welche Schnittstellen das System verfügen muss (s. a. Abschn. 2.3.4). Die Auswahl und Konfiguration wird dabei maßgeblich durch den Beschäftigten, die Arbeitsumgebung, die Montageaufgabe, den Systemschnittstellen und die Konfiguration des Arbeitssystems sowie deren Wechselwirkungen beeinflusst (Geiser, 1997; Haase et al., 2020a; Hinrichsen, 2020). Gleichermaßen zeigt der durchgeführte Laborversuch (s. Kap. 4), dass sowohl das beamergestützte als auch das tabletgestützte Assistenzsystem für das untersuchte Montagesystem zum Einsatz kommen kann. Somit gibt es nicht unbedingt nur die eine „richtige“ Lösung, vielmehr können eine ganze Reihe von Assistenzsystemen in Frage kommen, wodurch die Auswahl eines Systems zusätzlich erschwert wird. Letztlich sind die Präferenzen des Beschäftigten, das geplante Budget und die zu beeinflussende Zielgröße entscheidend für die Auswahl des Assistenzsystems, um einerseits den Beschäftigten in der Montage zu entlasten und zu motivieren und andererseits einen wirtschaftlichen Mehrwert zu generieren.

Um diesen Herausforderungen und Rahmenbedingungen gerecht zu werden, gliedert sich der Handlungsleitfaden, wie bereits erwähnt, in sechs Phasen, wobei der betriebliche Anwender vom Beginn des Einführungsprojektes bis zur Umsetzung begleitet wird. Der Schwerpunkt liegt dabei auf der Bedarfs- und Anforderungsermittlung in den

Phasen I und II, gefolgt von der Auswahl und Konfiguration des Assistenzsystems in Phase III. Im Anschluss an die Festlegung eines Assistenzsystemtyps erfolgt in Phase IV die Detailplanung des informatorischen Assistenzsystems. Darauf folgt die Realisierung – Phase V– und der Einsatz des Systems in der Praxis bzw. im Arbeitssystem – Phase VI. Dazu werden in den einzelnen Phasen Methoden und Informationen zu relevanten Normen bzw. Vorschriften praxisorientiert bereitgestellt. Auf diese Weise kann der Einführungsprozess eines solchen Systems sowohl unter personell-organisatorischen als auch unter technischen Gesichtspunkten erfolgreich gestaltet werden. Im nachstehenden Abschn. werden die einzelnen Phasen und die damit verbundenen Aufgaben zur Auswahl, Konfiguration und Einführung beschrieben.

6.3 Phasenmodell zur Einführung eines Montageassistenzsystems

6.3.1 Phase I – Ausgangsanalyse und Projektrahmen

Das Einführungsmodell beginnt mit der Analyse der Ausgangssituation und der Festlegung des Projektrahmens. Zur Analyse der Ausgangssituation empfiehlt es sich, die für die Einführung von Montageassistenzsystemen in Frage kommenden Montagesysteme mit Hilfe des CORAA-Fragebogens durch alle am Arbeitssystem beschäftigten Personen zu bewerten (s. Anh. I). Die Auswahl der Arbeitssysteme kann dabei verschiedene Hintergründe haben, beispielsweise aufgrund von Beschwerden der Beschäftigten oder Produktivitätsproblemen. Mit der Quantifizierung des Gesamteinsatzpotenzials – CORAA- Score – zeigt sich, welches bzw. inwieweit das ausgewählte Montagesystem Potenzial für den Einsatz eines informatorischen Assistenzsystems aufweist. Die Bewertung erfolgt dabei entsprechend der Tab. 5.16 (s. Abschn. 5.3.5). Zeigen sich im Rahmen der Bewertung keine Potenziale auf, werden andere Maßnahmen empfohlen, um Akzeptanzprobleme und Fehlinvestitionen zu vermeiden (vgl. Hinrichsen, 2020; Hold et al., 2017; Keller et al., 2021).

Mit der Feststellung des Einsatzpotentials ist es notwendig, die bestehenden informatorischen Defizite im Arbeitssystem zu identifizieren, um das eigentliche Problem und folglich das Ziel näher zu spezifizieren. Zur Identifikation der informatorischen Defizite im Arbeitssystem können die Teilindikatoren des CORAA-Fragebogens herangezogen werden. Dabei wird zwischen den Dimensionen (1) Dynamik und Flexibilität, (2) Produkt- und Montagevielfalt, (3) Kognitive Zusatzbelastung und Zeitaufwand und (4) Informationsbedarf und -umfang differenziert. Als Maßstab für die Bewertung und Interpretation der Teilindikatoren dient ebenfalls die Tab. 5.16 in Abschn. 5.3.5. Hierdurch

können bereits erste Schwerpunkte für die Entwicklung des informatorischen Assistenzsystems bzw. die gegenwärtigen Herausforderungen abgeleitet werden. Eine nähere Analyse der zu den Dimensionen gehörenden Items kann ferner darüber Auskunft geben, in welchem spezifischen Kontext das Problem besteht. Eine hohe Bewertung des Items „Es müssen oft Entscheidungen getroffen werden, ohne dass ausreichende Informationen zur Verführung stehen“ deutet z. B. darauf hin, dass der Entscheidungsprozess, z. B. bei der Auswahl eines Teils oder Hilfsmittels, aufgrund der hohen Dynamik im Arbeitssystem mit Hilfe des Assistenzsystems unterstützt werden muss. Um die verschiedenen Auslöser und Hintergründe der Itembewertungen näher zu spezifizieren, eignen sich vor allem informelle Gespräche mit den Beschäftigten aus der Montage und vorgelagerten Prozessen wie z. B. aus der Arbeitsvorbereitung oder der Konstruktion. Ergebnisse und Zusammenhänge der Analyse sollten mit Hilfe des Arbeitssystemansatzes (s. Abb. 2.1 in Abschn. 2.1.3) zunächst grob beschrieben werden, um den Projektrahmen festzulegen.

Ausgehend von den Beschreibungen der bestehenden Defizite sowie der allgemeinen Rahmenbedingungen im Arbeitssystem sind die Projektziele unter Berücksichtigung der verschiedenen Akteure – u. a. Betriebsleitung, Beschäftigte aus der Montage, IT-Abteilung, Betriebsrat – zu definieren. Die Zielsetzungen sollten dabei möglichst der SMART-Regel entsprechen, d. h. sie sollten **s**pezifisch, **m**essbar, **a**nspruchsvoll, **r**ealistisch und **t**erminiert sein (Doran, 1981). Hierbei können zudem Methoden des Zielmanagements eingesetzt werden, wie z. B. die OKR-Methode (Objectives and Key Results, s. Wodtke (2016)). Mit den Projektzielen werden auch die Projektinhalte festlegt. Dabei ist darauf zu achten, dass neben den Projektinhalten vor allem der Projektumfang festgehalten und begrenzt wird (Toutenburg & Knöfel, 2009), d. h., dass auch die Inhalte definiert werden, die außerhalb des Einführungsprojekts liegen. Auf diese Weise wird ein gemeinsames Verständnis über die Ziele und den Umfang des Projektes geschaffen. In diesem Zusammenhang ist ferner festzuhalten, welche Personen im Projektteam involviert sind und welche Rollen bzw. Funktionen sie einnehmen, um die personellen und finanziellen Ressourcen für die Projektdurchführung zu klären. Abgeschlossen wird die erste Phase mit der Erstellung eines ersten Meilensteinplans, der sich an den Phasen des Handlungsleidfadens orientiert. In Abb. 6.1 sind die einzelnen Inhalte und Ziele der ersten Projektphase dargestellt.

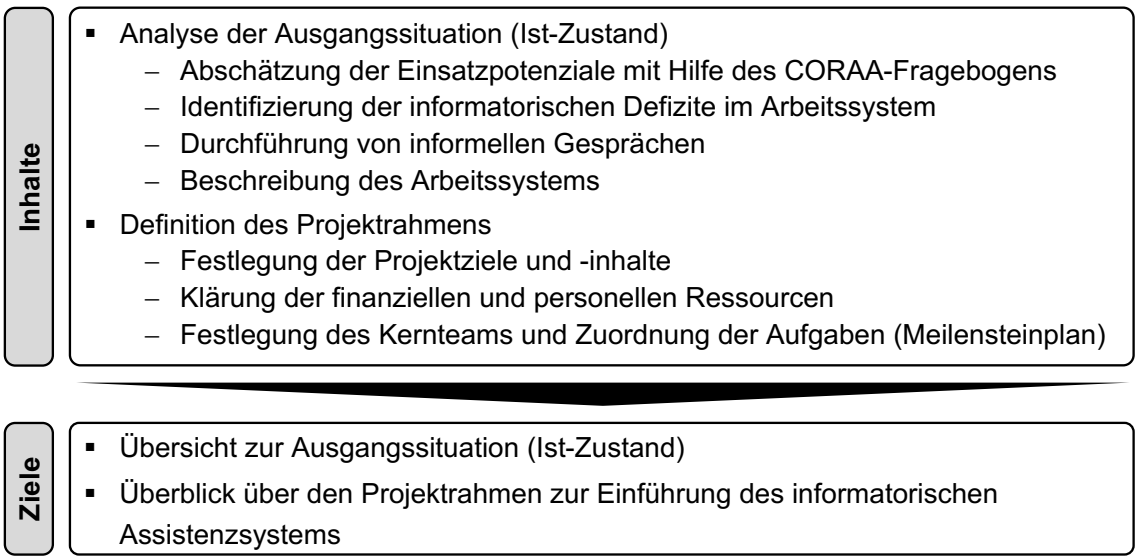


Abb. 6.1 Phase I des Handlungsleitfadens im Überblick (Bendzioch et al., 2020b, modifiziert)

6.3.2 Phase II – Konkretisierung der Projektziele

In der zweiten Phase werden auf Basis der definierten Projektziele – z. B. Reduzierung der Montagefehler und/ oder der Ausführungszeit – die spezifischen Anforderungen an das informatorische Assistenzsystem schrittweise ermittelt und festgelegt, um ein umfassendes Bild davon zu erhalten, was das System im Detail leisten muss – Konkretisierung der Zielsetzung. Im Kern geht es dabei darum, die sog. W-Fragen im Kontext des Montagesystems zu beantworten – **W**ie, **W**as, **W**ann, **W**o, **W**er, **W**arum, **W**omit und **W**ozu. Ausgangspunkt für die Ermittlung der Anforderungen an das assistenzgestützte Montagesystem bildet die Durchführung einer Nutzungskontextanalyse entsprechend der DIN EN ISO 9241-11 (2018). Bezug nehmend auf die bereits ermittelten informatorischen Defizite und die identifizierten Entwicklungsschwerpunkte – Phase I – werden die Beschäftigten im Rahmen der Nutzungskontextanalyse im Arbeitssystem beobachtet und anschließend erneut befragt, so dass ein möglichst ganzheitliches Verständnis über die Arbeitsinhalte gewonnen wird. Im Mittelpunkt der Analyse stehen die Beschäftigten, die Ziele, die Aufgaben, die Ressourcen und das Umfeld des Arbeitssystems (DIN EN ISO 9241-11, 2018). Bei der Beobachtung werden die Beschäftigten im Rahmen ihrer Tätigkeit begleitet, um aus dem gegebenen Arbeitskontext weitere Anforderungen an das Assistenzsystem ableiten zu können. Hierbei stehen z. B. folgende Fragestellungen im Mittelpunkt der Analyse (Bendzioch et al., 2020b):

- Wie gestaltet sich der Montageprozess im Detail? Welche Probleme treten auf?

- Wie werden aktuell Informationen zu einzelnen Prozessschritten bereitgestellt? Wie sollten Informationen künftig bereitgestellt werden?
- Welche Arbeits- und Betriebsmittel werden aktuell verwendet? Welche Arbeits- und Betriebsmittel werden künftig benötigt?
- Was sind Ursachen für bestehende Verteilzeiten im Montagesystem?

Ergänzend zu den Beobachtungen müssen auch die Erfahrungen, Erwartungen, Arbeitsweisen und Besonderheiten der Arbeitsperson – trägt z. B. eine Sehhilfe oder hat anderweitige Einschränkungen – erfasst werden (s. a. Abb. 2.4 in Abschn. 2.2.1). Zu diesem Zweck werden neben den Beobachtungen auch die zuvor erwähnten Interviews durchgeführt. Zugleich erhalten die Beschäftigten auf diese Weise auch die Möglichkeit, ihre Ideen zur Lösung der Problemstellung zu äußern. Zum einen können dadurch neue Impulse für das Einführungsprojekt gewonnen werden, und zum anderen werden die Beschäftigten gezielt in den Veränderungsprozess einbezogen.

Aufbauend auf den Beobachtungen und Interviews werden in einem dritten Schritt der Nutzungskontextanalyse detaillierte Angaben zu den im Arbeitssystem verarbeiteten Datenformaten und Informationen, wie Produktdaten und Arbeitsanweisungen, erhoben. In erster Linie geht es hierbei um die Erfassung, welche Daten in welcher Form und zu welchem Zeitpunkt benötigt werden – Informationsfluss und Schnittstellen im Arbeitssystem. Die Nutzungskontextanalyse schließt mit der Erfassung der zu berücksichtigenden Umgebungsbedingungen wie z. B. Lärm, Licht und Vibrationen ab.

Zur Abstimmung eines finalen Anforderungskatalogs sind die ermittelten Anforderungen aus der Nutzungskontextanalyse – Beobachtungen, Interviews, Datenanalyse und Umfeldanalyse – stets zu dokumentieren und im Kernteam zu diskutieren. Hierzu eignet sich insbesondere das in Tab. 6.1 dargestellte Lastenheft. Dieses orientiert sich an der VDI/VDE/VDMA 2632-2 (2015), welche die Ermittlung der Anforderungen an ein Bildverarbeitungssystem zum Gegenstand hat und an die spezifischen Anforderungen eines informatorischen Assistenzsystems angepasst wurde. Um ein möglichst umfassendes Anforderungsprofil zu erstellen, fanden insbesondere die Merkmale der in Abschn. 3.3 vorgestellten morphologischen Ansätze Berücksichtigung. Das Lastenheft gliedert sich dabei in vier Bereiche: Aufgabenstellung und Zielsetzung, Montageprozess, Umwelteinflüsse und Mensch-Maschine-Schnittstelle. Damit werden die wesentlichen Merkmale zur Auswahl und Konfiguration eines Assistenzsysteme nach Geiser (1997), Haase et al. (2020a) und Hinrichsen (2020) bestimmt und festgehalten.

Tab. 6.1 Lastenheft zur Ermittlung der Anforderungen an ein informatorisches Assistenzsystem in Anlehnung an die VDI/VDE/VDMA 2632-2 (2015)

	Einflussgröße	Hinweis	Beschreibung
1 – Aufgabenstellung und Zielsetzung			
1.1	Einordnung der Aufgabenstellung	*Grobe Skizzierung der Aufgabe im Hinblick auf die Fragestellung „Wobei soll das Assistenzsystem unterstützen?“, beispielsweise beim Fügen, Handhaben, Justieren, Prüfen, Hilfsvorgängen oder Rüsten.*	
1.2	Bisherige Vorgehensweise	*Wie wurde die Aufgabenbearbeitung bisher durchgeführt? Wo liegen die bisherigen Stärken und Schwächen des Informationsmanagements sowie des Arbeitssystems? Wie wirkt sich die gegenwärtige Situation auf die Beschäftigten aus? Welche Wünsche werden von den Beschäftigten geäußert?*	
1.3	Montageobjekte	*Beschreibung der Montageobjekte bezüglich Varianz, Abmessungen, Losgrößen, Toleranzen, Verschmutzungen und Materialien.*	
1.4	Zielsetzung	*Detaillierte Beschreibung der Aufgabenstellung für das zu entwickelnde bzw. implementierende informatorische Assistenzsystem. Welche Zielgrößen sollen dabei durch den Einsatz des informatorischen Assistenzsystems beeinflusst werden, wie z. B. die Reduzierung von Montagefehlern, der Ausführungs- bzw. Anlernzeit oder die Erhöhung der Montageflexibilität?*	
2 – Montageprozess			
2.1	Montagesystemtyp	*Baustellenmontage, Einzelplatzmontage, Reihenmontage, Fließmontage, Taktmontage, Werkstattfertigung*	
2.2	Positionierung des Montageobjekts	*Vorrichtung, variable Positionierung im Arbeitssystem, ortsveränderliches Montageobjekt*	
2.3	Arbeits- und Betriebsmittel	*Benennung der Arbeits- und Betriebsmittel, welche für die Durchführung der Montageaufgaben erforderlich sind.*	

Tab. 6.1 Fortsetzung I

	Einflussgröße	Hinweis	Beschreibung
2.4	Materialbereitstellung	*Beispielsweise artikelweise in Kleinladungsträgern, auf Paletten oder produkt- bzw. auftragsbezogen in einem separaten Ladungsträger. Wie erfolgt die Kennzeichnung der Teile? Wie viele Teile stehen im Arbeitssystem dauerhaft bereit und müssen vom Beschäftigten unterscheiden werden?*	
2.5	Prozessüberwachung	*Wie erfolgt die gegenwärtige Qualitätssicherung? Sind Änderungen erforderlich? Wenn ja, wie soll die Qualitätssicherung während der Montage erfolgen, z. B. manuell, hybrid, automatisch?*	
2.6	Zeitliche Anforderungen	*Zu berücksichtigende Restriktionen in Bezug auf die geforderte Taktrate, Durchsatz, Reaktionszeit, Rüstzeit und Wartung.*	
2.7	Besondere Anforderungen	*Reinraumtauglichkeit, IP-Schutzklasse, Werksvorschriften, Beschäftigte, Zugänglichkeit zum Arbeitssystem, Abmessungen des Arbeitssystems*	
3 – Umgebungseinflüsse			
3.1	Vibrationen, Schwingungen, Erschütterungen	*Z. B. während des Montageprozesses oder aus der unmittelbaren Umgebung, welche die Funktion des Assistenzsystems beeinflussen könnten.*	
3.2	Ausleuchtung	*Wechselnde Lichtverhältnisse, z. B. durch Sonnenlicht; gleichbleibende Lichtverhältnisse, z. B. durch Leuchtstofflampen; Angaben zur Lichtintensität*	
3.3	Klima, Fremdstoffe in der Luft	*Umgebungstemperatur, Luftfeuchtigkeit, Stäube, Öl-Nebel, Dämpfe*	
4 – Mensch-Maschine-Schnittstelle			
4.1	Bedienkonzept	*Wie, wann und wo sollen die Informationen für die Beschäftigten bereitgestellt werden? Soll die Information einmalig, Schritt für Schritt oder in Teilschritten bereitgestellt werden? Wie soll die Informationseingabe gestaltet sein, z. B.*	

Tab. 6.1 Fortsetzung II

	Einflussgröße	Hinweis	Beschreibung
		mittels Sensoren oder Spracheingabe? Festlegung der Sprache, der Zugriffsrechte, des Adaptionsgrads des Assistenzsystems, der Auftragsverwaltung, usw.	
4.2	Assistenzsystem Schnittstellen	*Wozu sollen die Daten bzw. Informationen aus dem Assistenzsystem verwendet werden? Beispielsweise zur Dokumentation, Anlagensteuerung, Produktionssteuerung (z. B. MES, ERP), Datenbanken, QMS, Transporteinrichtung, Roboter, Werkzeug usw.*	
4.3	Ein- und Ausgänge des Assistenzsystems	*Festlegung der Ein- und Ausgänge des Assistenzsystems auf Basis der bereits zuvor beschriebenen Anforderungen (z. B. Ethernet, WLAN, Digital I/O, RS232, Datenprotokoll (TCP/ IP, Feldbus)). Zudem sind die zu berücksichtigenden Datenformate festzulegen, die im Assistenzsystem verarbeitet werden müssen.*	

Um die Projektziele weiter zu spezifizieren und ein gemeinsames Verständnis für das zu entwickelnde Assistenzsystem zu schaffen, sollten die definierten Anforderungen an das Assistenzsystem mit allen Projektbeteiligten diskutiert und in Muss-/Kann-Kriterien klassifiziert werden. Zu diesem Zweck kann es hilfreich sein, sich vorab einen ersten Überblick über bestehende Assistenzsystemlösungen zu verschaffen – Technologiescreening. Hierzu bieten sich beispielsweise die Technologiekompendien von Apt et al. (2018) sowie Kasselmann und Willeke (2018) an (s. a. Abschn. 3.3). Unter Berücksichtigung der definierten Anforderungen und Klassifizierungen werden schließlich die Projektziele aus der ersten Projektphase weiter spezifiziert. Im Zuge der Änderungen bzw. Anpassungen der Projektziele ist zudem zu klären, ob Anpassungen im Projektteam vorgenommen werden müssen, wie z. B. die Einbeziehung von weiteren Key-Usern. Die Anpassung des Meilensteinplans an die neuen Gegebenheiten und Ziele versteht sich dabei von selbst. Eine Übersicht über die einzelnen Inhalte und Ziele der zweiten Projektphase ist in Abb. 6.2 dargestellt.

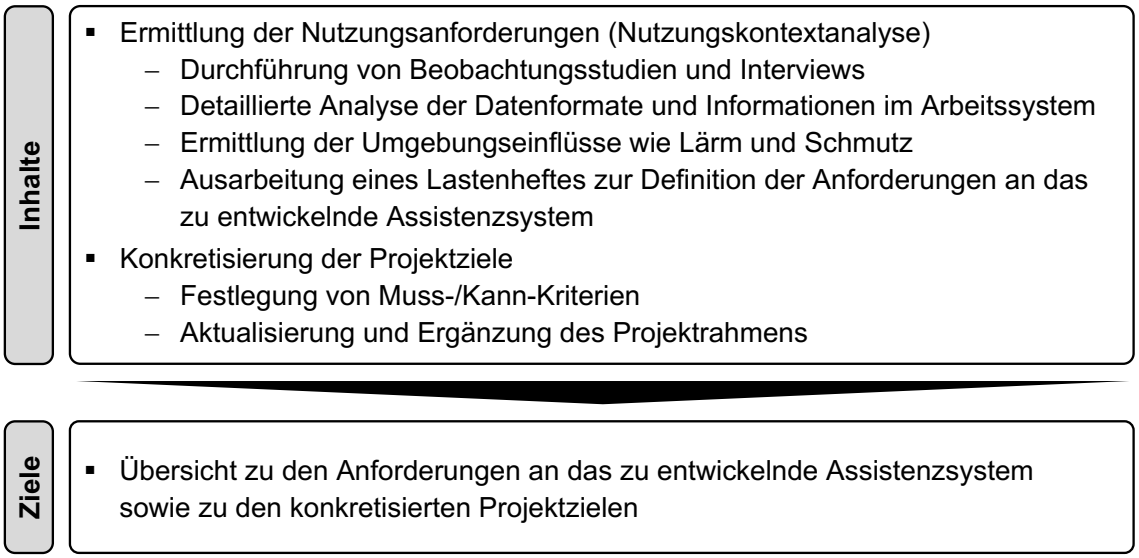


Abb. 6.2 Phase II des Handlungsleitfadens im Überblick (Bendzioch et al., 2020b, modifiziert)

6.3.3 Phase III – Grobplanung

Ausgehend von den definierten bzw. festgelegten Anforderungen an das zu entwickelnde informatorische Assistenzsystem – Ergebnisse der zweiten Projektphase – werden in der dritten Phase verschiedene Hardware- und Funktionskonzepte entwickelt und abschließend evaluiert. Im Ergebnis soll ein Grobkonzept des informatorischen Assistenzsystems mit allen wesentlichen Konfigurations- und Funktionsmerkmalen vorliegen. Dazu sind zunächst Hardwarekonzepte zu erstellen, ehe die dazugehörigen Funktionskonzepte ausgearbeitet werden. Beginnend mit der Erstellung der Hardwarekonzepte erfolgt die Bestimmung der für die Informationsausgabe und -eingabe erforderlichen Gerätetypen. Maßgeblich für die Auswahl der Ein- und Ausgabeeinheiten sind die formulierten Anforderungen an das Assistenzsystem sowie die definierten Projektziele – zu beeinflussende Stellgrößen. Einen ersten Hinweis darauf, welche Ausgabeeinheit sich für das angestrebte Ziel, beispielsweise die Reduzierung von Kommissionierfehlern, eignet, liefern die Ergebnisse der in Kap. 4 durchgeführten Laborstudie (s. Tab. 4.10 in Abschn. 4.8). Bei den Angaben ist jedoch stets zu berücksichtigen, dass sich die Empfehlungen auf eine Steh-Geh-Linie beziehen und für andere Montagesysteme durchaus anders ausfallen können. In gleicher Weise erlauben auch die Ergebnisse weiterer Vergleichsstudien (s. Tab. 3.3 in Abschn. 3.1) einen ersten Hinweis auf die Ausgabeeinheit, wobei zu beachten ist, dass diese die charakteristischen Faktoren des Paradigmenwechsels in der manuellen Montage – z. B.

Anlernzeit, Komplexität und Variantenvielfalt – nicht bzw. kaum berücksichtigen.

Neben der Auswahl der Ausgabeeinheit nach der zu beeinflussenden Zielgröße sind die definierten Anforderungen, insbesondere an die Mensch-Maschine-Schnittstelle, entscheidend für die Auswahl der Hardware. Einen Überblick über die wesentlichen Konfigurations- und Gestaltungsmöglichkeiten für ein informatorischen Assistenzsystem liefert die Tab. 2.1 (s. Abschn. 2.3.4). Dabei werden die festgelegten Anforderungen – u. a. Arbeitsaufgabe, Interaktionsmodell, Umgebung und Arbeitsperson – sowie die Muss-/Kann-Kriterien mit den möglichen Ein- und Ausgabeeinheiten verglichen. An dieser Stelle sei angemerkt, dass ein Grundverständnis über die Funktionen und Einsatzmöglichkeiten der einzelnen Merkmale eines informatorischen Assistenzsystems vorausgesetzt wird – nähere Informationen finden sich z. B. in den Technologiekompendien von Apt et al. (2018) und Kasselmann und Willeke (2018). Auf diese Weise lassen sich die zahlreichen Konfigurationsmöglichkeiten auf ein Minimum eingrenzen, erfordern aber von den Verantwortlichen gleichermaßen ein gewisses Maß an Erfahrung und Entschlossenheit. Eine Methodik, die aufgrund der Anforderungen und Ziele ein bestimmtes Hardwarekonzept vorgibt, wäre an dieser Stelle wünschenswert, ist allerdings angesichts der Tatsache, dass jedes Montagesystem mit seinen Aufgaben und den darin beschäftigten Personen für sich einzigartig ist, gegenwärtig noch nicht möglich – u. a. mäßige Studienlage und fehlende Erfahrungswerte aus der Praxis. Das Assistenzsystem muss insofern an die individuellen Gegebenheiten angepasst werden, damit es sowohl humanorientiert als auch wirtschaftlich ist.

An die Entwicklung alternativer Hardwarekonzepte schließt sich die Ausarbeitung der dazugehörigen Funktionskonzepte an. Das Funktionskonzept beschreibt dabei die Transformation der benötigten Daten bzw. Informationen in die für den späteren Beschäftigten bereitgestellten Montageinstruktionen und -hinweise. Grundlage hierfür bildet das in der Softwareentwicklung weit verbreitete 3-Schichten-Modell. Dieses Modell unterteilt die Software bzw. das Assistenzsystem in drei Ebenen bzw. Schichten (s. Abb. 6.3), die Datenschicht, die Logikschicht und die Grafikschicht bzw. Graphical User Interface (GUI) (z. B. Elmasri & Navathe, 2009; Maier et al., 2005). Hierarchisch bauen die Schichten dabei stets von unten nach oben auf, d. h. eine Änderung an der Datenschicht geht mit Änderungen an der Logik- und Grafikschicht einher (Maier et al., 2005). Elementare Voraussetzung für den Erfolg einer solchen Assistenzsystemarchitektur ist, dass die Datenbasis und Systemschnittstellen sehr sorgfältig spezifiziert und definiert werden, da andernfalls zeitaufwändige Nacharbeiten in allen Schichten notwendig sind.

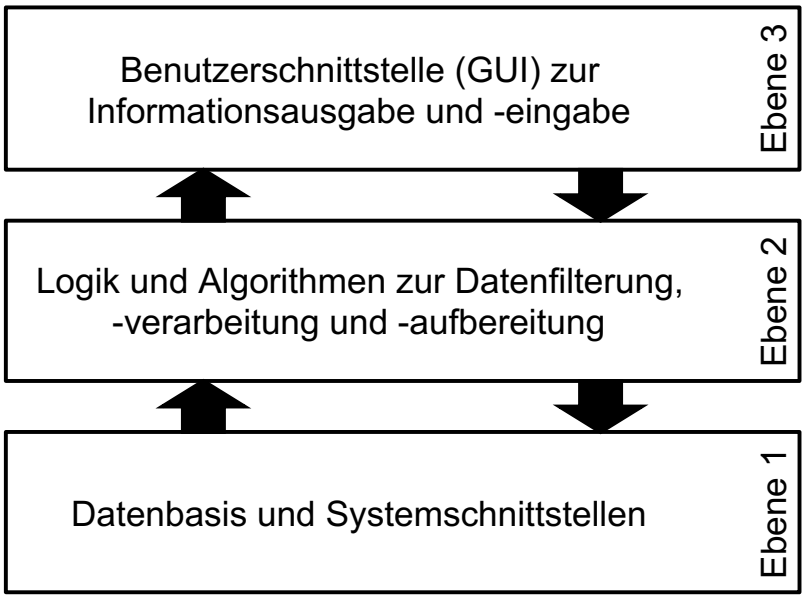


Abb. 6.3 Funktionskonzept bzw. Schichtenmodell eines informatorischen Assistenzsystems (Bendzioch et al., 2020b, modifiziert)

Vor diesem Hintergrund müssen alle Daten (z. B. Auftrags- und Produktdaten), Austauschformate bzw. -signale (z. B. Digital I/O, RS232, TCP/ IP, Feldbus) und Speicherorte festgelegt werden. Diese sollten bzw. müssen bereits mit der Erstellung des Lastenhefts definiert worden sein. Mit der zweiten Ebene werden die erforderlichen Logiken und Algorithmen zur Datenfilterung, -verarbeitung und -aufbereitung in Abhängigkeit vom gewählten Hardwarekonzept definiert, d. h. welche Logiken und Algorithmen werden benötigt, um die vom Beschäftigten benötigten Informationen bereitzustellen. Die dritte Ebene beinhaltet die grafische Aufbereitung der benötigten Informationen – Mensch-Maschine-Schnittstelle –, welche insbesondere von den gewählten Ein- und Ausgabeeinheiten abhängig ist. An dieser Stelle empfiehlt es sich, die beschriebenen Abhängigkeiten und Wechselwirkungen des Funktionskonzeptes in einem Ablaufdiagramm mit einem hohen Abstraktionsgrad (z. B. nach der DIN 66001 (1983)) festzuhalten. Funktionseinheiten, wie z. B. bestimmte Algorithmen, werden dabei zunächst grob benannt bzw. beschrieben und erst im Feinkonzept (Phase IV) detailliert ausgearbeitet. Als Ergebnis sollten an dieser Stelle zwei bis drei Grobkonzepte für die in Phase zwei ermittelten Anforderungen vorliegen, welche die benötigten Hardwaretypen, Assistenzfunktionen und -ausgaben beinhalten. Diese Systemprofile sollten mit dem am Markt verfügbaren Softwarelösungen bzw. Assistenzsystemen verglichen werden, um eine Entscheidung hinsichtlich des Zukaufs oder der Eigenentwicklung treffen zu können – „Make-or-Buy“. Im Zuge dessen sollten auch die möglichen

Investitionskosten zur Umsetzung der einzelnen Assistenzsystemkonzepte eruiert werden.

Die dritte Phase schließt mit einer Bewertung der entwickelten Hardware- und Funktionskonzepte ab. Dazu sollten die einzelnen Entwürfe dem gesamten Projektteam vorgestellt werden, wobei die Vorteile, die Einschränkungen, die Investitionskosten sowie die Erfüllung der vorab definierten Anforderungen aufzuzeigen sind. Bei der anschließenden Bewertung spielen die festgelegten Key-User eine zentrale Rolle, schließlich müssen diese mit dem System später interagieren und arbeiten. Unter Berücksichtigung der kalkulierten Investitionskosten und der Bewertung der Assistenzsystemkonzepte erfolgt seitens der Projektleitung eine Entscheidung hinsichtlich eines Konzeptes. Die zentralen Inhalte und Ziele der dritten Phase sind in Abb. 6.4 zusammengefasst.

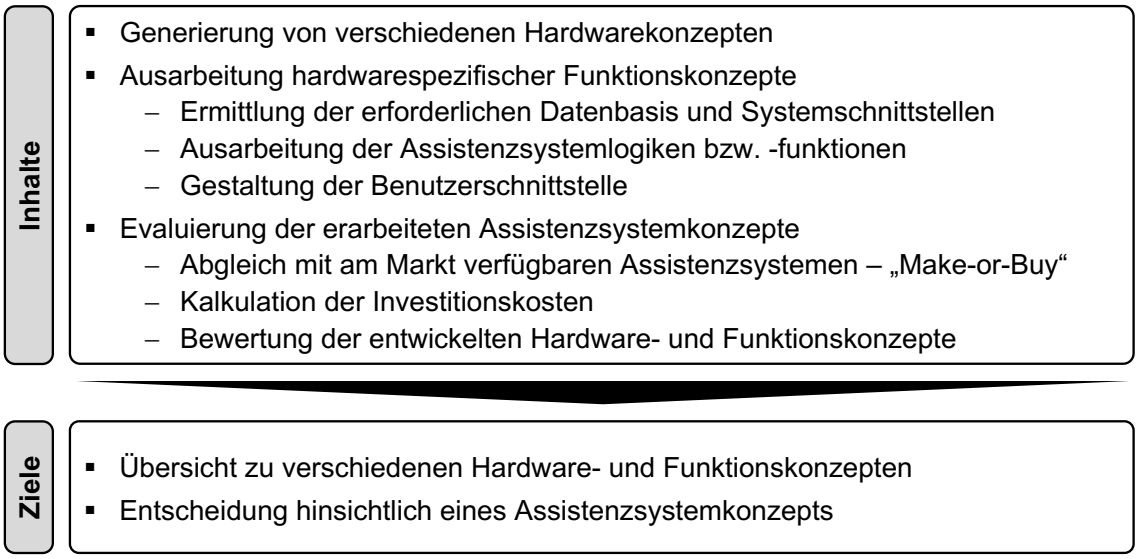


Abb. 6.4 Phase III des Handlungsleitfadens im Überblick (Bendzioch et al., 2020b, modifiziert)

6.3.4 Phase IV – Feinplanung

Mit der Entscheidung hinsichtlich eines Grobkonzepts erfolgt im Rahmen der vierten Phase die detaillierte Ausarbeitung des dazugehörigen Hardware- und Funktionskonzepts. Damit liegen am Ende der Phase konkrete Informationen über die benötigten Hardwarekomponenten und über die Assistenzsystemarchitektur vor, so dass das System in einem nächsten Schritt – Phase fünf – realisiert bzw. implementiert werden kann.

Mit Blick auf die spätere Realisierung und Implementierung ist zunächst festzulegen, wie das Assistenzsystem implementiert werden soll. So kann das Gesamtsystem oder

vorerst nur eine Teillösung realisiert werden, oder aber das entwickelte Gesamt- bzw. Teilsystem kann vorerst nur in einem Teil des Montagesystems oder direkt im gesamten Montagesystem eingesetzt werden (nähere Informationen zu den Implementierungsstrategien z. B. Reiss (1997)). Abhängig von der gewählten Implementierungsstrategie und den damit zu berücksichtigenden Randbedingungen erfolgt die detaillierte Ausarbeitung des Assistenzsystems. Analog zur Grobplanung wird dabei mit der Planung der Hardware begonnen. Entsprechend der Anforderungen im Arbeitssystem und einer ggf. zugekauften Assistenzsystemsoftware sind die zu berücksichtigenden Hardwarekomponenten, wie Sensoren, Aktoren, Ausgabeeinheiten, auszuwählen, wobei insbesondere die Umgebungs- und Arbeitsbedingungen zu berücksichtigen sind. Beispielsweise kann das Tragen von Arbeitshandschuhen dazu führen, dass ein anderer Taster gewählt werden muss, oder die helle Arbeitsumgebung kann einen Beamer mit einer höheren Lichtstärke erfordern. Gleichermaßen müssen innerbetriebliche Vorgaben in Bezug auf Schutzklassen, beispielsweise ESD (Electro Static Discharge), oder anderweitige Vorgaben Berücksichtigung finden. Mit der Einbindung der Assistenzsystemhardware eng verbunden ist zudem die benutzerzentrierte Arbeitsplatzgestaltung. Dies umfasst z. B. Anpassungen an der Beleuchtung, der Arbeitshöhe, der Position von Behältern und Werkzeugen. Dabei können auch entsprechende Normen und Vorschriften zur ergonomischen Gestaltung von Arbeitsplätzen herangezogen werden – z. B. DIN EN ISO 26800 (2011) oder Schmauder und Spanner-Ulmer (2014). Zur Vermeidung von Planungsfehlern sind die Ergebnisse im Projektteam kurzzyklisch auszutauschen sowie abhängig vom Hardwareumfang in Konstruktions- und Schaltplänen festzuhalten.

Im Falle einer Eigenentwicklung der Software schließt sich an die Spezifikation der Hardwarekomponenten die detaillierte Planung der Assistenzsystemarchitektur an (vgl. Abb. 6.3). Dazu wird das im Vorfeld mit einem hohen Abstraktionsgrad erstellte Ablaufdiagramm in ein Backend – Datenverarbeitung und -speicherung – und ein Frontend – Benutzeroberfläche – überführt. Auch wenn hierarchisch die Datenbank das grundlegende Element ist, gefolgt von den Algorithmen und Logiken, sollte die Detailplanung mit der Benutzeroberfläche – Frontend – beginnen (Fried et al., 2006). Dieses Vorgehen ermöglicht es, schneller Feedback einzuholen und umzusetzen, eine klare Vision zu vermitteln und schließlich den Beschäftigten in der Montage in den Mittelpunkt der Entwicklung zu stellen (Prerender, 2021). Zu diesem Zweck werden sogenannte Wireframes erstellt, die ein Abbild der zukünftigen Benutzeroberfläche darstellen. Mit

ihnen lässt sich die Anordnung einzelner Systemelemente überprüfen, welche die Interaktion zwischen Assistenzsystem und User bestimmen (Ott, 2018). Im Rahmen der Konzeption und Gestaltung der Benutzeroberflächen sind verschiedene Gestaltungsanforderungen zu berücksichtigen. Gemäß der DIN EN ISO 9241-110 (2008) lassen sich diesbezüglich sieben Anforderungskriterien anführen: Aufgabenangemessenheit, Lernförderlichkeit, Selbstbeschreibungsfähigkeit, Erwartungskonformität, Fehlerrobustheit, Steuerbarkeit und Individualisierbarkeit. Ergänzend zu dieser Norm sind auch Gestaltungshinweise aus der Software-Ergonomie mit einzubeziehen, z. B. zur Anordnung von Elementen oder zur Auswahl von Schriftarten, Farben oder Symbolen (DGUV, 2016; Schmidtke & Jastrzebska-Fraczek, 2013). Unmittelbar mit der Entwicklung der Benutzeroberfläche bzw. der Erstellung der Wireframes verbunden ist die Gestaltung der Arbeitsanweisungen – elementare Funktion des Assistenzsystems. Wie in Abschn. 2.3.1 beschrieben, können die Informationen ausgehend von den definierten Anforderungen entweder sequentiell – Schritt für Schritt – oder im Überblick zum gesamten Montageprozess bereitgestellt werden. Dabei sind insbesondere die Bedürfnisse und Erfahrungen der Beschäftigten in der Montage zu berücksichtigen, um Überforderung auf der einen und Unterforderung auf der anderen Seite zu vermeiden (s. a. Abschn. 2.2.4), so dass die Informationen leicht aufgenommen und verarbeitet werden können – Kompatibilitätsprinzip (vgl. Strasser, 1993). Vor diesem Hintergrund sollten bei der Gestaltung des Layouts bzw. der Form der Arbeitsanweisung einschlägige Informationen zur anforderungsgerechten Gestaltung Berücksichtigung finden – s. hierzu Abschn. 2.3.1. Die Überprüfung der erstellten Wireframes erfolgt im Rahmen von Usability-Studien mit den zuvor definierten Key-Usern. Hierbei kann es hilfreich sein, im Vorfeld einen Fragenkatalog zu erstellen, der z. B. folgende Fragen beinhaltet (Bendzioch et al., 2020b; DGUV, 2016; Hamborg, 2002; Prümper, o.J.):

- Ist die Schriftgröße ausreichend, zu groß oder zu klein?
- Sind die gewählten Darstellungen auf Anhieb zu verstehen?
- Bietet die Software alle Funktionen, um die anfallenden Aufgaben zu erledigen?
- Sind die verwendeten Begriffe, Bezeichnungen und Symbole verständlich?
- Ist die Anwendung der Software auch ohne fremde Hilfe erlernbar?
- Sind alle benötigten Informationen zur Ausführung der Tätigkeiten vorhanden?

Nach dem Entwurf einer bedarfsgerechten und anwenderfreundlichen Benutzeroberfläche inkl. Arbeitsanweisung erfolgt die Entwicklung des Backends. In diesem werden alle für die Benutzeroberfläche erforderlichen Logiken, Algorithmen und Schnittstellen

hinterlegt bzw. entwickelt. Hierzu wird das bereits in Phase drei erstellte Ablaufdiagramm an ggf. neue Gegebenheiten angepasst und um konkrete Funktionen ergänzt. Das Ziel besteht dabei nicht in der vollständigen Programmierung des Backends, vielmehr sollen die einzelnen Funktionalitäten des Assistenzsystems ausgearbeitet und entwickelt werden – Programmierung von Teilfunktionen. Im Zuge der detaillierten Ausarbeitung des Backends sollten zudem mögliche Schwachstellen und Risiken analysiert und beschrieben werden, so dass Datensicherheitskonzepte entwickelt und implementiert werden können, die die Vertraulichkeit, Integrität und Verfügbarkeit der Daten gewährleisten (Badertscher & Scheuring, 2007; Heidemann & Zumbruch, 2012). Die einzelnen Inhalte und Ziele der dritten Phase sind in Abb. 6.5 dargestellt.

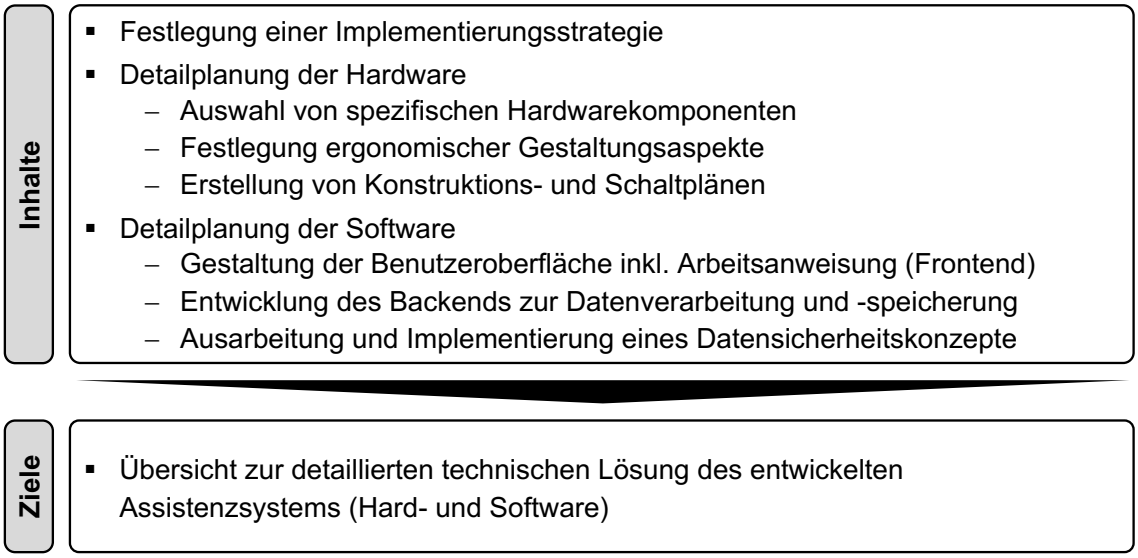


Abb. 6.5 Phase IV des Handlungsleitfadens im Überblick (Bendzioch et al., 2020b, modifiziert)

6.3.5 Phase V – Realisierung

Die fünfte Phase umfasst die Realisierung des entwickelten informatorischen Assistenzsystems auf der Grundlage des Feinkonzepts und der definierten Implementierungsstrategie. Ziel ist es, das Assistenzsystem mit allen Funktionalitäten und Bestandteilen zu realisieren, so dass eine erste Testinbetriebnahme erfolgen kann. Hierbei empfiehlt es sich, unabhängig von der Einführungsstrategie, das Assistenzsystem zunächst in einer Testumgebung einzurichten bzw. aufzubauen, um losgelöst vom Produktionsprozess erste Erfahrungen sammeln zu können. Anders als bei der Entwicklung findet die Realisierung der Assistenzsystemhardware und -software parallel statt. Hierzu werden einerseits die festgelegten Hardwarekomponenten beschafft bzw.

angefertigt und andererseits die Software zugekauft bzw. auf Basis der Feinplanung iterativ entwickelt und programmiert. Durch die enge Verzahnung von Hard- und Software ist an dieser Stelle des Einführungsprojektes insbesondere auf die Schnittstellenkommunikation zu achten, z. B. in Form von kurzzyklischen Teambesprechungen und Feedbackschleifen, damit unnötige Fehler in der Umsetzung vermieden werden. Abhängig davon, ob die Arbeitsanweisungen durch einen Algorithmus selbst bzw. automatisch generiert werden, sind diese andernfalls von der Arbeitsvorbereitung zu erstellen. Unabhängig davon sind Betriebsanweisungen für das Assistenzsystem sowie Materialien zur Schulung der Arbeitspersonen anzufertigen.

Mit der Realisierung des informatorischen Assistenzsystems erfolgt der erste Testbetrieb unter Einbeziehung der Key-User. Im Fokus steht dabei die Usability des Systems sowie eventuelle Fehler bzw. Probleme in der Arbeitsausführung. Dafür werden die Key-User mit Hilfe der Qualifizierungsunterlagen an dem realisierten Assistenzsystem geschult und der Probebetrieb aufgenommen. Zur Beurteilung der Gebrauchstauglichkeit des Systems kann z. B. der SUS-Fragebogen (System Usability Scale) herangezogen werden (s. Brooke, 1996). Im Zuge der Erprobungsphase kann zudem eine erste Bewertung hinsichtlich der Erreichung der definierten Ziele erfolgen, beispielsweise die Reduzierung der Montagefehler um 30 %. Etwaige Fehler bzw. Probleme sind systematisch zu beheben, bis das System die gestellten Anforderungen erfüllt. Die einzelnen Phaseninhalte sind in Abb. 6.6 zusammengefasst.

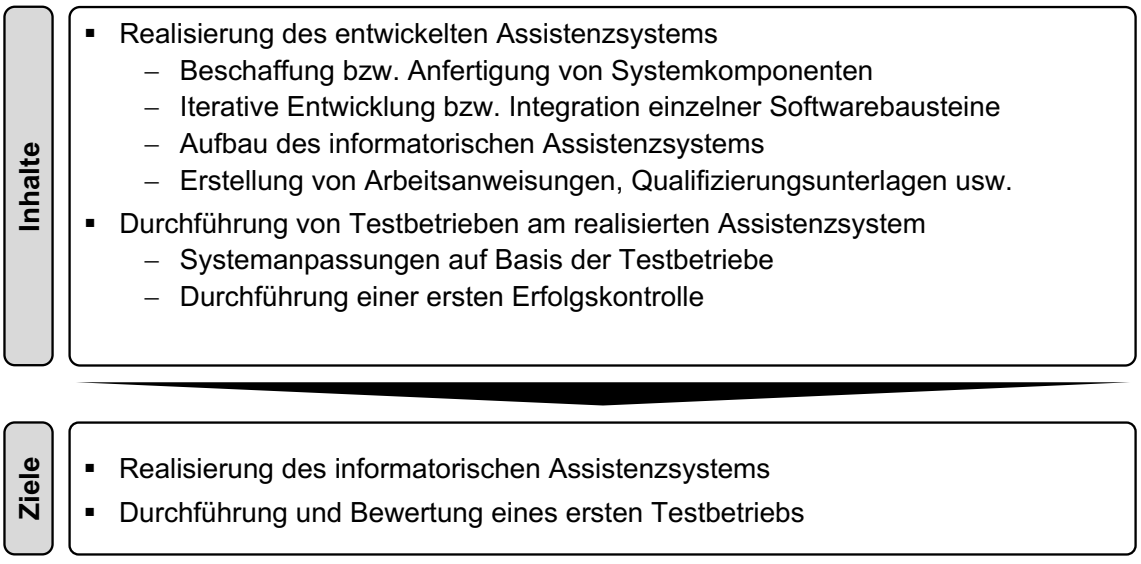


Abb. 6.6 Phase V des Handlungsleitfadens im Überblick (Bendzioch et al., 2020b, modifiziert)

6.3.6 Phase VI – Einsetzen

Die Phase des Einsetzens beginnt mit dem erfolgreichen Abschluss der Testphase und der damit verbundenen Realisierung des informatorischen Assistenzsystems. Gegenstand der vorliegenden Phase ist somit die Überführung des entwickelten und realisierten Systems in die betriebliche Produktionsumgebung, die abschließende Bewertung der gesetzten Projektziele sowie die Übergabe der Projektverantwortung an die Produktion. Basierend auf der festgelegten Implementierungsstrategie wird hierzu das Assistenzsystem in ein oder mehrere Montagesysteme eingebettet. Im Zuge dessen werden die Beschäftigten und Produktionsverantwortlichen geschult und die Projektverantwortung auf die Serienbetreuung übertragen. Mit der Projektübergabe werden z. B. auch Verfahrensanweisungen und Wartungspläne in Zusammenarbeit entwickelt sowie der kontinuierliche Verbesserungsprozess initiiert. Wichtige Teillösungen und Ergebnisse des Projekts werden dabei vom Projektleiter dokumentiert, um in späteren Projekten darauf zurückgreifen zu können.

Abgeschlossen wird das Phasenmodell mit einer abschließenden Evaluierung des informatorischen Assistenzsystems. Dazu werden die in Phase eins definierten Projektziele erfasst und abschließend bewertet. Hierbei ist es auch ratsam, die Erfahrungen der Beschäftigten in der Produktion nach einer Einarbeitungszeit zu erfassen und mit zu berücksichtigen. Die Ergebnisse und Erkenntnisse aus dem Projekt sollten sodann sowohl innerhalb des Projektteams als auch abteilungsübergreifend kommuniziert werden, so dass Lern- und Synergieeffekte erzielt werden können.

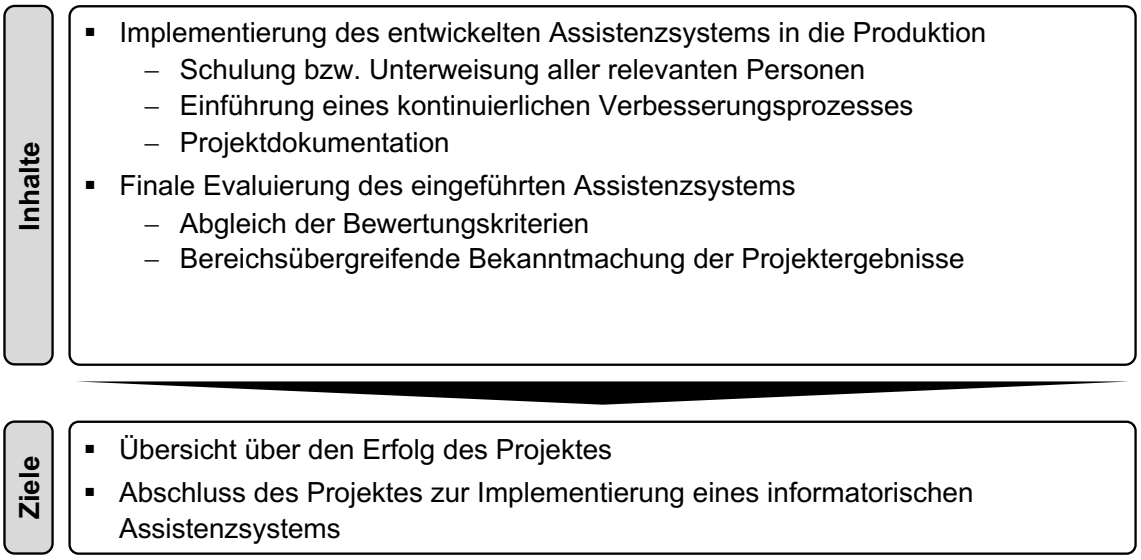


Abb. 6.7 Phase VI des Handlungsleitfadens im Überblick (Bendzioch et al., 2020b, modifiziert)

6.4 Interpretation und kritische Würdigung

Das vorgestellte Vorgehensmodell zeigt einen Rahmen auf, wie informatorische Assistenzsysteme unter den Aspekten Mensch, Technik und Organisation bedarfsorientiert und wirtschaftlich implementiert werden können. Die Grundlage dafür bilden die vorgestellten sechs Phasen, in denen jeweils unterschiedliche Inhalte und Ziele vorgegeben sind. Das Vorgehen orientiert sich dabei bewusst an einem „klassischen“ Phasenmodell, um den Nutzenden einen bewährten bzw. erprobten Standard an die Hand zu geben, der durch konkrete Vorgaben und Hinweise Orientierung, Sicherheit und Unterstützung bei der Durchführung des Einführungsprojektes schafft. Gleichwohl ist zu beachten, dass die betrieblichen Anforderungen bzw. Gegebenheiten auch ein agiles Vorgehen erfordern können. So kann es beispielsweise vorkommen, dass vermeintlich abgeschlossene Phasen aufgrund von unvorhersehbaren bzw. nicht planbaren Ereignissen erneut bearbeitet werden müssen, so dass Phasen nicht als strikt getrennt betrachtet werden können, sondern vielmehr agil bzw. dynamisch zu handhaben sind. Der betriebliche Anwender steht dabei vor der Herausforderung, das vorgestellte Modell an seine Bedürfnisse anzupassen. Letztlich kommt es aber immer darauf an, wie ein solches Projekt in der Praxis gelebt wird, denn es gibt nicht die eine richtige Vorgehensweise, sondern viele Mittel und Wege, die mal mehr, mal weniger gut in das bestehende Projektmanagement bzw. für eine Ausgangssituation passen.

Das Projektteam durchläuft dabei den dargestellten Handlungsleitfaden mit dem Ziel, ein informatorisches Assistenzsystem erfolgreich zu entwickeln und zu implementieren. Somit erstreckt sich das Vorhaben über einen definierten Zeitraum, der durch zielgerichtete Aktivitäten zur Entwicklung und Implementierung des Assistenzsystems gefüllt ist. Um hierbei ein Höchstmaß an Flexibilität, z. B. bei Abweichungen und Anpassungen, zu erreichen, ist es notwendig, dass das Management bzw. die Projektleitung dem Projektteam ein gewisses Maß an Autonomie einräumt. Andernfalls kann es durch die Distanz zwischen dem strategischen Management und dem operativen Projektteam zu Verzögerungen kommen oder alternative Lösungen werden möglicherweise nicht weiterverfolgt, damit die ursprünglichen Absichten bzw. Ziele des Projekts erreicht werden. Die übertragene Projektautonomie darf jedoch nicht zu einer Stagnation im Projektfortschritt führen. Im Vordergrund müssen daher wiederkehrende Meetings und konkrete Zielvereinbarungen stehen – Projektvision –, um sicherzustellen, dass sich die Beschäftigten an ihre Aufgabe gebunden fühlen und der gemeinsame Wille zum Projekterfolg führt. Nach Kleineberg et al. (2017b) sind hierbei die folgenden Erfolgsfaktoren

von besonderer Bedeutung: Führung, Vision, Teambuilding, Kommunikation, Partizipation, Analyse, Qualifikation, Nachhaltigkeit, Projektorganisation und prozessorientierte Steuerung. Bei der Umsetzung eines solchen Projekts ist jedoch immer zu bedenken, dass sich Neues im Vergleich zu Altem nur schwer durchsetzen kann, denn Menschen halten oft an Bewährtem fest, auch wenn sich die Umwelt spürbar verändert. Es ist daher besonders wichtig, die Relevanz des Projektes hervorzuheben, die Vision zu kommunizieren und alle Interessengruppen einzubinden. Letzteres gibt den Beteiligten zum einen die Möglichkeit, das Arbeitssystem aktiv mitzugestalten, zum anderen schafft es Verantwortung für den Erfolg des Projektes.

Zu berücksichtigen ist an dieser Stelle jedoch, dass der vorgestellte Handlungsleitfaden in der Praxis noch keine breite Anwendung gefunden hat. Durch die iterative Entwicklung des Leitfadens im Rahmen von Expertenworkshops kann zwar von einem inhaltsvaliden Instrument ausgegangen werden, dennoch kann es, wie bereits beschrieben, zu Abweichungen in der Vorgehensweise kommen. Dabei sollte die benutzerzentrierte Entwicklung im Vordergrund stehen, da die Einführung nur dann als erfolgreich angesehen werden kann, wenn der Beschäftigte das implementierte Assistenzsystem als hilfreich ansieht und dieses zu einer nachhaltigen Steigerung der Arbeitsproduktivität führt.

7. Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen der vorliegenden Dissertation wurden theoretische und empirische Untersuchungen durchgeführt sowie Methoden entwickelt, mit dem Ergebnis, dass die identifizierten Hemmnisse bei der Implementierung von informatorischen Assistenzsystemen reduziert werden konnten. Diese lagen nach Studien von Kasselmann und Willeke (2018) und Geissbauer et al. (2014) vor allem darin begründet, dass es den Unternehmen an einer geeigneten Einführungs- bzw. Handlungsstrategien sowie an Kenntnissen über den wirtschaftlichen Mehrwert dieser Systeme fehlte. Fürntratt et al. (2016) sowie Herder und Aurich (2016) sahen darüber hinaus einen Forschungsbedarf hinsichtlich der Identifikation von Arbeitssystemen, die sich für den Einsatz eines Assistenzsystems eignen. Vor diesem Hintergrund wurde eine empirische Laborstudie zu den humanorientierten und wirtschaftlichen Potenzialen ausgewählter Typen von Assistenzsystemen durchgeführt und eine Methode zur Prognose der Einsatzpotenziale in bestehenden Montagesystemen entwickelt. Aus den gewonnenen Erkenntnissen sowie praxisbezogenen Inhalten aus zwei Einführungsprojekten und Expertenworkshops im Rahmen des Forschungsprojektes Montexas4.0 wurden sodann Kriterien und Empfehlungen für die Auswahl, Konfiguration und Implementierung eines solchen Systems abgeleitet und in ein Phasenmodell bzw. Handlungsleitfaden überführt.

Im Folgenden werden die Ergebnisse der einzelnen Untersuchungen und Entwicklungen unter Berücksichtigung der aufgeworfenen Forschungsfragen dargestellt. Daran anschließend wird auf die Verwertbarkeit der Ergebnisse eingegangen und ein Ausblick auf weitere Forschungsbedarfe gegeben.

Untersuchung der Einsatzpotenziale von Montageassistenzsystemen

Forschungsfrage: *Welche wirtschaftlichen und humanorientierten Potenziale können mit informatorischen Assistenzsystemen erzielt werden?*

Die Überprüfung der ersten Forschungsfrage hinsichtlich der wirtschaftlichen und humanorientierten Einsatzpotenziale informatorischer Assistenzsysteme erfolgte im Rahmen einer empirischen Laborstudie unter Einbeziehung eines beamer-, tablet- und datenbrillengestützten Assistenzsystems. Dabei standen insbesondere die Aspekte des Paradigmenwechsels in der manuellen Montage im Vordergrund der Untersuchung. D. h., es wurden verschiedene industrielle Baugruppen unterschiedlicher Komplexität mit einem der genannten informatorischen Assistenzsysteme oder mit einer

papierbasierten Montageanweisung – Kontroll- bzw. Vergleichsmedium – montiert und in Bezug auf die Variablen Anlernzeit, Ausführungszeit, Montagefehler, Kommissionierfehler und mentale Beanspruchung bewertet. Die Studienergebnisse führen dabei insgesamt zu dem Befund, dass die Mehrzahl der untersuchten informatorischen Assistenzsysteme unter Berücksichtigung des Versuchsdesigns einen statistisch relevanten Beitrag zur Steigerung der Arbeitsproduktivität leisten, ohne die Beschäftigten mental stärker zu beanspruchen (s. Tab. 4.9). Aus den Rahmenbedingungen der experimentellen Studie geht ferner hervor, dass die untersuchten Variablen bzw. die aufgestellten Hypothesen durch die untersuchten Assistenzsysteme in unterschiedlichem Maße beeinflusst worden sind. So eignet sich das tabletgestützte Assistenzsystem einerseits zur Verkürzung der Anlernzeit bei zunehmender Aufgabenkomplexität, andererseits aber auch für die Montage von kleinen Losgrößen, da die erstmalige Ausführungszeit signifikant kürzer ist. Über die genannten Effekte bzw. Potenziale hinaus führt das beamergestützte Assistenzsystem zu weniger Kommissionierfehlern und zu kürzeren Ausführungszeiten bei steigender Aufgabenkomplexität. Für das datenbrillengestützte Assistenzsystem konnten hingegen keine statistisch relevanten Unterschiede festgestellt werden. Letzteres ist vermutlich darauf zurückzuführen, dass die Informationsbereitstellung für die Versuchspersonen nicht vertraut war und das Assistenzsystem im vorliegenden Versuchsdesign sein Potenzial nicht voll ausschöpfen konnte, wie es beispielsweise bei einer ortsunabhängigen Montage der Fall gewesen wäre. Die vorgestellten Befunde verdeutlichen damit eindrucksvoll, dass informatorische Assistenzsysteme sowohl humanorientierte als auch wirtschaftliche Potenziale im Kontext des Paradigmenwechsels in der Montage aufweisen, aber auch, dass das Assistenzsystem nach den spezifischen Arbeitssystemanforderungen ausgewählt werden muss, um die Potenziale in vollem Umfang zu erschließen. Vor diesem Hintergrund wurden auf Basis der Studienergebnisse und Rahmenbedingungen Empfehlungen für den Einsatz der untersuchten Montageassistenzsysteme abgeleitet (s. Tab. 4.10), mit dem Ziel, eine Orientierungshilfe bei der Auswahl eines informatorischen Assistenzsystems bereitzustellen, welche z. B. im Rahmen des entwickelten Handlungsleitfadens Verwendung findet.

Prognosemodell zum Einsatz von Montageassistenzsystemen

Forschungsfrage: *Wie können bestehende Montagesysteme hinsichtlich der Einsatzbedarfe bzw. -potenziale von informatorischen Assistenzsystemen bewertet werden?*

Das entwickelte Modell zur Prognose der Einsatzpotenziale von informatorischen Assistenzsystemen orientiert sich entgegen bestehender Ansätze nicht an objektiven Daten, sondern an der subjektiven Wahrnehmung der Beschäftigten im Arbeitssystem. Im Speziellen wird hierzu die wahrgenommene informatorische Komplexität des Beschäftigten mit Hilfe des entwickelten CORAA-Fragebogens erhoben. Damit setzt die entwickelte Methode dort an, wozu die Systeme im Wesentlichen eingesetzt werden, nämlich zur Reduktion der wahrgenommenen informatorischen Komplexität. Gestützt wird diese Annahme bzw. These auch durch die durchgeführte Laborstudie, aus der hervorgeht, dass die Potenziale eines informatorischen Assistenzsystems mit zunehmender Aufgabenkomplexität steigen, d. h., dass das Einsatzpotenzial eines informatorischen Assistenzsystems mit der wahrgenommenen informatorischen Komplexität des Beschäftigten im Arbeitssystem steigt, welche bekanntlich von Person zu Person variiert.

Im Zuge der iterativen Entwicklung und Validierung des Erhebungsinstruments konnten insgesamt vier Dimensionen eruiert werden, die die wahrgenommene informatorische Komplexität in der manuellen Montage determinieren: (1) Dynamik und Flexibilität, (2) Produkt und Montagevielfalt, (3) Kognitive Zusatzbelastung und Zeitaufwendungen und (4) Informationsbedarf und -umfang. Der resultierende CORAA-Score repräsentiert dabei sowohl das humanorientierte als auch das wirtschaftliche Einsatzpotenzial, wobei eine monetäre Bewertung gegenwärtig noch nicht möglich ist. Aus den vier Dimensionen des Fragebogens lassen sich zudem Problem- bzw. Handlungsfelder ableiten, die bei der Entwicklung eines informatischen Assistenzsystems berücksichtigt werden sollten. Die Anwendung des CORAA-Fragebogens gestaltet sich dabei besonders intuitiv, kostengünstig und schnell in der Anwendung, da keine komplexen Berechnungen oder aufwendigen Erhebungen notwendig sind. Defizite in bestehenden Verfahren werden auf diese Weise geschlossen und die aufgeworfene Forschungsfrage umfassend beantwortet. Schließlich können Assistenzsysteme nur dann humanorientiert und wirtschaftlich eingesetzt werden, wenn die Person in der Montage auch den Bedarf hat und folglich im Mittelpunkt der Potenzialanalyse steht.

Handlungsleitfaden zur Einführung von Montageassistenzsystemen

Forschungsfrage: *Wie gestaltet sich die bedarfsgerechte Implementierung von informatorischen Assistenzsystemen in bestehenden Montagesystemen?*

Die Ableitung von Hinweisen und Empfehlungen für die bedarfsgerechte Auswahl, Konfiguration und Implementierung von informatorischen Assistenzsystemen in bestehenden Montagesystemen erfolgte auf der Grundlage der im Rahmen dieser Arbeit gewonnenen Erkenntnisse sowie zweier Einführungsprojekte und Expertenworkshops aus dem eingangs erwähnten Forschungsprojekt „Montexas4.0“. Der daraus resultierende Handlungsleitfaden orientiert sich an einem bereits bestehenden Sechs-Phasenmodell zur Einführung von informatorischen Assistenzsystemen und wurde um ausgewählte Inhalte, insbesondere hinsichtlich der technischen Ausgestaltung und Umsetzung, ergänzt. Dabei bestand das wesentliche Ziel darin, die Konfigurations- und Gestaltungsmöglichkeiten eines informatorischen Assistenzsystems sowie den Einführungsprozess ganzheitlich zu begleiten bzw. zu gestalten. Hierzu werden den betrieblichen Anwendern in den einzelnen Phasen Methoden und Informationen zu relevanten Normen bzw. Vorschriften praxisorientiert bereitgestellt. So stehen in der ersten und zweiten Phase die Bedarfs- und Anforderungsermittlung im Vordergrund, ehe in Phase III die Auswahl und Konfiguration von Assistenzsystemkonzepten erfolgt. An die Definition eines Assistenzsystemtyps schließt sich in Phase IV die Detailplanung des informatorischen Assistenzsystems an, gefolgt von der Realisierung – Phase V – und dem Einsatz des Systems in der betrieblichen Praxis – Phase VI.

Der Handlungsleitfaden orientiert sich dabei bewusst an einem Phasenmodell, um den Nutzenden einen bewährten bzw. erprobten Standard an die Hand zu geben, der durch konkrete Vorgaben und Hinweise Orientierung, Sicherheit und Unterstützung bei der Durchführung des Einführungsprojektes schafft. Gleichwohl ist zu berücksichtigen, dass die betrieblichen Anforderungen bzw. Gegebenheiten auch ein agiles Vorgehen erfordern können, so dass einzelne Phasen agil bzw. dynamisch gestaltet werden müssen. Letztlich kommt es aber immer darauf an, wie ein solches Einführungsprojekt in der Praxis gelebt wird, denn es gibt nicht die eine richtige Vorgehensweise, sondern viele Mittel und Wege, die mal mehr, mal weniger gut in das bestehende Projektmanagement bzw. für eine Ausgangssituation passen. Darauf Bezug nehmend zeigt der entwickelte Handlungsleitfaden eine Möglichkeit auf, wie der Einführungsprozess unter Berücksichtigung der Aspekte Mensch, Technik und Organisation ganzheitlich gestaltet werden kann, wobei der betriebliche Anwender ggf. vor der Herausforderung stehen mag, das vorgestellte Modell an seine Bedürfnisse anzupassen.

Verwertbarkeit der Ergebnisse

Die Verwertbarkeit der Ergebnisse ist durch den anwendungsorientierten Handlungsleitfaden sichergestellt bzw. gegeben. Dieser bietet den betrieblichen Anwendern die Möglichkeit, informatorische Assistenzsysteme bedarfsgerecht zu entwickeln und zu implementieren. Der Leitfaden kann dabei in verschiedenen Arbeitsbereichen bzw. Tätigkeitsfeldern der manuellen Montage eingesetzt werden, wobei der betriebliche Anwender ggf. vor der Herausforderung steht, das vorgestellte Modell an die betrieblichen Gegebenheiten anzupassen. Darüber hinaus ermöglicht die transparente Darstellung aller relevanten Schritte und Informationen eine schnelle Umsetzung, welche allerdings von den Rahmenbedingungen des jeweiligen Umsetzungsprojektes abhängig ist. Durch die iterative Entwicklung des Leitfadens kann von einem inhaltsvaliden Instrument ausgegangen werden, jedoch ist zu berücksichtigen, dass im Rahmen der vorliegenden Arbeit keine praxisbezogene Anwendung des Modells stattgefunden hat.

Über das ursprüngliche Ziel der Entwicklung eines Handlungsleitfadens hinaus können auch die Ergebnisse des entwickelten CORAA-Fragebogens zur Prognose der Einsatzpotenziale als auch die Ergebnisse der empirischen Laborstudie unabhängig vom Leitfaden Verwendung finden. So kann beispielsweise die Methode zur Prognose der Einsatzpotenziale zur informatorischen Arbeitsplatzgestaltung genutzt werden, indem informatorische Defizite sowohl quantifiziert als auch klassifiziert werden. Die Ergebnisse der empirischen Laborstudie tragen darüber hinaus dazu bei, Möglichkeiten bzw. Potenziale für den Einsatz solcher Systeme aufzuzeigen und Unsicherheiten hinsichtlich ihres Einsatzes abzubauen. Insgesamt leisten die erzielten Ergebnisse einen entscheidenden Beitrag, bestehende Hemmnisse und Hürden bei der Implementierung von informatorischer Assistenzsystemen abzubauen und die damit verbundenen Potenziale für den Wirtschaftsstandort Deutschland zu erschließen.

Ausblick auf weitere Forschungsbedarfe

Mit dem in der vorliegenden Arbeit entwickelten Handlungsleitfaden ist es möglich, informatorische Assistenzsysteme bedarfsgerecht und wirtschaftlich zu implementieren. Allerdings wird erst die breite Anwendung des Modells und der darin berücksichtigten Methoden zeigen, ob weitere Anpassungen am Vorgehen notwendig sind. Weiterhin ergeben sich aus den theoretischen und empirischen Untersuchungen sowie entwickelten Methoden im Rahmen dieser Arbeit weitere Forschungsbedarfe, die den breiten Einsatz dieser innovativen Systeme fördern können. Im Hinblick auf die

humanorientierten und wirtschaftlichen potenziale informatorischer Assistenzsysteme ergeben sich folgende weitere Forschungsfragen:

- Wie wirken sich weitere Typen von informatorischen Assistenzsystemen auf die untersuchten Indikatoren aus?
- Führen neuartige Formen der Darstellung von Arbeitsanweisungen, wie AR, VR und Gamification, zu einer geringeren mentalen Beanspruchung im Vergleich zu einer konventionellen Informationsbereitstellung?
- Welchen Einfluss hat das Montagesystem bzw. dessen Organisationsform auf die Einsatzpotenziale einzelner informatorischer Assistenzsysteme?
- Wie kann die Anzahl an Montagefehlern bei der Verwendung eines informatorischen Assistenzsystems weiter reduziert werden?
- Inwieweit können informatorische Assistenzsysteme die Barrieren für Menschen mit Leistungseinschränkungen hinsichtlich des Zugangs zum allgemeinen Arbeitsmarkt verringern?
- Wie wirken sich informatorische Assistenzsysteme langfristig auf den Menschen am Arbeitsplatz und auf dessen Arbeitsproduktivität aus?

Forschungsfragen im Kontext des entwickelten CORAA-Fragebogens:

- Wie kann auf der Basis des CORAA-Scores eine monetäre Bewertung der Einsatzpotenziale erfolgen?
- Mit dem Einsatz des CORAA-Fragebogens in der betrieblichen Praxis ist zukünftig der Frage nachzugehen, ob die Normierung des Fragebogens valide ist oder ob eine Norm- bzw. Eichstichprobe verwendet werden muss?

Weiterführende Forschungsfragen zum Handlungsleitfaden:

- Wie kann ein spezifisches Hardwarekonzept anhand der getätigten Systemanforderungen und -ziele vorgegeben werden?
- Wie muss ein unternehmensübergreifender Software- und Datenstandard aussehen, um standardisierte Softwareprogramme für informatorische Assistenzsysteme bereitzustellen?
- Wenn es gelingt, einen unternehmensübergreifenden Software- und Datenstandard zu etablieren, stellt sich die Frage, wie Arbeitsanweisungen automatisch und personenzentriert erstellt werden können?

Literaturverzeichnis

Adrian, B., Hinrichsen, S., Schulz, A., & Voß, E. (2020). Low-Code-Programmierung als Ansatz zur Gestaltung bedarfsgerechter informatorischer Assistenzsysteme – eine Fallstudie. In M. Bornewasser & S. Hinrichsen (Hrsg.), *Informatorische Assistenzsysteme in der variantenreichen Montage: Theorie und Praxis* (S. 173-186). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-662-61374-0_9

Aehnelt, M., & Bader, S. (2014). Mobile Informationsassistenz für die Montage. In R. Weidner & T. Redlich (Hrsg.), *Technische Unterstützungsssysteme, die die Menschen wirklich wollen (Band zur ersten transdisziplinären Konferenz 2014)* (S. 370-380). Helmut-Schmidt-Universität.

Alkan, B. (2019). An experimental investigation on the relationship between perceived assembly complexity and product design complexity. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM), 13*(3), 1145-1157. https://doi.org/10.1007/s12008-019-00556-9

Alkan, B., Vera, D., Ahmad, M., Ahmad, B., & Harrison, R. (2016). A Model for Complexity Assessment in Manual Assembly Operations Through Predetermined Motion Time Systems. *Procedia CIRP, 44*, 429-434. https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.02.111

Amelang, M., & Schmidt-Atzert, L. (2006). Diagnostische Verfahren. In *Psychologische Diagnostik und Intervention* (S. 181-365). Springer. https://doi.org/10.1007/3-540-28507-5_3

Andrews, J. A., Lewinsohn, P. M., Hops, H., & Roberts, R. E. (1993). Psychometric properties of scales for the measurement of psychosocial variables associated with depression in adolescence. *Psychological Reports, 73*, 1019-1046.

Apt, W., Bovenschulte, M., Priesack, K., Weiß, C., & Hartmann, E. A. (2018). *Einsatz von digitalen Assistenzsystemen im Betrieb: Forschungsbericht 502*. iit–Institut für Innovation und Technik.

Asadi, N., Jackson, M., & Fundin, A. (2016). Drivers of Complexity in a Flexible Assembly System- A Case Study. *Procedia CIRP, 41*, 189-194. https://doi.org/10.1016/j.procir.2015.12.082

Bächler, A., Bächler, L., Autenrieth, S., Kurtz, P., Heidenreich, T., Hörz, T., & Krüll, G. (2015). Entwicklung von Assistenzsystemen für manuelle Industrieprozesse. In S. Rathmayer & H. Pongratz (Hrsg.), *Proceedings of DeLFI Workshops 2015* (S. 56-63). CEUR-Workshop.

Backhaus, K., Erichson, B., Weiber, R., & Plinke, W. (2016). Faktorenanalyse. In K. Backhaus, B. Erichson, W. Plinke, & R. Weiber (Hrsg.), *Multivariate Analysemethoden: Eine anwendungsorientierte Einführung* (S. 385-452). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-662-46076-4_8

Badertscher, K., & Scheuring, J. (2007). *Wirtschaftsinformatik - Entwicklung und Implementation eines Informations- und Kommunikationssystems: Methoden, Prozesse und Technologien - mit zahlreichen Illustrationen, Beispielen, Repetitionsfragen und Antworten*. Compendio Bildungsmedien.

Bamberg, E. (2000). Psychische Belastungen: Begriffe und Konzepte. In B. Badura, M. Litsch, & C. Vetter (Hrsg.), *Fehlzeiten-Report: Psychische Belastung am Arbeitsplatz Zahlen, Daten, Fakten aus allen Branchen der Wirtschaft* (S. 45-57). Springer.

https://doi.org/10.1007/978-3-642-57161-9_3

Bannat, A. (2014). *Ein Assistenzsystem zur digitalen Werker-Unterstützung in der industriellen Produktion* (Dissertation). TU München.

Baszenski, N. (2012). Steigerung der (Arbeits-)Produktivität — Grundlegende Zusammenhänge und praktische Vorgehensweise. *Zeitschrift für Arbeitswissenschaft, 66*(2), 196-202. https://doi.org/10.1007/BF03373875

Bauer, S. (2003). 3 Perspektiven der Organisationsgestaltung. In H.-J. Bullinger, H. J. Warnecke, & E. Westkämper (Hrsg.), *Neue Organisationsformen im Unternehmen: Ein Handbuch für das moderne Management* (S. 93-128). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-662-08934-7_4

Beauducel, A., & Leue, A. (2014). Testgütekriterien I: Objektivität und Reliabilität. In A. Beauducel & A. Leue (Hrsg.), *Psychologische Diagnostik* (S. 65-104). Hogrefe.

Bendzioch, S., Bläsing, D., & Hinrichsen, S. (2020a). Comparison of Different Assembly Assistance Systems Under Ergonomic and Economic Aspects. In T. Ahram, W. Karwowski, S. Pickl, & R. Taiar (Hrsg.), *Human Systems Engineering and Design II: Proceedings of the 2nd International Conference on Human Systems Engineering and Design (IHSED2019): Future Trends and Applications, September 16-18, 2019, Universität der Bundeswehr München, Munich, Germany* (S. 20–25). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-27928-8_4

Bendzioch, S., Bornewasser, M., & Hinrichsen, S. (2020b). Einführung von Montageassistenzsystemen. In M. Bornewasser & S. Hinrichsen (Hrsg.), *Informatorische Assistenzsysteme in der variantenreichen Montage: Theorie und Praxis* (S. 135–157). Springer Vieweg. https://doi.org/10.1007/978-3-662-61374-0_7

Bendzioch, S., Bornewasser, M., Hinrichsen, S., & Adrian, B. (2019). Messung der informatorischen Komplexität zur Abschätzung der Einsatzpotenziale von Montageassistenzsystemen. In Gesellschaft für Arbeitswissenschaft e. V. (Hrsg.), *Arbeit interdisziplinär analysieren - bewerten - gestalten: Bericht zum 65. Frühjahrskongress der Gesellschaft für Arbeitswissenschaft e. V. (GfA) vom 27.02.-01.03.2019 in Dresden* (C.9.1). GfA-Press.

Bendzioch, S., & Hinrichsen, S. (2020). How to Configure Assembly Assistance Systems – Results of a Laboratory Study. In I. L. Nunes (Hrsg.), *Advances in Human Factors and Systems Interaction: Proceedings of the AHFE 2020 Virtual Conference on Human Factors and Systems Interaction, July 16-20, 2020, USA* (S. 25–31). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-51369-6_4

Bendzioch, S., Hinrichsen, S., Adrian, B., & Bornewasser, M. (2018). Assessing the Economic and Human-Centered Potential of Assembly Assistance Systems. In F.-J. Villmer & E. Padoano (Hrsg.), *Production Engineering and Management: Proceedings 8th International Conference. Oktober 04 - 05, 2018 in Lemgo, Germany* (S. 127–136). Hochschule Ostwestfalen-Lippe.

Bendzioch, S., Hinrichsen, S., Adrian, B., & Bornewasser, M. (2020c). Method for Measuring the Application Potential of Assembly Assistance Systems. In I. L. Nunes (Hrsg.), *Advances in Human Factors and Systems Interaction: Proceedings of the AHFE 2019 International Conference on Human Factors and Systems Interaction, July 24-28, 2019, Washington D.C., USA* (S. 3–11). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-20040-4_1

Bendzioch, S., Hinrichsen, S., & Bornewasser, M. (2020d). Produktivität der

Montagearbeit. In M. Bornewasser & S. Hinrichsen (Hrsg.), *Informatorische Assistenzsysteme in der variantenreichen Montage: Theorie und Praxis* (S. 113–134). Springer Vieweg. https://doi.org/10.1007/978-3-662-61374-0_6

Bendzioch, S., Hinrichsen, S., & Bornewasser, M. (2020e). Validierung eines Instruments zur Ermittlung der Einsatzpotenziale von informatorischen Montageassistenzsystemen. In Gesellschaft für Arbeitswissenschaft e. V. (Hrsg.), *Digitaler Wandel, digitale Arbeit, digitaler Mensch?: Bericht zum 66. Frühjahrskongress der Gesellschaft für Arbeitswissenschaft e. V. (GfA) vom 16.03.-18.03.2020 in Berlin* (B.18.4). GfA-Press.

Bläsing, D. (2020). Mentale Beanspruchung in der Montage. In M. Bornewasser & S. Hinrichsen (Hrsg.), *Informatorische Assistenzsysteme in der variantenreichen Montage: Theorie und Praxis* (S. 65-87). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-662-61374-0_4

Bläsing, D., & Bornewasser, M. (2021). Influence of Increasing Task Complexity and Use of Informational Assistance Systems on Mental Workload. *Brain Sciences, 11*(1), 102.

Blattgerste, J., Renner, P., Strenge, B., & Pfeiffer, T. (2018). *In-Situ Instructions Exceed Side-by-Side Instructions in Augmented Reality Assisted Assembly* Proceedings of the 11th PErvasive Technologies Related to Assistive Environments Conference, Corfu, Greece.

Blattgerste, J., Strenge, B., Renner, P., Pfeiffer, T., & Essig, K. (2017). *Comparing Conventional and Augmented Reality Instructions for Manual Assembly Tasks* Proceedings of the 10th International Conference on PErvasive Technologies Related to Assistive Environments, Island of Rhodes, Greece.

Bornewasser, M. (2020). Montage und Komplexität. In M. Bornewasser & S. Hinrichsen (Hrsg.), *Informatorische Assistenzsysteme in der variantenreichen Montage: Theorie und Praxis* (S. 43-64). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-662-61374-0_3

Bornewasser, M., Bläsing, D., & Hinrichsen, S. (2018). Informatorische Assistenzsysteme in der manuellen Montage: Ein nützliches Werkzeug zur Reduktion mentaler Beanspruchung? *Zeitschrift für Arbeitswissenschaft, 72*(4), 264-275. https://doi.org/10.1007/s41449-018-0123-x

Bortz, J., & Döring, N. (2006). Quantitative Methoden der Datenerhebung. In *Forschungsmethoden und Evaluation – für Human- und Sozialwissenschaftler* (S. 137-293). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-540-33306-7_4

Brecher, C., & Schapp, L. (2009). *Montagetechnik und - organisation: Strategien und Trends*. Apprimus Verlag.

Brinzer, B., & Schneider, K. (2019). Komplexitätsbewertung in der Produktion. *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb, 114*(10), 647-652. https://doi.org/10.3139/104.112168

Brooke, J. (1996). SUS: A quick and dirty usability scale. In P. W. Jordan, B. Thomas, B. A. Weerdmeester, & A. L. McClelland (Hrsg.), *Usability evaluation in industry* (S. 189-194). Taylor & Francis. https://doi.org/10.1201/9781498710411

Bruhn, M., Schmidt, I., & Blockus, M.-O. (2009). *Komplexität bei Dienstleistungen*. Wirtschaftswissenschaftliches Zentrum (WWZ).

Budde, L. (2016). *Integriertes Komplexitätsmanagement in produzierenden*

Unternehmen: Ein Modell zur Bewertung von Komplexität (Dissertation). St. Gallen.

Bühner, M. (2006). Testtheoretische Grundlagen. In M. Bühner (Hrsg.), *Einführung in die Test- und Fragebogenkonstruktion* (Bd. 2, S. 19-44). Pearson.

Bühner, M. (2011a). Erstellung eines Testentwurfs. In M. Bühner (Hrsg.), *Einführung in die Test- und Fragebogenkonstruktion* (Bd. 3, S. 83-140). Pearson.

Bühner, M. (2011b). Exploratorische Faktorenanalyse. In M. Bühner (Hrsg.), *Einführung in die Test- und Fragebogenkonstruktion* (Bd. 3, S. 295-378). Pearson.

Bühner, M. (2011c). Reliabilität. In M. Bühner (Hrsg.), *Einführung in die Test- und Fragebogenkonstruktion* (Bd. 2, S. 141-214). Pearson.

Bühner, M. (2011d). Testtheoretische Grundlagen. In M. Bühner (Hrsg.), *Einführung in die Test- und Fragebogenkonstruktion* (Bd. 3, S. 29-82). Pearson.

Bullinger, H. J., & Richter, M. (1991). Integrated design and assembly planning. *Computer Integrated Manufacturing Systems, 4*(4), 239-247. https://doi.org/10.1016/0951-5240(91)90016-R

Bunk, G. (1991). *Methodenlehre der Betriebsorganisation – Arbeitspädagogik* (Bd. 3). Hanser.

Claeys, A., Hoedt, S., Soete, N., Van Landeghem, H., & Cottyn, J. (2015). Framework for Evaluating Cognitive Support in Mixed Model Assembly Systems. *IFAC-PapersOnLine, 48*(3), 924-929. https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2015.06.201

Cohen, J. (1988). *Statistical power analysis for the behavioral sciences* (Bd. 2). Erlbaum. https://doi.org/10.4324/9780203771587

Cohen, J. (1992). A power primer. *Psychological Bulletin, 122*(1), 155-159.

Cratzius, M. (2003). *Die Einbindung des Absatz- und Produktionsbereichs in Innovationsprozesse* (Dissertation). Deutscher Universitätsverlag.

Dellmann, K., & Pedell, K. L. (1994). *Controlling von Produktivität, Wirtschaftlichkeit und Ergebnis*. Schäffer-Poeschel.

Deuse, J., & Busch, F. (2012). Zeitwirtschaft in der Montage. In B. Lotter & H.-P. Wiendahl (Hrsg.), *Montage in der industriellen Produktion: Ein Handbuch für die Praxis* (S. 79-107). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-642-29061-9_4

DGUV. (2016). *DGUV Information 215-450: Software-Ergonomie*. DGUV - Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung e.V.

Dickmann, E., Dickmann, P., Mack, G., Michels, F., Reimer, S., Begecarslan, M., Rücker, T., Schneider, H. M., Ehlers, J.-D., Berlak, J., Pippig, M., Lutz, D., Kuhn, C., Ellerbrock, K., Meißner, M., Mertens, S., Rosenhammer, T., Zäh, M. F., Rudolf, H., Vogl, W., & Wiesbeck, M. (2015). EDV-Unterstützung in der Produktion und im Materialfluss. In P. Dickmann (Hrsg.), *Schlanker Materialfluss: mit Lean Production, Kanban und Innovationen* (S. 523-640). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-662-44869-4_5

DIN 8580. (2020). *Fertigungsverfahren – Begriffe, Einteilung*. Beuth. https://doi.org/10.31030/3115263

DIN 8593-0. (2003). *Fertigungsverfahren – Fügen*. Beuth. https://doi.org/10.31030/9500684

DIN 66001. (1983). *Informationsverarbeitung – Sinnbilder und ihre Anwendung*. Beuth. https://doi.org/10.31030/1300312

DIN EN IEC/IEEE 82079-1. (2021). *Erstellung von Nutzungsinformationen (Gebrauchsanleitungen) für Produkte - Teil 1: Grundsätze und allgemeine Anforderungen*. Beuth.

DIN EN ISO 6385. (2016). *Grundsätze der Ergonomie für die Gestaltung von Arbeitssystemen*. Beuth. https://doi.org/10.31030/2429191

DIN EN ISO 9241-11. (2018). *Ergonomie der Mensch-System-Interaktion – Teil 11: Gebrauchstauglichkeit: Begriffe und Konzepte*. Beuth. https://doi.org/10.31030/2757945

DIN EN ISO 9241-110. (2008). *Ergonomie der Mensch-Maschine-Interaktion - Teil 110: Grundsätze der Dialoggestaltung*. Beuth. https://doi.org/10.31030/1464024

DIN EN ISO 10075-3. (2004). *Ergonomische Grundlagen bezüglich psychischer Arbeitsbelastung Teil 3: Grundsätze und Anforderungen an Verfahren zur Messung und Erfassung psychischer Arbeitsbelastung*. Beuth. https://doi.org/10.31030/9564295

DIN EN ISO 26800. (2011). *Ergonomie - Genereller Ansatz, Prinzipien und Konzepte*. Beuth. https://doi.org/10.31030/1775247

Dombrowski, U., Wesemann, S., & Korn, G. H. (2010). Werkerinformationssystem: Effiziente Informationen für die mitarbeiterorientierte Produktion. *ZWF – Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb, 105*(4), 282-287. https://doi.org/10.3139/104.110279

Doran, G. T. (1981). There's a S.M.A.R.T. way to write management's goals and objectives. *Management Review, 70*(11), 35-36.

Dörner, D. (2011). *Die Logik des Misslingens: Strategisches Denken in komplexen Situationen*. Rowohlt.

Dorner, M. (2014). *Das Produktivitätsmanagement des Industrial Engineering unter besonderer Betrachtung der Arbeitsproduktivität und der indirekten Bereiche* (Dissertation). KIT.

Dorner, M., & Stowasser, S. (2012). Das Produktivitätsmanagement des Industrial Engineering. *Zeitschrift für Arbeitswissenschaft, 66*(2), 212-225. https://doi.org/10.1007/BF03373878

ElMaraghy, W. H., & Urbanic, R. J. (2004). Assessment of Manufacturing Operational Complexity. *CIRP Annals, 53*(1), 401-406. https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)60726-4

Elbracht, D. (2000). Anlernen und Wiederanlernen beim Montieren. In R. Bader & K. Jenewein (Hrsg.), *Didaktik der Technik zwischen Generalisierung und Spezialisierung* (S. 351-371). Verlag der Gesellschaft zur Förderung arbeitsorientierter Forschung und Bildung.

ElMaraghy, W. H., & Urbanic, R. J. (2003). Modelling of Manufacturing Systems Complexity. *CIRP Annals, 52*(1), 363-366. https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)60602-7

Elmasri, R., & Navathe, S. B. (2009). Grundlagen von Datenbanksystemen. In D. u. Architektur (Hrsg.), (Bd. 3, S. 39-56). Pearson.

Evans, J., & Frankish, K. (2009). *In two minds: Dual processes and beyond*. Oxford. https://doi.org/10.1093/acprof:oso/9780199230167.001.0001

Eversheim, W. (2002). *Organisation in der Produktionstechnik 3. Arbeitsvorbereitung*.

Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-642-56336-2

Falck, A.-C., Andersson, L., Mattsson, S., Tarrar, M., Rosenqvist, M., & Söderberg, R. (2015). *A comparison of two methods for assessment of assembly complexity – what are they good for?* NES, Nordic Ergonomics society,7th Annual Conference, 02-04 November 2015, Lillehammer, Norway.

Falck, A.-C., Örtengren, R., & Rosenqvist, M. (2012). Relationship between complexity in manual assembly work, ergonomics and assembly quality. Ergonomics for Sustainability and Growth, NES 2012 (Nordiska Ergonomisällskapet) konferens, Saltsjöbaden, Stockholm, 19-22 augusti, 2012,

Falck, A.-C., Örtengren, R., & Rosenqvist, M. (2014). Assembly failures and action cost in relation to complexity level and assembly ergonomics in manual assembly (part 2). *International Journal of Industrial Ergonomics, 44*(3), 455-459. https://doi.org/10.1016/j.ergon.2014.02.001

Falck, A.-C., Örtengren, R., Rosenqvist, M., & Söderberg, R. (2017). Basic complexity criteria and their impact on manual assembly quality in actual production. *International Journal of Industrial Ergonomics, 58*, 117-128. https://doi.org/10.1016/j.ergon.2016.12.001

Falck, A.-C., & Rosenqvist, M. (2012). What are the obstacles and needs of proactive ergonomics measures at early product development stages? – An interview study in five Swedish companies. *International Journal of Industrial Ergonomics, 42*(5), 406-415. https://doi.org/10.1016/j.ergon.2012.05.002

Fast-Berglund, Å., Fässberg, T., Hellman, F., Davidsson, A., & Stahre, J. (2013). Relations between complexity, quality and cognitive automation in mixed-model assembly. *Journal of Manufacturing Systems, 32*(3), 449-455. https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2013.04.011

Feldmann, K., Slama, S., Gergs, H.-J., & Wirth, U. (2004a). Das MAMOS-Modell für Montageexzellenz — Ein systematischer Ansatz zur Selbstbewertung und strategischen Montagegestaltung. In K. Feldmann, S. Slama, H.-J. Gergs, & U. Wirth (Hrsg.), *Montage strategisch ausrichten — Praxisbeispiele marktorientierter Prozesse und Strukturen* (S. 15-26). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-642-18742-1_2

Feldmann, K., Slama, S., Gergs, H.-J., & Wirth, U. (2004b). Einleitung. In K. Feldmann, S. Slama, H.-J. Gergs, & U. Wirth (Hrsg.), *Montage strategisch ausrichten — Praxisbeispiele marktorientierter Prozesse und Strukturen* (S. 1-11). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-642-18742-1_1

Field, A. (2009). Exploratory factor analysis. In A. Field (Hrsg.), *Discovering Statistics Using SPSS* (Bd. 3, S. 627-685). SAGE Publications.

Fried, J., Heinemeier Hansson, D., & Linderman, M. (2006). *Getting Real: The smarter, faster, easier way to build a successful web application*. Basecamp.

Fromm, S. (2008). Faktorenanalyse. In N. Baur & S. Fromm (Hrsg.), *Datenanalyse mit SPSS für Fortgeschrittene: Ein Arbeitsbuch* (S. 314-344). VS Verlag für Sozialwissenschaften. https://doi.org/10.1007/978-3-531-91034-5_15

Funk, M. (2016). *Augmented Reality at the Workplace: A Context-Aware Assistive System using In-Situ Projection* (Dissertation). Universität Stuttgart.

Funk, M., Bächler, A., Bächler, L., Korn, O., Krieger, C., Heidenreich, T., & Schmidt, A. (2015a). *Comparing projected in-situ feedback at the manual assembly workplace*

with impaired workers Proceedings of the 8th ACM International Conference on PErvasive Technologies Related to Assistive Environments, Corfu, Greece.

Funk, M., Kosch, T., & Schmidt, A. (2016). *Interactive worker assistance: comparing the effects of in-situ projection, head-mounted displays, tablet, and paper instructions* Proceedings of the 2016 ACM International Joint Conference on Pervasive and Ubiquitous Computing, Heidelberg.

Funk, M., Lischke, L., Mayer, S., Shirazi, A. S., & Schmidt, A. (2018). Teach Me How! Interactive Assembly Instructions Using Demonstration and In-Situ Projection. In J. Huber, R. Shilkrot, P. Maes, & S. Nanayakkara (Hrsg.), *Assistive Augmentation* (S. 49-73). Springer. https://doi.org/10.1007/978-981-10-6404-3_4

Funk, M., Mayer, S., & Schmidt, A. (2015b). *Using In-Situ Projection to Support Cognitively Impaired Workers at the Workplace* Proceedings of the 17th International ACM SIGACCESS Conference on Computers & Accessibility, Lisbon, Portugal.

Fürntratt, E. (1969). Zur Bestimmung der Anzahl interpretierbarer gemeinsamer Faktoren in der Faktorenanalyse psychologischer Daten. *Diagnostica, 15*, 62-75.

Fürntratt, H., Murg, S., & Zeiner, H. (2016). DeepLearning basiertes Unter-stützungs-system für die Produktion. In B. Weyers & A. Dittmar (Hrsg.), *Mensch und Computer 2016 – Workshopband*. Gesellschaft für Informatik e.V. https://doi.org/10.18420/muc2016-ws04-0002

Geiser, G. (1997). Informationstechnische Arbeitsgestaltung. In H. Luczak & W. Volpert (Hrsg.), *Handbuch Arbeitswissenschaft* (S. 589–594). Schäffer-Poeschel.

Geissbauer, R., Schrauf, S., Koch, V., & Kuge, S. (2014). *Industrie 4.0 – Cahncen und Herausforderungen der vierten industriellen Revolution*. pwc.

Greif, S. (2004). Qualifizierung. In H. O. Häcker & K. H. Stapf (Hrsg.), *Dorsch Psychologisches Wörterbuch* (S. 776-777). Hans Huber.

Greiff, M. (2001). *Die Prognose von Lernkurven in der manuellen Montage unter besonderer Berücksichtigung der Lernkurven von Grundbewegungen*. VDI.

Große-Heitmeyer, V., & Wiendahl, H.-P. (2004). Einführung. In H.-P. Wiendahl, D. Gerst, & L. Keunecke (Hrsg.), *Variantenbeherrschung in der Montage: Konzept und Praxis der flexiblen Produktionsendstufe* (S. 3-17). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-642-18947-0_1

Haase, T., Keller, A., Radde, J., Berndt, D., Fredrich, H., & Dick, M. (2020a). Anforderungen an die lerntheoretische Gestaltung arbeitsplatzintegrierter VR-/AR-Anwendungen. In Gesellschaft für Arbeitswissenschaft e. V. (Hrsg.), *Digitaler Wandel, digitale Arbeit, digitaler Mensch?: Bericht zum 66. Frühjahrskongress der Gesellschaft für Arbeitswissenschaft e. V. (GfA) vom 16.03.- 18.03.2020 in Berlin* (B.16.1). GfA-Press.

Haase, T., Keller, A., Radde, J., Berndt, D., Fredrich, H., & Dick, M. (2020b). Integrierte Lern- und Assistenzsysteme - Vorschlag für eine Systematik zur Technologieauswahl und -gestaltung. In Gesellschaft für Arbeitswissenschaft e. V. (Hrsg.), *Digitaler Wandel, digitale Arbeit, digitaler Mensch?: Bericht zum 66. Frühjahrskongress der Gesellschaft für Arbeitswissenschaft e. V. (GfA) vom 16.03.-18.03.2020 in Berlin* (B.5.1). GfA-Press.

Hacker, W. (1986). *Arbeitspsychologie – Psychische Regulation von Arbeitstätigkeiten*. Hans Huber.

Hacker, W. (2005). *Allgemeine Arbeitspsychologie – Psychische Regulation von Wissens-, Denk- und körperlicher Arbeit*. Hans Huber.

Hacker, W. (2021). *Psychische Regulation von Arbeitstätigkeiten 4.0*. vdf.

Hamborg, K.-C. (2002). Gestaltungsunterstützende Evaluation von Software: Zur Effektivität und Effizienz des IsoMetricsL Verfahrens. In M. Herczeg, W. Prinz, & H. Oberquelle (Hrsg.), *Mensch & Computer 2002: Vom interaktiven Werkzeug zu kooperativen Arbeits- und Lernwelten* (S. 303-312). Vieweg+Teubner. https://doi.org/10.1007/978-3-322-89884-5_31

Hancock, P. A., & Warm, J. S. (1989). A dynamic model of stress and sustained attention. *Human Factors, 31*(5), 519-537.

Hart, S. G., & Staveland, L. E. (1988). Development of NASA-TLX (Task Load Index): Results of empirical and theoretical research. In P. A. Hancock & N. Meshkati (Hrsg.), *Human Mental Workload*. Elsevier.

Hartmann, T., & Reinecke, L. (2013). Skalenkonstruktion in der Kommunikationswissenschaft. In W. Möhring & D. Schlütz (Hrsg.), *Handbuch standardisierte Erhebungsverfahren in der Kommunikationswissenschaft* (S. 41-60). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-531-18776-1_3

Häßler, F., & Reis, O. (2005). Früherfassung von hyperkinetischen bzw. Aufmerksamkeitsdefizit/ Hyperaktivitätsstörungen. In W. Suchodoletz (Hrsg.), *Früherkennung von Entwicklungsstörungen* (S. 75-91). Hogrefe.

Heeg, F. J. (1988). *Moderne Arbeitsorganisation – Grundlagen der organisatorischen Gestaltung von Arbeitssystemen bei einsatz neuer Technologien*. Carl Hanser.

Heidemann, W.-R., & Zumbruch, I. (2012). Zertifizierte Apps: mehr Funktionalität, Sicherheit und Bedienungsfreundlichkeit. In S. Verclas & C. Linnhoff-Popien (Hrsg.), *Smart Mobile Apps: Mit Business-Apps ins Zeitalter mobiler Geschäftsprozesse* (S. 241-252). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-642-22259-7_16

Herder, C., & Aurich, J. C. (2016). Bewertungskonzept zur Identifikation von kognitiven Unterstützungstechnologien in der manuellen Montage. In R. Weidner (Hrsg.), *Technische Unterstützungssysteme, die die Menschen wirklich wollen* (S. 41-48). Helmut-Schmidt-Universität.

Hesse, S. (2012). Montagegerechte Produktgestaltung. In B. Lotter & H.-P. Wiendahl (Hrsg.), *Montage in der industriellen Produktion: Ein Handbuch für die Praxis* (S. 9-48). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-642-29061-9_2

Hinrichsen, S. (2020). Informatorische Gestaltung der Montage mittels Assistenzsystemen. In M. Bornewasser & S. Hinrichsen (Hrsg.), *Informatorische Assistenzsysteme in der variantenreichen Montage: Theorie und Praxis* (S. 21-42). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-662-61374-0_2

Hinrichsen, S., Adrian, B., & Bornewasser, M. (2020). Information Management Strategies in Manual Assembly. In T. Ahram, R. Taiar, V. Gremeaux-Bader, & K. Aminian (Hrsg.), *Human Interaction, Emerging Technologies and Future Applications II: Proceedings of the 2nd International Conference on Human Interaction and Emerging Technologies: Future Applications (IHIET – AI 2020), April 23-25, 2020, Lausanne, Switzerland* (S. 520-525). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-44267-5_78

Hinrichsen, S., & Bendzioch, S. (2018). How Digital Assistance Systems Improve Work Productivity in Assembly. In *Advances in Human Factors and Systems Interaction:*

Proceedings of the AHFE 2018 International Conference on Human Factors and Systems Interaction, July 21-25, 2018, Loews Sapphire Falls Resort at Universal Studios, Orlando, Florida, USA (S. 332-342). Springer.

Hinrichsen, S., & Bornewasser, M. (2019). How to Design Assembly Assistance Systems. In W. Karwowski & T. Ahram (Hrsg.), *Intelligent Human Systems Integration 2019: Proceedings of the 2nd International Conference on Intelligent Human Systems Integration (IHSI 2019)* (S. 286-292). Springer.

Hinrichsen, S., & Bornewasser, M. (2020). Veränderung der Gestaltungsparadigmen industrieller Montagearbeit. In M. Bornewasser & S. Hinrichsen (Hrsg.), *Informatorische Assistenzsysteme in der variantenreichen Montage: Theorie und Praxis* (S. 1–20). Springer Vieweg. https://doi.org/10.1007/978-3-662-61374-0_1

Hinrichsen, S., Riediger, D., & Unrau, A. (2016a). *Anforderungsgerechte Gestaltung von Montageassistenzsystemen*. REFA. Abgerufen 24.07.2021, von http://refa-blog.de/gestaltung-von-montageassistenzsystemen

Hinrichsen, S., Riediger, D., & Unrau, A. (2016b). Assistance Systems in Manual Assembly. In F.-J. Villmer & E. Padoano (Hrsg.), *Production Engineering and Management. Proceedings 6th International Conference* (S. 3-14). Hochschule Ostwestfalen-Lippe.

Hodic, L. (2005). *Entwicklung der Zeitdaten-Backend-Methode für die mathematische Verarbeitung betrieblicher Prozessdaten zu Planzeiten* (Dissertation). Technische Universität Chemnitz.

Hold, P. (2020). *Vorgehensmodell zur Planung und Evaluierung digitaler Assistenzsysteme in der Montage* (Dissertation). Technische universität Wien.

Hold, P., Erol, S., Reisinger, G., & Sihn, W. (2017). Planning and Evaluation of Digital Assistance Systems. *Procedia Manufacturing, 9*, 143-150. https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.04.024

Hold, P., Ranz, F., & Sihn, W. (2016a). Konzeption eines MTM-basierten Bewertungsmodells für digitalen Assistenzbedarf in der cyber-physischen Montage. In C. M. Schlick (Hrsg.), *Megatrend Digitalisierung - Potenziale der Arbeits- und Betriebsorganisation* (S. 295-322). GITO.

Hold, P., Ranz, F., Sihn, W., & Hummel, V. (2016b). Planning Operator Support in Cyber-Physical Assembly Systems. *IFAC-PapersOnLine, 49*(32), 60-65. https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2016.12.190

Hold, P., & Sihn, W. (2016). Towards a model to identify the need and the economic efficiency of digital assistance systems in cyber-physical assembly systems. In *2016 1st International Workshop on Cyber-Physical Production Systems (CPPS)* (S. 1-4). IEEE. https://doi.org/10.1109/CPPS.2016.7483914

Hollenberg, S. (2016). Formulierung und Reihenfolge von Fragebogen-Fragen. In *Fragebögen: Fundierte Konstruktion, sachgerechte Anwendung und aussagekräftige Auswertung* (S. 11-22). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-658-12967-5_3

Hollnagel, E. (1987). Information and reasoning in intelligent decision support systems. *International Journal of Man-Machine Studies, 27*(5), 665-678. https://doi.org/10.1016/S0020-7373(87)80023-8

Hou, L., Wang, X., Bernold, L., & Love, P. E. D. (2013). Using Animated Augmented Reality to Cognitively Guide Assembly. *Journal of Computing in Civil*

Engineering(27), 439-451. https://doi.org/10.1061/(ASCE)CP.1943-5487.0000184

Janke, W. (1973). Das Dilemma von Persönlichkeitsfragebogen. Einleitung des Symposiums über Konstruktion von Fragebogen. In G. Reinert (Hrsg.), *Bericht über den 27. Kongreß der Deutschen Gesellschaft für Psychologie in Kiel 1970* (S. 44-48). Hogrefe.

Jeske, T. (2013). *Entwicklung einer Methode zur Prognose der Anlernzeit sensumotorischer Tätigkeiten* (Dissertation). Shaker.

Jeske, T., Garrel, v. J., & Starke, J. (2011). Erfolgsfaktor Flexibilität: Ergebnisse einer deutschlandweiten Unternehmensbefragung. *Industrial Engineering – Fachzeitschrift des REFA-Bundesverbandes, 64*(1), 20-23.

Jeske, T., Meyer, F., & Schlick, C. M. (2014). Einfluss der Gestaltung von Arbeitsplänen auf die Anlernzeit sensumotorischer Tätigkeiten. *Zeitschrift für Arbeitswissenschaft, 68*(1), 1-6. https://doi.org/10.1007/BF03374416

Jonkisz, E., Moosbrugger, H., & Brandt, H. (2012). Planung und Entwicklung von Tests und Fragebogen. In H. Moosbrugger & A. Kelava (Hrsg.), *Testtheorie und Fragebogenkonstruktion* (S. 27-74). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-642-20072-4_3

Kagermann, H., Wahlster, W., & Helbig, J. (2013). *Deutschlands Zukunft als Produktionsstandort sichern: Umsetzungsempfehlungen für das Zukunftsprojekt Industrie 4.0 – Abschlussbericht des Arbeitskreises Industrie 4.0*. Forschungsunion.

Kahneman, D., & Schmidt, T. (2012). *Schnelles Denken, langsames Denken*. Siedler.

Kaiser, H., & Rice, J. (1974). Little Jiffy, Mark IV. *Educational and Psychological Measurement, 34*(1), 111-117.

Kasselmann, S., & Willeke, S. (2018). *Technologie Kompendium: Interaktive Assistenzsysteme*. Abgerufen 05.03.2021, von https://www.iph-hannover.de/_media/files/downloads/Projekt_40-Ready_Technologie-Kompendium.pdf

Kelava, A., & Moosbrugger, H. (2020). Deskriptivstatistische Itemanalyse und Testwertbestimmung. In H. Moosbrugger & A. Kelava (Hrsg.), *Testtheorie und Fragebogenkonstruktion* (S. 143-158). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-662-61532-4_7

Keller, D. (2017). *Was ist Reliabilität einer Messung?* Abgerufen 27.03.2022, von https://statistik-und-beratung.de/2017/08/was-ist-die-reliabilitaet-einer-messung/

Keller, T., Behling, M., Stockinger, C., Metternich, J., & Schützer, K. (2021). Analysis of the influence of process complexity and employee competence on the effect of digital assistance in industrial assembly. *Production Engineering, 15*(1), 1-8. https://doi.org/10.1007/s11740-020-01005-3

Kirchner, J.-H. (1986). Belastungen und Beanspruchungen — Einige begriffliche Klärungen zum Belastungs- Beanspruchungs-Konzept. In R. Hackstein, F.-J. Heeg, & F. Below (Hrsg.), *Arbeitsorganisation und Neue Technologien: Impulse für eine weitere Integration der traditionellen arbeitswissenschaftlichen Entwicklungsbereiche* (S. 553-569). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-642-93339-4_23

Klabunde, S. (2003). Wissen als Katalysator eines integrierten Produktentstehungsprozesses. In *Wissensmanagement in der integrierten Produkt-*

und Prozessgestaltung: Best-Practice-Modelle zum Management von Meta-Wissen (S. 1-12). Deutscher Universitätsverlag. https://doi.org/10.1007/978-3-322-81996-3_1

Klapper, J., Gelec, E., Pokorni, B., Hämmerle, M., & Rothenberger, R. (2019). *Potenziale digitaler Assistenzsysteme – Aktueller und zukünftiger Einsatz digitaler Assistenzsysteme in produzierenden Unternehmen*. Fraunhofer IAO.

Kleineberg, T., Eichelberg, M., & Hinrichsen, S. (2017a). Participative development of an implementation process for worker assistance systems. In F. J. Villmer & E. Padoano (Hrsg.), *Production engineering and management* (S. 25-36). Hochschule Ostwestfalen-Lippe.

Kleineberg, T., Hinrichsen, S., Eichelberg, M., Busch, F., Brockmann, D., & Vierfuß, R. (2017b). *Leitfaden: Einführung von Assistenzsystemen in der Montage*. Abgerufen 02.03.2020, von https://www.th-owl.de/files/webs/produktion/download/labore/industrialengineering/pdf/Veroeffentlichungen/Leitfaden_Einfuehrung_von_Assistenzsystemen_in_der_Montage.pdf.

Konold, P., & Reger, H. (2003). Teil A. In *Praxis der Montagetechnik: Produktdesign, Planung, Systemgestaltung* (S. 1-152). Vieweg+Teubner Verlag. https://doi.org/10.1007/978-3-663-01609-0_1

Korn, O., Abele, S., Schmidt, A., & Hörz, T. (2013). Augmentierte Produktion. Assistenzsysteme mit Projektion und Gamification für leistungsgeminderte und leistungsgewandelte Menschen. In S. Boll, S. Maaß, & R. Malaka (Hrsg.), *Mensch & Computer 2013 – Tagungsband* (S. 119-128). Oldenbourg Wissenschaftsverlag. https://doi.org/10.1524/9783486781229

Krause, D., & Gebhardt, N. (2018). Zusammenhänge und Auswirkungen der Vielfalt. In *Methodische Entwicklung modularer Produktfamilien: Hohe Produktvielfalt beherrschbar entwickeln* (S. 19-65). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-662-53040-5_2

Krause, D., Spallek, J., Blees, C., & Kipp, T. (2018). Modulare Produktstrukturierung. In F. Rieg & R. Steinhilper (Hrsg.), *Handbuch Konstruktion* (S. 717-741). Carl Hanser. https://doi.org/10.3139/9783446456198.025

Krcmar, H. (2015). *Informationsmanagement*. Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-662-45863-1

Landau, K. (2019). *Mehr Tun Müssen?: 100 Jahre Produktivitätsmanagement*. Ergonomia.

Lang, S. (2007). *Durchgängige Mitarbeiterinformation zur Steigerung von Effizienz und Prozesssicherheit in der Produktion* (Dissertation). Meisenbach.

Lindemann, U., & Baumberger, G. C. (2006). Individualisierte Produkte. In U. Lindemann, R. Reichwald, & M. F. Zäh (Hrsg.), *Individualisierte Produkte — Komplexität beherrschen in Entwicklung und Produktion* (S. 7-16). Springer. https://doi.org/10.1007/3-540-34274-5_2

Litfin, T., Clement, M., & Teichmann, M.-H. (2000). Beurteilung der Güte von explorativen Faktorenanalysen im Marketing. *WiSt – Wirtschaftswissenschaftliches Studium, 29*, 283-286.

Lotter, B. (2012a). Die Primär-Sekundär-Analyse. In B. Lotter & H.-P. Wiendahl (Hrsg.), *Montage in der industriellen Produktion: Ein Handbuch für die Praxis* (S. 49-78). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-642-29061-9_3

Lotter, B. (2012b). Einführung. In B. Lotter & H.-P. Wiendahl (Hrsg.), *Montage in der industriellen Produktion: Ein Handbuch für die Praxis* (S. 1-8). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-642-29061-9_1

Lotter, B. (2012c). Manuelle Montage von Kleingeräten. In B. Lotter & H.-P. Wiendahl (Hrsg.), *Montage in der industriellen Produktion: Ein Handbuch für die Praxis* (S. 109-146). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-642-29061-9_5

Lotter, B. (2012d). Überlegungen zum Montagestandort Deutschland. In B. Lotter & H.-P. Wiendahl (Hrsg.), *Montage in der industriellen Produktion: Ein Handbuch für die Praxis* (S. 389-396). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-642-29061-9_14

Lotter, E. (2012). Hybride Montagesysteme. In B. Lotter & H.-P. Wiendahl (Hrsg.), *Montage in der industriellen Produktion: Ein Handbuch für die Praxis* (S. 167-193). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-642-29061-9_7

Luczak, H. (1986). Manuelle Montagesysteme. In G. Spur & T. Stöferle (Hrsg.), *Handbuch der Fetigungstechnik, Band 5 – Fügen, Handhaben, Montieren* (S. 620-682). Hanser Fachbuchverlag.

Luczak, H. (1989). Wesen menschlicher Leistung. In W. Brokmann (Hrsg.), *Arbeitsgestaltung in Produktion und Verwaltung* (S. 39-64). Bachem.

Luczak, H. (1998a). Arbeitsorganisation. In H. Luczak (Hrsg.), *Arbeitswissenschaft* (S. 495-585). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-662-05831-2_20

Luczak, H. (1998b). Konstitutionsmerkmale. In H. Luczak (Hrsg.), *Arbeitswissenschaft* (S. 191-215). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-662-05831-2_5

Luczak, H. (1998c). Konzepte und Methoden der Arbeitsanalyse. In H. Luczak (Hrsg.), *Arbeitswissenschaft* (S. 25-51). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-662-05831-2_2

Luczak, H. (1998d). Prinzipien menschlicher Informationsverarbeitung — Analytik und Gestaltung informatorisch-mentaler Arbeit. In H. Luczak (Hrsg.), *Arbeitswissenschaft* (S. 55-142). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-662-05831-2_3

Luczak, H. (1998e). Qualifikationsmerkmale. In H. Luczak (Hrsg.), *Arbeitswissenschaft* (S. 255-266). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-662-05831-2_7

Lušić, M., Fischer, C., Bönig, J., Hornfeck, R., & Franke, J. (2016). Worker Information Systems: State of the Art and Guideline for Selection under Consideration of Company Specific Boundary Conditions. *Procedia CIRP, 41*, 1113-1118. https://doi.org/10.1016/j.procir.2015.12.003

Maier, R., Hädrich, T., & Peinl, R. (2005). Foundation. In *Enterprise Knowledge Infrastructures* (S. 1-81). Springer. https://doi.org/10.1007/3-540-27514-2_1

Marcus, B., & Bühner, M. (2009). Skalenbildung: Faktorenanalyse, Aggregation von Items und Normierung In B. Marcus & M. Bühner (Hrsg.), *Grundlagen der Testkonstruktion* (S. 95-164). FernUniversität Hagen.

Marks, A. F. (2019). *Wirtschaftliche Mitarbeiterqualifizierung durch lernorientierte Montagesystemgestaltung* (Dissertation). Apprimus.

Mathieu, J., & Ross, C. A. (1955). *Die Anlernung von Industriearbeitern. — I. Ergebnisse einer grundsätzlichen Untersuchung der gegenwärtigen Industriearbeiter-Kurzanlernung*. Westdeutscher Verlag.

Mattsson, S. (2013a). *What is perceived as complex in final assembly? -To define,*

measure and manage production complexity (Licentiate Thesis). Chalmers University of Technology.

Mattsson, S. (2013b). *What is perceived as complex in final assembly? To define, measure and manage production complexity* (Dissertation). Chalmers University of Technology.

Mattsson, S., & Fast-Berglund, Å. (2016). How to Support Intuition in Complex Assembly? *Procedia CIRP, 50*, 624-628. https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.05.014

Mattsson, S., Fasth, Å., Stahre, J., Karlsson, M., Dencker, K., Gullander, P., & Davidsson, A. (2013). *Validation of the complexity index method at three manufacturing companies* 2013 IEEE International Symposium on Assembly and Manufacturing (ISAM),

Mattsson, S., Gullander, P., & Davidsson, A. (2011). *Method for Measuring Production Complexity* International Manufacturing Conference IMC 28 - Manufacturing Sustainability, Dublin.

Mattsson, S., Gullander, P., Harlin, U., Bäckstrand, G., Fasth, Å., & Davidsson, A. (2012). *Testing Complexity Index – a Method for Measuring Perceived Production Complexity* 45th CIRP Conference on Manufacturing Systems 2012,

Mattsson, S., Karlsson, M., Gullander, P., Van Landeghem, H., Zeltzer, L., Limère, V., Aghezzaf, E.-H., Fasth, Å., & Stahre, J. (2014). Comparing quantifiable methods to measure complexity in assembly. *International Journal of Manufacturing Research, 9*(1), 112-130. https://doi.org/10.1504/IJMR.2014.059602

Mayring, P. (2000). Qualitative Inhaltsanalyse. In U. Flick, E. Kardorff, & I. Steinke (Hrsg.), *Qualitative Forschung: Ein Handbuch* (S. 468-475). Rowohlt-Taschenbuch-Verlag.

Merazzi, J., & Friedel, A. (2017). Einteilung und Bewertung von Montageassistenzsystemen. *ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb, 112*, 413-416. https://doi.org/10.3139/104.111740

Miller, G. A. (1956). The Magical Number Seven, Plus Or Minus Two: Some Limits on Our Capacity for Processing Information. *Psychological Review, 63*(2), 81-97. https://doi.org/10.1037/h0043158

Mißfeldt, M. (o. J.). *Sehtest mit Buchstaben*. Abgerufen 04.02.2021, von https://www.sehtestbilder.de/sehtest-ausdrucken-buchstaben.php

Müller, R., Vette, M., Mailahn, O., Ginschel, A., & Ball, J. (2014). Innovative Produktionsassistenz für die Montage: Intelligente Werkerunterstützung bei der Montage von Großbauteilen in der Luftfahrt. *wt Werkstattstechnik online, 104*(9), 552-560.

Nawi, F. A. M., Tambi, A. M. A., Samat, M. F., & Mustapha, W. M. W. (2020). A Review on The Internal Consistency of a Scale: The Empirical Example of The Influence of Human Capital Investment on Malcom Baldridge Quality Principles in TVET Institutions. *Asian People Journal, 3*(1), 19-29.

Niehaus, J. (2017). *Mobile Assistenzsysteme für Industrie 4.0: Gestaltungsoptionen zwischen Autonomie und Kontrolle* (Bd. 4). Forschungsinstitut für gesellschaftliche Weiterentwicklung e.V. (FGW).

Nygren, T. E. (1991). Psychometric Properties of Subjective Workload Measurement

Techniques: Implications for Their Use in the Assessment of Perceived Mental Workload. *Human Factors, 33*(1), 17-33.

Ott, M. (2018). Konzeption und Prototyping. In M. Ott (Hrsg.), *Apps effektiv managen und vermarkten: Die eigene App erfolgreich veröffentlichen: Von der Konzeption bis zur Vermarktung* (S. 17-26). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-658-22296-3_3

Pierre De, L., Delchambre, A., & Henrioud, J. (2003). An integrated approach for product family and assembly system design. *IEEE Transactions on Robotics and Automation, 19*(2), 324-334. https://doi.org/10.1109/TRA.2003.808853

Porst, R. (2011). Question Wording – Zur Formulierung von Fragebogen-Fragen. In R. Porst (Hrsg.), *Fragebogen: Ein Arbeitsbuch* (S. 95-114). VS Verlag. https://doi.org/10.1007/978-3-531-92884-5_7

Prabaswari, A. D., Basumerda, C., & Utomo, B. W. (2019). The Mental Workload Analysis of Staff in Study Program of Private Educational Organization. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering: 11th ISIEM (International Seminar on Industrial Engineering & Management, "Technology and Innovation Challenges Towards Industry 4.0 Era" 27–29 November 2018* (Bd. 528). IOP Publishing. https://doi.org/10.1088/1757-899X/528/1/012018

Prerender. (2021). *Frontend- vs. Backend-Entwicklung: Wo soll ich mit meiner Web-App anfangen?* Abgerufen 15.05.2022, von https://prerender.io/de/frontend-vs-backend-should-i-start-with-the-front-end-or-back-end-of-my-web-app/

Prümper, J. (o.J.). *Fragebogen ISONORM 9241/110-S: Beurteilung von Software auf Grundlage der Internationalen Ergonomie-Norm DIN EN ISO 9241-110*. Abgerufen 29.03.2020, von http://www.uselab.tu-berlin.de/wiki/images/6/62/ISONorm_Kurzversion.pdf

Rammstedt, B. (2004). *Zur Bestimmung der Güte von Multi-Item-Skalen: eine Einführung* (Bd. 12). ZUMA.

Rammstedt, B. (2010). Reliabilität, Validität, Objektivität. In C. Wolf & H. Best (Hrsg.), *Handbuch der sozialwissenschaftlichen Datenanalyse* (S. 239-258). VS Verlag für Sozialwissenschaften. https://doi.org/10.1007/978-3-531-92038-2_11

Rau, R., & Hoppe, J. (2020). *Neue Technologien und Digitalisierung in der Arbeitswelt: Erkenntnisse für die Prävention und Betriebliche Gesundheitsförderung*. Initiative Gesundheit und Arbeit (iga).

REFA. (1997). *Methodenlehre der Betriebsorganisation – Datenermittlung*. Carl Hanser.

REFA. (2016). Erfolgreiche Unternehmen. In *Arbeitsorganisation erfolgreicher Unternehmen - Wandel in der Arbeitswelt* (S. 21-88). Hanser. https://doi.org/10.3139/9783446448346.002

REFA-Bundesverband e.V. (1991). *Methodenlehre der Betriebsorganisation – Anforderungsermittlung*. Hanser.

REFA-Bundesverband e.V. (2014). *REFA-Grundausbildung 2.0 – Lehrunterlage zu Teil 2A: Ermittlung und Anwendung von Prozessdaten. Modul 2: Arbeitssystemgestaltung*. REFA.

Reinhart, G., Shen, Y., & Spillner, R. (2013). Hybride Systeme – Arbeitsplätze der Zukunft * – Nachhaltige und flexible Produktivitätssteigerung in hybriden Arbeitssystemen. *wt Werkstattstechnik online, 103*(6), 543-547.

Reiss, M. (1997). Chancen- und Risikenmanagement im Change Management. In M. Reiss, L. v. Rosenstiel, & A. Lanz (Hrsg.), *Change Management: Programme, Projekte und Prozesse* (S. 109-122). Schäffer-Poeschel.

Ries, E. (2017). *Lean startup – Schnell, risikolos und erfolgreich Unternehmen gründen*. Redline.

Rohmert, W. (1967). Kybernetische Aspekte der Arbeitswissenschaft bei zunehmender Automatisierung. *VDI-Zeitschrift, 109*(27), 1283-1290.

Rohmert, W. (1983). Formen menschlicher Arbeit. In W. Rohmert & J. Rutenfranz (Hrsg.), *Praktische Arbeitsphysiologie* (Bd. 3, S. 5-29). Georg Thieme.

Rohmert, W. (1984). Das Belastungs-Beanspruchungs-Konzept. *Zeitschrift für Arbeitswissenschaft, 38*(4), 193-200.

Rohmert, W., & Kirchner, J.-H. (1969). *Anlernung sensumotorischer Fertigkeiten in der Industrie (Ergebnisse einer Industriebefragung)* (Bd. 10). Beuth.

Rutenfranz, J., & Iskander, A. (1970). Untersuchungen über die Beeinflussung des Erlernens einer einfachen sensumotorischen Fertigkeit durch die Bekanntgabe der Lernresultate bei verschiedenen Übungsbedingungen. *Internationale Zeitschrift für angewandte Physiologie einschließlich Arbeitsphysiologie, 29*(1), 44-54. https://doi.org/10.1007/BF00695707

Samtleben, S., & Rose, D. (2019). Die kleinen Helfer in der Produktion – ein Assistenzsystem wird konzipiert. In J. v. Garrel (Hrsg.), *Digitalisierung der Produktionsarbeit: Arbeitsfähig sein und bleiben* (S. 197-214). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-658-27703-1_12

Samy, S. N., & ElMaraghy, H. (2010). A model for measuring products assembly complexity. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing, 23*(11), 1015-1027. https://doi.org/10.1080/0951192X.2010.511652

Sauter, M., & Killisch-Horn, G. (2011). Produktivitätsmanagement in einer variantenreichen Fertigung. *Zeitschrift für Arbeitswirtschaft, 494/497*.

Schelten, A. (2005). *Grundlagen der Arbeitspädagogik*. Steiner.

Schenk, M., Haase, T., Keller, A., & Berndt, D. (2016). Herausforderungen der Mensch-Technik-Interaktion für die Gestaltung zukünftiger Arbeitssysteme. In C. Schlick (Hrsg.), *Megatrend Digitalisierung - Potenziale der Arbeits- und Betriebsorganisation* (S. 295-322). GITO.

Schenk, M., Wirth, S., & Müller, E. (2014). Einleitung. In M. Schenk, S. Wirth, & E. Müller (Hrsg.), *Fabrikplanung und Fabrikbetrieb: Methoden für die wandlungsfähige, vernetzte und ressourceneffiziente Fabrik* (S. 1-6). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-642-05459-4_1

Schlick, C., Bruder, R., & Luczak, H. (2018a). Arbeitsformen. In *Arbeitswissenschaft* (S. 141-275). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-662-56037-2_3

Schlick, C., Bruder, R., & Luczak, H. (2018b). Arbeitspersonen. In C. Schlick, R. Bruder, & H. Luczak (Hrsg.), *Arbeitswissenschaft* (S. 59-139). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-662-56037-2_2

Schlick, C., Bruder, R., & Luczak, H. (2018c). Arbeitswissenschaft im Umriss: Disziplinen- und Konzeptstruktur. In C. Schlick, R. Bruder, & H. Luczak (Hrsg.), *Arbeitswissenschaft* (S. 1-58). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-662-56037-2_1

Schlick, C., Jeske, T., Jochems, N., Hasenau, K., & Tackenberg, S. (2010a). Untersuchung des Einflusses der informatorischen Reichhaltigkeit von Arbeitsplänen auf die Anlernzeit sensumotorischer Fertigkeiten. In P. Nyhuis (Hrsg.), *Wandlungsfähige Produktionssysteme, Schriftenreihe der Hochschulgruppe für Arbeits- und Betriebsorganisation e.V. (HAB)* (S. 325-344). Gito.

Schlick, C., Luczak, H., & Bruder, R. (2010b). Arbeitsformen. In C. Schlick, R. Bruder, & H. Luczak (Hrsg.), *Arbeitswissenschaft* (S. 223-432). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-540-78333-6_3

Schmauder, M., & Spanner-Ulmer, B. (2014). *Ergonomie: Grundlagen zur Interaktion von Mensch, Technik und Organisation*. Hanser.

Schmidtke, H., & Jastrzebska-Fraczek, I. (2013). *Ergonomie: Daten zur Systemgestaltung und Begriffsbestimmungen*. Hanser. https://doi.org/10.1007/978-3-540-85138-7

Schmuntzsch, U., Rötting, M., Hartwig, M., & Windel, A. (2013). Neue Formen adaptiver und handlungsleitender Informationen im Arbeitskontext. *Zeitschrift für Arbeitswissenschaft, 67*(3), 151-157. https://doi.org/10.1007/BF03374402

Schoeneberg, K.-P. (2014). Komplexität – Einführung in die Komplexitätsforschung und Herausforderungen für die Praxis. In K.-P. Schoeneberg (Hrsg.), *Komplexitätsmanagement in Unternehmen: Herausforderungen im Umgang mit Dynamik, Unsicherheit und Komplexität meistern* (S. 13-27). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-658-01284-7_2

Schoeneberg, K.-P., & Pein, J. (2014). Entscheidungsfindung mit Big Data – Einsatz fortschrittlicher Visualisierungsmöglichkeiten zur Komplexitätsbeherrschung betriebswirtschaftlicher Sachverhalte im Unternehmen. In K.-P. Schoeneberg (Hrsg.), *Komplexitätsmanagement in Unternehmen: Herausforderungen im Umgang mit Dynamik, Unsicherheit und Komplexität meistern* (S. 309-354). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-658-01284-7_14

Schuerger, J. M., Zarrella, K. L., & Hotz, A. S. (1989). Factors that influence the temporal stability of personality by questionnaire. *Journal of Personality and Social Psychology, 56*, 777-783.

Schuh, G. (2005). Umgang mit der Komplexität. In G. Schuh (Hrsg.), *Produktkomplexität managen* (S. 1-33). Carl Hanser. https://doi.org/10.3139/9783446443549.001

Schuh, G., & Bender, D. (2012). Grundlagen des Innovationsmanagements. In G. Schuh (Hrsg.), *Innovationsmanagement: Handbuch Produktion und Management 3* (S. 1-16). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-642-25050-7_1

Schuh, G., Gartzen, T., & Wagner, J. (2015). Complexity-oriented ramp-up of assembly systems. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology, 10*, 1-15. https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2015.05.007

Schuh, G., Stölzle, W., & Straube, F. (2008). Grundlagen des Anlaufmanagements: Entwicklungen und Trends, Definitionen und Begriffe, Integriertes Anlaufmanagementmodell. In G. Schuh, W. Stölzle, & F. Straube (Hrsg.), *Anlaufmanagement in der Automobilindustrie erfolgreich umsetzen: Ein Leitfaden für die Praxis* (S. 1-6). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-540-78407-4_1

Schwarz, J., Käch, W., & Bruderer Enzler, H. (2022). *Faktorenanalyse*. Universität Zürich. Abgerufen 25.03.2022, von

https://www.methodenberatung.uzh.ch/de/datenanalyse_spss/interdependenz/reduktion/faktor.html

Sehr, P., & Moriz, N. (2019). *Partitioning Manual Assembly Workstations for Flexible Manufacturing* 2019 24th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA),

Sehr, P., Nikolenko, A., & Wilke, A. (2020). Fallstudie zur Einführung eines Montageassistenzsystems bei einem Spezialanbieter im Nutzfahrzeugmarkt. In M. Bornewasser & S. Hinrichsen (Hrsg.), *Informatorische Assistenzsysteme in der variantenreichen Montage: Theorie und Praxis* (S. 159-171). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-662-61374-0_8

Seliger, G. (2018). Montage und Demontage. In K.-H. Grote, B. Bender, & D. Göhlich (Hrsg.), *Dubbel: Taschenbuch für den Maschinenbau* (S. 1503-1509). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-662-54805-9_117

Silberer, P. (1932). *Arbeits-Schulung: Wirtschaftliche Lehr- und Anlernmethoden in Industrie und Gewerbe*. Polygraphischer Verlag.

Smith, K. E. (2001). The Concept and Importance of Productivity. In K. B. Zandin (Hrsg.), *Maynard´s Industrial Engineering Handbook* (Bd. 5, S. 2.3-2.10). McGraw-Hill.

Sokolowski, O. (2011). *Komplexitätsmanagement*. GRIN Verlag.

Sommer, S. (2008). Einleitung. In S. Sommer (Hrsg.), *Taschenbuch automatisierte Montage- und Prüfsysteme: Qualitätstechniken zur fehlerfreien Produktion* (S. 1-7). Hanser. https://doi.org/10.3139/9783446416758.001

Spur, G., & Helwig, H.-J. (1986). Einführung in die Montagetechnik. In G. Spur & T. Stöferle (Hrsg.), *Handbuch der Fetigungstechnik, Band 5 – Fügen, Handhaben, Montieren* (S. 591-606). Hanser Fachbuchverlag.

Statistisches Bundesamt. (2019). *Statistisches Jahrbuch Deutschland und Internationales 2019*. Statistisches Bundesamt.

Stewart, D. (1981). The Application and Misapplication of Factor Analysis in Marketing Research. *Journal of Marketing Research, 18*(1), 51-62.

Stoessel, C., Wiesbeck, M., Stork, S., Zaeh, M. F., & Schuboe, A. (2008). Towards Optimal Worker Assistance: Investigating Cognitive Processes in Manual Assembly. In M. Mitsuishi, K. Ueda, & F. Kimura, *Manufacturing Systems and Technologies for the New Frontier* London.

Strasser, H. (1993). Kompatibilität. In T. Hettinger & G. Wobbe (Hrsg.), *Kompendium der Arbeitswissenschaft* (S. 228-242). Kiehl.

Sumanth, D. J. (1997). *Total Productivity Management (TPmgt): A Systemic and Quantitative Approach to Compete in Quality, Price and Time*. CRC Press.

Tabachnick, B. G., & Fidell, L. S. (2013). *Using multivariate statistics* (Bd. 6). Pearson.

Teubner, S., Reinhart, G., Haymerle, R., & Merschbecker, U. (2016). Individuelle und dynamische Werkerinformationssysteme: Einordnung, Definition und Beschreibungsmodell. In R. Weidner (Hrsg.), *Technische Unterstützungssysteme, die die Menschen wirklich wollen* (S. 349-364). Helmut-Schmidt-Universität.

Thiebes, F., & Plankert, N. (2014). Umgang mit Komplexität in der Produktentwicklung – Komplexitätsbeherrschung durch Variantenmanagement. In K.-P. Schoeneberg (Hrsg.), *Komplexitätsmanagement in Unternehmen: Herausforderungen im Umgang*

mit Dynamik, Unsicherheit und Komplexität meistern (S. 165-185). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-658-01284-7_8

Toutenburg, H., & Knöfel, P. (2009). *Six Sigma: Methoden und Statistik für die Praxis* (Bd. 2). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-540-85138-7

Ulich, E. (1967). Über verschiedene Methoden des Lernens sensumotorischer Fertigkeiten. *Arbeitswissenschaft, 6*(2), 48-50.

VDI 2860. (1990). *Montage- und Handhabungstechnik; Handhabungsfunktionen, Handhabungseinrichtungen; Begriffe, Definitionen, Symbole*. Beuth.

VDI 4500-1. (2006). *Technische Dokumentation - Begriffsdefinitionen und rechtliche Grundlagen*. Beuth.

VDI/VDE/VDMA 2632-2. (2015). *Industrielle Bildverarbeitung Leitfaden für die Erstellung eines Lastenhefts und eines Pflichtenhefts*. Berlin.

Warnecke, H.-J. (1993). Produktion. In *Der Produktionsbetrieb 2: Produktion, Produktionssicherung* (S. 1-108). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-642-97446-5_1

Warnecke, H.-J., Löhr, H. G., & Kiener, W. (1975). *Montagetechnik: Schwerpunkt der Rationalisierung*. Krausskopf.

Weber, H. K. (1983). *Rentabilität, Produktivität, Liquidität der Unternehmung: Größen zur Beurteilung und Steuerung von Unternehmen*. Gabler.

Weise, G. (1975). *Psychologische Leistungstests*. Hogrefe.

Wickens, C. (2008). Multiple Resources and Mental Workload. *Human Factors, 50*, 449-455. https://doi.org/10.1518/001872008X288394

Wickens, C. D. (1992). *Engineering Psychology and Human Performance* (Bd. 2). Herper Collins.

Wickens, C. D., & Hollands, J. G. (2000). *Engineering Psychology and Human Performance* (Bd. 3). Prentice Hall.

Wiesbeck, M. (2013). *Struktur zur Repräsentation von Montagesequenzen für die situationsorientierte Werkerführung* (Dissertation). Universität München.

Wildemann, H. (2014). *Produktivitätsverbesserung: Leitfaden zur kurzfristigen und permanenten Produktivitätssteigerung in kleinen und mittleren Unternehmen* (Bd. 15). TCW.

Willnecker, U. (2000). *Gestaltung und Planung leistungsorientierter manuller Fließmontagen* (Dissertation). TU München.

Wodtke, C. (2016). *Introduction to OKRs*. O'Reilly.

Young, M. S., Brookhuis, K. A., Wickens, C. D., & Hancock, P. A. (2015). State of science: mental workload in ergonomics. *Ergonomics, 58*(1), 1-17. https://doi.org/10.1080/00140139.2014.956151

Zachmann, J. P. (o. J.). *The Zachman Framework Evolution*. Abgerufen 11.05.2016, von https://www.zachman.com/ea-articlesreference/54-the-zachman-framework-evolution.

Zäh, M., Wiesbeck, M., Engstler, F., Friesdorf, F., Schubö, A., Stork, S., Bannat, A., & Wallhoff, F. (2007). Kognitive Assistenzsysteme in der manuellen Montage. *wt Werkstattstechnik online, 97*(9), 644-650.

Zeltzer, L., Limère, V., Aghezzaf, E.-H., & Van Landeghem, H. (2012). *Measuring the Objective Complexity of Assembly Workstation* ICCGI – 7th International Multi-Conference on Computing in the Global Information Technology, Venice, Italy.

Zhu, X., Jack Hu, S., Koren, Y., & Marin, S. P. (2008). Modeling of Manufacturing Complexity in Mixed-Model Assembly Lines. *Journal of Manufacturing Science and Engineering, 130*(5). https://doi.org/10.1115/1.2953076

Abkürzungsverzeichnis

AM	Arbeitsmittel
AP	Arbeitsplan
AR	Augmented Reality
CORAA	Complexity Rating for Assembly Assistance
CXI	CompleXity Index
DFMA	Design for Manufacture and Assembly
DGUV	Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung
DIN	Deutsche Institut für Normung e.V.
EKG	Elektrokardiografie
EN	Europäische Normen
ERP	Enterprise Resource Planning
ESD	Electro Static Discharge
GUI	Graphical User Interface
IEC	International Electrotechnical Commission
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
I/O	Input/ Output bzw. Eingabe/ Ausgabe
IP	Internet Protokoll
ISO	Internationale Organisation für Normung
KMO	Kaiser-Meyer-Olkin Kriterium
KVP	Kontinuierlicher Verbesserungsprozess
MAMOS	Marktorientierte Montagestrukturen
MES	Manufacturing Execution System
MO	Montageobjekt
MP	Montageprozess
MRT	Multiple Ressourcentheorie nach Wickens
MSA	Measure of Sampling Adequacy

MTM	Methods-Time Measurement
MTM-1	Methods-Time Measurement - Grundsystem
MTM-UAS	Methods-Time Measurement - Universelles Analysiersystem
NASA-TLX	National Aeronautics and Space Administration -Task Load Index
OKR	Objectives and Key Results
PEflex	flexibles Produktionsstufenkonzept
QMS	Qualitätsmanagementsystem
REFA	Verband für Arbeitsgestaltung, Betriebsorganisation und Unternehmensentwicklung e. V.
RFID	Radio-Frequency Identification
RS232	Recommended Standard 232 (Standard für eine serielle Schnittstelle)
SMART	Spezifisch, Messbar, Anspruchsvoll, Realistisch und Terminiert
SUS	System Usability Scale
SvZ	Systeme vorbestimmter Zeit
TCP/ IP	Transmission Control Protocol/ Internet Protocol
VDE	Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e. V.
VDI	Verein Deutscher Ingenieure e.V.
VDMA	Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau e. V.
VR	Virtual Reality
WF	Work-Factor

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1.1 Aufbau der Arbeit im Überblick 7

Abb. 2.1: Generisches Modell eines Montagesystems (Hinrichsen & Bornewasser, 2020; Schlick et al., 2018c, modifiziert) 12

Abb. 2.2: Organisationsformen der Montage (Seliger, 2018, modifiziert) 13

Abb. 2.3 Auszug über mögliche Einflussgrößen auf die Arbeitsproduktivität in der manuellen Montage (Bendzioch et al., 2020d; Wildemann, 2014, modifiziert) 21

Abb. 2.4: Merkmale menschlicher Leistung (Luczak, 1989, modifiziert) 22

Abb. 2.5: Modell der Informationsverarbeitung (Schlick et al., 2010b; Wickens & Hollands, 2000, modifiziert) 24

Abb. 2.6 Arten der Qualifizierung (Elbracht, 2000; Schelten, 2005, modifiziert) 25

Abb. 2.7 Schematische Darstellung der Anlernzeit (Schlick et al., 2010a, modifiziert) 27

Abb. 2.8 Belastungs-Beanspruchungs-Konzept (Rohmert, 1983, modifiziert) 30

Abb. 2.9 Wirkprinzip des informatorischen Assistenzsystems (Bornewasser et al., 2018, modifiziert) 36

Abb. 2.10 Beamergestütztes Assistenzsystem zur Montage von Pneumatikbaugruppen 38

Abb. 3.1 Auszug aus dem Einführungsmodell von Kleineberg et al. (2017b) 53

Abb. 4.1 Papiergestützte Informationsbereitstellung – Kontrollmedium 64

Abb. 4.2 Datenbrillengestütztes Assistenzsystem 65

Abb. 4.3 Tabletgestütztes Assistenzsystem 66

Abb. 4.4 Beamergestütztes Assistenzsystem 67

Abb. 4.5 Berücksichtigte Baugruppen im Forschungsdesign 68

Abb. 4.6 Versuchsaufbau der empirischen Laborstudie 69

Abb. 4.7 Mittlere Ausführungsdauer der Wiederholungen (W) in Abhängigkeit von den Baugruppen 74

Abb. 4.8 Montagefehler über alle Baugruppen und Wiederholungen 77

Abb. 4.9 Kommissionierfehler über alle Baugruppen und Wiederholungen 78

Abb. 4.10 Mittlerer NASA-TLX Gesamtscore für jede Wiederholung der drei Baugruppen ... 79

Abb. 4.11 Arbeitsproduktivität für die drei Baugruppen der empirischen Untersuchung 83

Abb. 5.1 Festgelegtes Antwortformat des Fragebogens 90

Abb. 5.2 Scree-Plot zu den Eigenwerten der verbleibenden 16 Variablen 103

Abb. 6.1 Phase I des Handlungsleitfadens im Überblick (Bendzioch et al., 2020b, modifiziert) 124

Abb. 6.2 Phase II des Handlungsleitfadens im Überblick (Bendzioch et al., 2020b, modifiziert) 129

Abb. 6.3 Funktionskonzept bzw. Schichtenmodell eines informatorischen Assistenzsystems (Bendzioch et al., 2020b, modifiziert) 131

Abb. 6.4 Phase III des Handlungsleitfadens im Überblick (Bendzioch et al., 2020b, modifiziert) 132

Abb. 6.5 Phase IV des Handlungsleitfadens im Überblick (Bendzioch et al., 2020b, modifiziert) 135

Abb. 6.6 Phase V des Handlungsleitfadens im Überblick (Bendzioch et al., 2020b, modifiziert) 136
Abb. 6.7 Phase VI des Handlungsleitfadens im Überblick (Bendzioch et al., 2020b, modifiziert) 137

Tabellenverzeichnis

Tab. 2.1 Wesentliche Konfigurations- und Gestaltungsmöglichkeiten informatorischer Montageassistenzsysteme (Hold et al., 2017, modifiziert) 39

Tab. 3.1 Identifizierte Studien zu den Einsatzpotenzialen von informatorischen Assistenzsystemen in der manuellen Montage 42

Tab. 3.2 Einsatzpotenziale informatorischer Assistenzsysteme gegenüber den eingesetzten Referenzmedien auf Basis der Studienergebnisse 43

Tab. 3.3 Prozentuale Verbesserung bzw. Verschlechterung gegenüber dem jeweiligen Referenzmedium auf Basis der Studienmittelwerte 44

Tab. 3.4 Auszug aus einer Morphologie zu Montageassistenzsystemen (Hinrichsen et al., 2016b, modifiziert) 51

Tab. 4.1 Ausführungszeiten des Lego-Referenzmodells 62

Tab. 4.2 Verteilung der Versuchspersonen auf die vier Teilgruppen auf Basis des Mean-Splits 63

Tab. 4.3 Bezugsgrößen der Untersuchungsaufgabe 68

Tab. 4.4 Verkürzung der Ausführungszeit im Vergleich zum Kontrollmedium 73

Tab. 4.5 Mittelwertdifferenzen der Arbeitsausführungszeit von Baugruppe B im Vergleich zum Kontrollmedium je Wiederholung [Sekunden] 75

Tab. 4.6 Mittelwertdifferenzen der Arbeitsausführungszeit von Baugruppe C im Vergleich zum Kontrollmedium je Wiederholung [Sekunden] 75

Tab. 4.7 Mittelwertdifferenzen der ersten Arbeitsausführungszeit über alle Baugruppen [Sekunden] 76

Tab. 4.8 Mittelwertdifferenzen der mentalen Beanspruchung im Vergleich zum Kontrollmedium je Baugruppe und gesamt 79

Tab. 4.9 Zusammenfassung der empirischen Untersuchungsergebnisse 80

Tab. 4.10 Empfehlungen für den Einsatz von informatorischen Assistenzsystemen auf Basis der Studienergebnisse 84

Tab. 5.1 Kategorien von Komplexitätstreibern in der manuellen Montage (Bendzioch et al., 2020e, modifiziert) 88

Tab. 5.2 Identifizierte Komplexitätstreiber in der manuellen Montage 89

Tab. 5.3 Kognitive Pre-Test induzierte Itemveränderungen – Montageobjekt 93

Tab. 5.4 Kognitive Pre-Test induzierte Itemveränderungen – Montageprozess 94

Tab. 5.5 Kognitive Pre-Test induzierte Itemveränderungen – Arbeitsplan 95

Tab. 5.6 Berücksichtigte Gütekriterien im Rahmen der explorativen Faktorenanalyse (in Anlehnung an Litfin et al. (2000) und Cratzius (2003)) 99

Tab. 5.7 Korrelationskoeffizient nach Spearman-Rho für alle 25 Items 101

Tab. 5.8 MSA-Werte der Anti-Image-Korrelationsmatrix 102

Tab. 5.9 Rotierte Faktorladungsmatrix (N = 69; 16 Variablen; Faktorladungen > 0,4) 104

Tab. 5.10 Rotierte Faktorladungsmatrix (N = 69; 15 Variablen) (Bendzioch et al., 2020e, modifiziert) 105

Tab. 5.11 Cronbachs Alpha der vier identifizierten latenten Faktoren 106

Tab. 5.12 Faktor 1 des Fragebogens CORAA – Dynamik und Flexibilität 108

Tab. 5.13 Faktor 2 des Fragebogens CORAA – Produkt- und Montagevielfalt 108

Tab. 5.14 Faktor 3 des Fragebogens CORAA – Kognitive Zusatzbelastung und Zeitaufwendungen 109

Tab. 5.15 Faktor 4 des Fragebogens CORAA – Informationsbedarf und -umfang 109

Tab. 5.16 Hinweise zur Interpretation der Fragebogenauswertung..... 111

Tab. 5.17 Retest-Reliabilität des Fragebogens CORAA (n = 23) 114

Tab. 5.18 Ergebnisse der externen Validitätsprüfung..... 115

Tab. 6.1 Lastenheft zur Ermittlung der Anforderungen an ein informatorisches Assistenzsystem in Anlehnung an die VDI/VDE/VDMA 2632-2 (2015)..... 126

Anhang

A – Studien zu den Einsatzpotenzialen von informatorischen Assistenzsystemen .. 174

B – NASA-TLX Fragebogen zur Messung der subjektiven Beanspruchung (Hart & Staveland, 1988) 178

C – Bewertungskriterien zur Erfassung der Montage- und Kommissionierfehler 180

D – Initiale Testversion des Fragebogenentwurfs 182

E – Revidierte Version des Fragebogenentwurfs 186

F – Retrospektive Befragung induzierte Itemveränderungen 190

G – Finalisierter Fragebogenentwurf für die explorative Faktorenanalyse 193

H – Übersetzung des CXI-Fragebogens nach Mattsson (2013a)..... 197

I – CORAA-Fragebogen 201

Anhang A – Studien zu den Einsatzpotenzialen von informatorischen Assistenzsystemen

	Berücksichtigt	Unabhängige Variablen: Faktor I Unterstützungsmedium	Unabhängige Variablen: Faktor II weitere Variablen	Abhängige Variablen	Montageaufgabe	Stichprobengröße
(Bläsing & Bornewasser, 2021)	Nein	• Papierbasierte Anweisung [1] • AR-Brille • Tablet	Aufgabenkomplexität	Beanspruchung u. a. Herzraten-variabilität und Pupillendilatation	Pneumatikbaugruppen (4 Varianten von 3 bis 19 Teilen)	65 [2]
Blattgerste et al. (2017)	Ja	• Papierbasierte Anweisung [1] • AR-Brille • Datenbrille • Smartphone	Keine	• Ausführungszeit • Montagefehler • Beanspruchung (NASA-TLX)	LEGO®-Duplo (32 Teile)	24 [2]
Blattgerste et al. (2018)	Nein	AR-Brille	Darstellungsvarianten im Assistenzsystem: • 3D Anweisung • 2D Anweisung • 3D Drahtmodell Anweisung • Side-by-Side Anweisung	• Ausführungszeit • Montagefehler • Beanspruchung (NASA-TLX) • Subjektive Bewertung	LEGO®-Duplo (32 Teile)	24 [2]

[1] – Referenzmedium
[2] – Studierende
[3] – Personen mit Unterstützungsbedarfen
[4] – Beschäftigte aus der Montage

	Berück-sichtigt	Unabhängige Variablen		Abhängige Variablen	Montage-aufgabe	Stich-proben-größe
		Faktor I Unterstützungsmedium	Faktor II weitere Variablen			
Funk et al. (2015a) & Funk (2016, S. 89-101)	Ja	• Verbale Anweisung durch einen Experten [1] • Projektion via Beamer mit Bildverarbeitungseinheit	Darstellungsvarianten im beamergestützten Assistenz-system: • Abbildung/ Piktogramme • Kurzvideo • Bauteilkonturen	• Ausführungszeit • Montagefehler • Beanspruchung (NASA-TLX)	Montage von drei Schraub-zwingen (5 Teile)	64 [3]
Funk et al. (2015b) & Funk (2016, S. 104-110)	Nein	• Projektion via Beamer mit Bildverarbeitungseinheit • Bildschirm	Aufgabenkomplexität	• Ausführungszeit • Montagefehler • Beanspruchung (NASA-TLX)	LEGO®-Duplo (5 Varianten von 3 bis 48 Teilen)	15 [3]
Funk (2016, S. 124-129) & Funk et al. (2018)	Nein	• Projektion via Beamer mit Bildverarbeitungseinheit • Bildschirm	Aufgabenkomplexität	• Ausführungszeit • Montagefehler • Beanspruchung (NASA-TLX)	LEGO®-Duplo (4 Varianten von 8 bis 32 Teilen)	32 [3]

[1] – Referenzmedium
[2] – Studierende
[3] – Personen mit Unterstützungsbedarfen
[4] – Beschäftigte aus der Montage

	Berück-sichtigt	Unabhängige Variablen		Abhängige Variablen	Montage-aufgabe	Stich-proben-größe
		Faktor I Unterstützungsmedium	Faktor II weitere Variablen			
Funk (2016, S. 173-181) & Funk et al. (2016)	Ja	• Papierbasierte Anweisung [1] • Projektion via Beamer mit Bildverarbeitungseinheit • Datenbrille • Tablet	Keine	• Ausführungszeit • Montagefehler • Beanspruchung (NASA-TLX)	LEGO®-Duplo (32 Teile)	16 [2]
Funk (2016, S. 133-136)	Nein	• Beamer in Kombination mit einer Bildverarbeitungseinheit • Bildschirm	Darstellungsvarianten im beamergestützten Assistenzsystem: • Manuell erstellte Anweisung • Automatisch erstellte Anweisung	• Ausführungszeit • Montagefehler • Beanspruchung (NASA-TLX)	Motoranlasser (5 Teile)	51 [4]
Hou et al. (2013)	Ja	• Papierbasierte Anweisung [1] • AR-Brille	Keine	• Ausführungszeit • Montagefehler • Beanspruchung (NASA-TLX)	LEGO®-Modell (35 Teile)	20 [2]

[1] – Referenzmedium
[2] – Studierende
[3] – Personen mit Unterstützungsbedarfen
[4] – Beschäftigte aus der Montage

	Berück-sichtigt	Unabhängige Variablen		Abhängige Variablen	Montage-aufgabe	Stich-proben-größe
		Faktor I Unterstützungsmedium	Faktor II weitere Variablen			
Keller et al. (2021)	Ja	• Keine Assistenz (ohne nähere Spezifizierung) [1] • Tablet in Verbindung mit Signalleuchten (Pick-by-Light)	• Aufgabenkomplexität • Erfahrungsgrad der Beschäftigten	• Arbeitsproduktivität • Nutzungserlebnis (meCUE)	Getriebe Pneumatikzylinder (Teileanzahl nicht bekannt)	30 [2]
Korn et al. (2013)	Nein	• Projektion via Beamer mit Bildverarbeitungseinheit • Bildschirm • Bildschirm in Kombination mit einer Bildverarbeitungseinheit und einem Gamification-Ansatz	Keine	• Montagefehler • Ausführungszeit	Montage von 8 LEGO®-Modell (8 Teile)	60 [3]

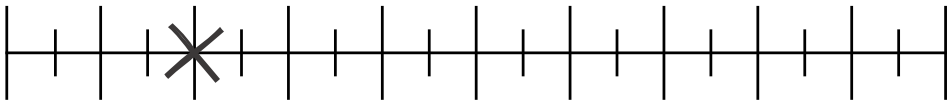
[1] – Referenzmedium
[2] – Studierende
[3] – Personen mit Unterstützungsbedarfen
[4] – Beschäftigte aus der Montage

Anhang B – NASA-TLX Fragebogen zur Messung der subjektiven Beanspruchung (Hart & Staveland, 1988)

NASA-Task Load Index (TLX) Fragebogen

Bitte kreuzen Sie auf den nachstehenden Skalen an, inwieweit Sie sich Sie sich durch die durchgeführte Montageaufgabe, in jeder der sechs aufgeführten Dimensionen, beansprucht bzw. gefordert gefühlt haben:

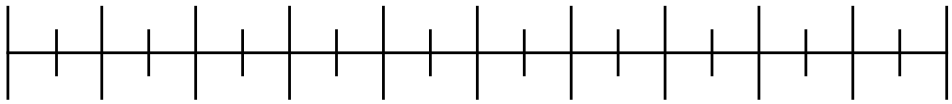
Beispiel



Gering Hoch

I. Geistige Anforderung

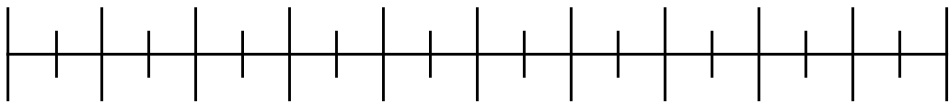
Wie viel geistige Anforderung war bei der Informationsaufnahme und bei der Informationsverarbeitung erforderlich (z.B. Denken, Entscheiden, Rechnen, Erinnern, Hinsehen, Suchen ...)? War die Aufgabe leicht oder anspruchsvoll, einfach oder komplex, erfordert sie hohe Genauigkeit oder ist sie fehlertolerant?



Gering Hoch

II. Körperliche Anforderung

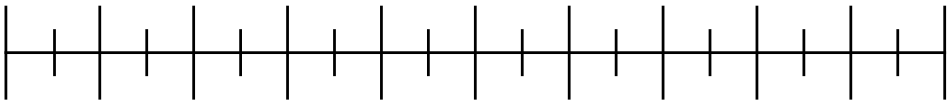
Wie viel körperliche Aktivität war erforderlich (z.B. ziehen, drücken, drehen, steuern, aktivieren ...)? War die Aufgabe leicht oder schwer, einfach oder anstrengend, erholsam oder mühselig?



Gering Hoch

III. Zeitliche Anforderung

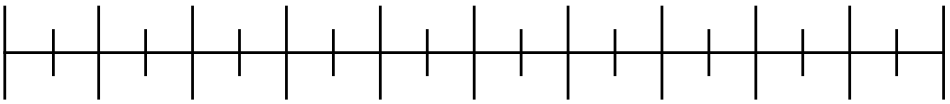
Wie viel Zeitdruck empfanden Sie hinsichtlich der Häufigkeit oder dem Takt mit dem die Aufgaben oder Aufgabenelemente auftraten? War die Aufgabe langsam und geruhsam oder schnell und hektisch?



Gering Hoch

IV. Leistung

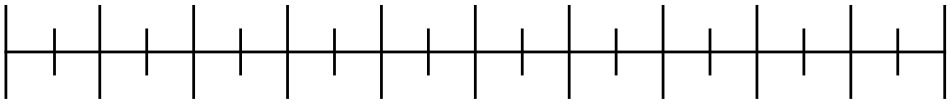
Wie erfolgreich haben Sie Ihrer Meinung nach die vom Versuchsleiter (oder Ihnen selbst) gesetzten Ziele erreicht? Wie zufrieden waren Sie mit Ihrer Leistung bei der Verfolgung dieser Ziele?



Hoch Gering

V. Anstrengung

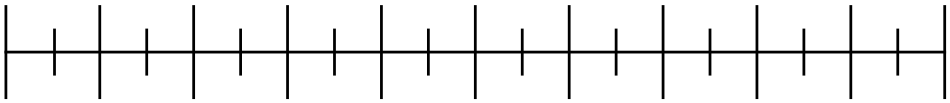
Wie hart mussten Sie arbeiten, um Ihren Grad an Aufgabenerfüllung zu erreichen?



Gering Hoch

VI. Frustration

Wie unsicher, entmutigt, irritiert, gestresst und verärgert (versus sicher, bestätigt, zufrieden, entspannt und zufrieden mit sich selbst) fühlten Sie sich während der Aufgabe?



Gering Hoch

Anhang C – Bewertungskriterien zur Erfassung der Montage- und Kommissionierfehler

	Fehlermerkmal	Beschreibung	Bewertungshinweis
Montagefehler	An falscher Position montiert	Die Versuchsperson montiert ein Bauteil an einer anderen Position als in der Anleitung gefordert.	Es wird die Anzahl der fehlerhaft montierten Bauteile gezählt. Wenn z. B. zwei Bauteile an der falschen Position montiert werden, sind das zwei Fehler – auch wenn der Fehler anschließend korrigiert wird.
	Falsche Orientierung des Bauteils	Die Versuchsperson montiert eine Komponente nicht entsprechend der abgebildeten Ausrichtung.	Es zählt die Anzahl der fehlerhaft montierten Bauteile. Wenn z. B. zwei Bauteile verkehrt herum montiert werden, sind das zwei Fehler – die Bewertung erfolgt nach Abschluss des Montageschritts.
	Werkzeug nicht benutzt	Die Versuchsperson verwendet das vorgegebene Werkzeug nicht zur Montage des Bauteils.	Die Nichtverwendung eines Werkzeugs zählt als ein Fehler, wenn beispielsweise zwei Werkzeuge nicht verwendet werden, werden zwei Fehler gezählt.
	Bauteil nicht verbaut	Die Versuchsperson montiert nicht alle vorgegebenen Bauteile.	Es zählt die Anzahl an nicht montierten Bauteilen. Wenn z. B. zwei Bauteile nicht montiert werden, sind zwei Fehler zu notieren.
	sonstiger Fehler bei der Montage	Unter sonstige Montagefehler fallen alle Fehler, die den anderen vier Fehlermerkmalen nicht zugeordnet werden können.	Die Bewertung erfolgt anhand der Fehleranzahl, hierbei sollten auch die anderen Bewertungskriterien berücksichtigt werden. Nach Möglichkeit sollte der Fehler auf dem Zettel näher spezifiziert werden.

	Fehlermerkmal	Beschreibung	Bewertungshinweis
Kommissionierfehler	Falsches Werkzeug gegriffen	Die Versuchsperson greift nach einem Werkzeug, welches für den aktuellen Montageschritt nicht benötigt wird und entnimmt es der Werkzeughalterung.	Es wird die Anzahl an Fehlgriffen gezählt. Wenn z. B. zwei Werkzeuge falsch gegriffen und entnommen werden, sind zwei Fehler entstanden.
	Falsches Teil gegriffen	Die Versuchsperson greift nach einem Bauteil, das für den aktuellen Montageschritt nicht benötigt wird, und entnimmt es dem Kleinladungsträger.	Es wird die Anzahl an Fehlgriffen gezählt. Wird z. B. zweimal in den falschen Kleinladungsträger gegriffen, sind zwei Fehler zu notieren.
	Zu viele Teile gegriffen	Die Versuchsperson entnimmt aus dem Kleinladungsträger mehr Bauteile, als nach der Anleitung benötigt werden.	Es zählt die Anzahl an zu viel entnommenen Teilen. Wenn z. B. drei Ventile erforderlich sind, aber fünf entnommen werden, sind zwei Fehler zu vermerken.
	Zu wenig Teile gegriffen	Die Versuchsperson entnimmt aus dem Kleinladungsträger weniger Bauteile, als nach der Anleitung benötigt werden.	Es zählt die Anzahl an zu wenig entnommenen Teilen. Wenn z. B. fünf Ventile erforderlich sind, aber nur drei entnommen werden, sind zwei Fehler zu vermerken. >>Hierbei ist der individuelle „Montagestil“ der Versuchsperson zu berücksichtigen, wenn z. B. ein Teil entnommen und direkt verbaut wird und anschließend das nächste Teil entnommen wird, usw., zählt dies nicht als Fehler!<<

Anhang D – Initiale Testversion des Fragebogenentwurfs

evasys	Initialer Fragebogen Vers. I	evasys
Technische Hochschule Ostwestfalen-Lippe		MONTEXAS 4.0

Bitte so markieren: ☐ ☒ ☐ ☐ ☐ Bitte verwenden Sie einen Kugelschreiber oder nicht zu starken Filzstift. Dieser Fragebogen wird maschinell erfasst.

Korrektur: ☐ ■ ☐ ☒ ☐ Bitte beachten Sie im Interesse einer optimalen Datenerfassung die links gegebenen Hinweise beim Ausfüllen.

1. Allgemeine Informationen

Für die Ermittlung des Unterstützungsbedarfs durch informatorische Assistenzsysteme ist es wichtig, neben objektiven Kriterien, Ihre persönlichen Erfahrungen und Einschätzungen zu berücksichtigen. Die Erhebung dieser Daten erfolgt mit dem vorliegenden Fragebogen.

Bitte füllen Sie den Fragebogen vollständig aus. Nur so können wir aus Ihren Angaben das Einsatzpotenzial für ein informatorisches Assistenzsystem bestimmen. Die Befragung wird anonymisiert ausgewertet, das heißt, es sind keine Rückschlüsse auf einzelne Personen möglich. Die Ergebnisse werden im Rahmen des öffentlich geförderten Projektes „Montexas4.0" verwendet und publiziert. Mit der Abgabe des Fragebogens stimmen Sie den genannten Verwendungszwecken zu.

Für Fragen oder Anregungen können Sie uns gerne kontaktieren.

Vielen Dank für Ihre Mitarbeit!

2. Personenbezogene Daten

2.1 Wie alt sind Sie?

2.2 Geschlecht: ☐ Weiblich ☐ Männlich ☐ Divers

2.3 Wie lange arbeiten Sie schon in diesem Betrieb?

☐ bis 6 Monate ☐ 6 bis 12 Monate ☐ 1 bis 5 Jahre
☐ 5 bis 10 Jahre ☐ mehr als 10 Jahre

2.4 Sind Sie über eine Zeitarbeitsfirma beschäftigt? ☐ Ja ☐ Nein

2.5 Bitte nennen Sie uns das Arbeitssystem, auf das sich der Fragebogen ausschließlich bezieht.

2.6 Wie lange arbeiten Sie schon im genannten Arbeitssystem?

☐ bis 6 Monate ☐ 6 bis 12 Monate ☐ 1 bis 5 Jahre
☐ 5 bis 10 Jahre ☐ mehr als 10 Jahre

2.7 In dem genannten Arbeitssystem arbeiten Sie...

☐ selten (bis 25%) ☐ teilweise (25 bis 50%) ☐ überwiegend (50 bis 75%)
☐ ausschließlich (mehr als 75%)

evasys	Initialer Fragebogen Vers. I	evasys

3. Montageobjekt

		Stimme gar nicht zu	Stimme eher nicht zu	Stimme teilweise zu	Stimme eher zu	Stimme voll zu	Weiß ich nicht
3.1	Angesichts der Vielfalt an Bauteilen besteht die Gefahr, dass Bauteile falsch oder nicht verbaut werden.	☐	☐	☐	☐	☐	☐
3.2	Die Vielfalt an Produkten oder Teilen erhöht die Verwechslungsgefahr.	☐	☐	☐	☐	☐	☐
3.3	Es liegen so unterschiedliche Teile bereit, dass es schwer fällt zu erkennen, welches Teil zu welchem Produkt gehört.	☐	☐	☐	☐	☐	☐
3.4	Es gibt einige Bauteile, die sich in Aussehen oder Funktion ähneln und zur Verwechslungsgefahr führen.	☐	☐	☐	☐	☐	☐
3.5	Es werden mehrere Varianten eines Produkts montiert.	☐	☐	☐	☐	☐	☐

4. Montageprozess

		Stimme gar nicht zu	Stimme eher nicht zu	Stimme teilweise zu	Stimme eher zu	Stimme voll zu	Weiß ich nicht
4.1	Arbeitsergebnisse sind nach umfangreichen Vorgaben zu kontrollieren (z. B. Sichtprüfung, Messung).	☐	☐	☐	☐	☐	☐
4.2	Unterbrechungen durch andere Aktivitäten beeinträchtigen die Konzentration auf die wesentlichen Informationen während der Montage (z. B. Dokumentation, Buchungen, Übertragung von Daten oder Messwerten).	☐	☐	☐	☐	☐	☐
4.3	Montageschritte müssen immer wieder mit der Konstruktionszeichnung/ Stückliste abgeglichen werden.	☐	☐	☐	☐	☐	☐

evasys	Initialer Fragebogen Vers. I	evasys

4. Montageprozess [Fortsetzung]

		Stimme gar nicht zu	Stimme eher nicht zu	Stimme teilweise zu	Stimme eher zu	Stimme voll zu	Weiß ich nicht
4.4	Es braucht Zeit, bis ein Montageprozess sicher beherrscht wird.	☐	☐	☐	☐	☐	☐
4.5	Die Montage erfordert immer wieder Neu- oder Umlernen.	☐	☐	☐	☐	☐	☐
4.6	Die Reihenfolge der Montageschritte muss eingehalten werden.	☐	☐	☐	☐	☐	☐
4.7	Es ist oft unklar, welches Bauteil als nächstes zu montieren ist.	☐	☐	☐	☐	☐	☐
4.8	Arbeitsinhalte sind von Änderungen geprägt (z. B. Änderung der Auftragsreihenfolge, Montage neuer Produktvarianten, Bereitstellen neuer Montageanweisungen).	☐	☐	☐	☐	☐	☐
4.9	Die Montage beinhaltet umfangreiche Arbeitsinhalte.	☐	☐	☐	☐	☐	☐

5. Arbeitsmittel

		Stimme gar nicht zu	Stimme eher nicht zu	Stimme teilweise zu	Stimme eher zu	Stimme voll zu	Weiß ich nicht
5.1	Für die Montage werden verschiedene Werkzeuge verwendet.	☐	☐	☐	☐	☐	☐
5.2	Die bereitgestellten Werkzeuge und/ oder Bauteile können verwechselt werden.	☐	☐	☐	☐	☐	☐
5.3	Die bereitgestellten Teilebehälter sind eindeutig beschriftet.	☐	☐	☐	☐	☐	☐

evasys	Initialer Fragebogen Vers. I	evasys

6. Arbeitsplan

		Stimme gar nicht zu	Stimme eher nicht zu	Stimme teilweise zu	Stimme eher zu	Stimme voll zu	Weiß ich nicht
6.1	Montageanweisungen sind lückenhaft aufbereitet, so dass Zusatzinformationen besorgt werden müssen.	☐	☐	☐	☐	☐	☐
6.2	Montageanweisungen weisen unnötige Information auf.	☐	☐	☐	☐	☐	☐
6.3	Zur Aufgabenerfüllung werden vielfältige Informationen benötigt.	☐	☐	☐	☐	☐	☐
6.4	Wichtige Informationen fallen nicht direkt ins Auge.	☐	☐	☐	☐	☐	☐
6.5	Montagerelevante Informationen müssen im Kopf behalten werden.	☐	☐	☐	☐	☐	☐
6.6	Die Suche nach erforderlichen Informationen führt zu Verzögerungen in der Montage.	☐	☐	☐	☐	☐	☐
6.7	Montageinformationen werden nicht zur richtigen Zeit bereitgestellt.	☐	☐	☐	☐	☐	☐
6.8	Fehlende oder nicht eindeutige Montageinformationen erfordern zeitaufwändige Abstimmungen mit den Kollegen.	☐	☐	☐	☐	☐	☐
6.9	Es fließen Informationen aus unterschiedlichen Quellen gleichzeitig auf einen ein.	☐	☐	☐	☐	☐	☐

Anhang E – Revidierte Version des Fragebogenentwurfs

evasys	Fragebogenentwurf Vers. II	evasys
Technische Hochschule Ostwestfalen-Lippe		MONTEXAS 4.0

Bitte so markieren: ☐ ☒ ☐ ☐ ☐ Bitte verwenden Sie einen Kugelschreiber oder nicht zu starken Filzstift. Dieser Fragebogen wird maschinell erfasst.

Korrektur: ☐ ■ ☐ ☒ ☐ Bitte beachten Sie im Interesse einer optimalen Datenerfassung die links gegebenen Hinweise beim Ausfüllen.

1. Allgemeine Informationen

Für die Ermittlung des Unterstützungsbedarfs durch informatorische Assistenzsysteme ist es wichtig, neben objektiven Kriterien, Ihre persönlichen Erfahrungen und Einschätzungen zu berücksichtigen. Die Erhebung dieser Daten erfolgt mit dem vorliegenden Fragebogen.

Bitte füllen Sie den Fragebogen vollständig aus. Nur so können wir aus Ihren Angaben das Einsatzpotenzial für ein informatorisches Assistenzsystem bestimmen. Die Befragung wird anonymisiert ausgewertet, das heißt, es sind keine Rückschlüsse auf einzelne Personen möglich. Die Ergebnisse werden im Rahmen des öffentlich geförderten Projektes „Montexas4.0" verwendet und publiziert. Mit der Abgabe des Fragebogens stimmen Sie den genannten Verwendungszwecken zu.

Für Fragen oder Anregungen können Sie uns gerne kontaktieren.

Vielen Dank für Ihre Mitarbeit!

2. Personenbezogene Daten

2.1 Wie alt sind Sie?

2.2 Geschlecht: ☐ Weiblich ☐ Männlich ☐ Divers

2.3 Wie lange arbeiten Sie schon in diesem Betrieb?

☐ bis 6 Monate ☐ 6 bis 12 Monate ☐ 1 bis 5 Jahre
☐ 5 bis 10 Jahre ☐ mehr als 10 Jahre

2.4 Sind Sie über eine Zeitarbeitsfirma beschäftigt? ☐ Ja ☐ Nein

2.5 Bitte nennen Sie uns das Arbeitssystem, auf das sich der Fragebogen ausschließlich bezieht.

2.6 Wie lange arbeiten Sie schon im genannten Arbeitssystem?

☐ bis 6 Monate ☐ 6 bis 12 Monate ☐ 1 bis 5 Jahre
☐ 5 bis 10 Jahre ☐ mehr als 10 Jahre

2.7 In dem genannten Arbeitssystem arbeiten Sie...

☐ selten (bis 25%) ☐ teilweise (25 bis 50%) ☐ überwiegend (50 bis 75%)
☐ ausschließlich (mehr als 75%)

evasys	Fragebogenentwurf Vers. II	evasys

3. **Montageobjekt**

Definition:

Eine **Baugruppe** ist ein aus Bauteilen gefertigtes Zwischen- oder Endprodukt, das in einem Montageprozess erstellt wird. **Bauteile** stellen somit die Einzelteile im Arbeitssystem dar, die zur Fertigstellung einer oder mehrerer Baugruppen benötigt werden.

		Stimme gar nicht zu	Stimme eher nicht zu	Stimme teilweise zu	Stimme eher zu	Stimme voll zu	Weiß ich nicht
	Inwieweit treffen die folgenden Aussagen auf **Bauteile** zu:						
3.1	In dem Arbeitssystem steht eine Vielfalt an Bauteilen bereit.	☐	☐	☐	☐	☐	☐
3.2	Bauteile ähneln sich in Funktion oder Aussehen.	☐	☐	☐	☐	☐	☐
3.3	Es werden mehrere Varianten eines Bauteils montiert.	☐	☐	☐	☐	☐	☐
3.4	Es kommt zu häufigen Änderungen oder Wechseln von Bauteilen.	☐	☐	☐	☐	☐	☐

		Stimme gar nicht zu	Stimme eher nicht zu	Stimme teilweise zu	Stimme eher zu	Stimme voll zu	Weiß ich nicht
	Inwieweit treffen die folgenden Aussagen auf **Baugruppen** zu:						
3.5	In dem Arbeitssystem wird eine Vielfalt an Baugruppen montiert.	☐	☐	☐	☐	☐	☐
3.6	Baugruppen ähneln sich in Funktion oder Aussehen.	☐	☐	☐	☐	☐	☐
3.7	Es werden mehrere Varianten einer Baugruppe montiert.	☐	☐	☐	☐	☐	☐
3.8	Es kommt zu häufigen Änderungen oder Wechseln von Baugruppen.	☐	☐	☐	☐	☐	☐

evasys	Fragebogenentwurf Vers. II	evasys

4. **Montageprozess**

		Stimme gar nicht zu	Stimme eher nicht zu	Stimme teilweise zu	Stimme eher zu	Stimme voll zu	Weiß ich nicht
4.1	Die Auftragsreihenfolge ist **nicht** immer vorgegeben.	☐	☐	☐	☐	☐	☐
4.2	Es ist oft unklar, welches Bauteil als nächstes zu montieren ist.	☐	☐	☐	☐	☐	☐
4.3	Montageschritte sind nach Vorgaben zu kontrollieren (z. B. Sichtprüfung, Messung).	☐	☐	☐	☐	☐	☐
4.4	Andere Tätigkeiten beeinträchtigen die Konzentration auf die Montage (z. B. Dokumentation, Buchungen, Übertragung von Daten oder Messwerten).	☐	☐	☐	☐	☐	☐
4.5	Es braucht Zeit, bis ein Montageprozess sicher beherrscht wird.	☐	☐	☐	☐	☐	☐
4.6	Die Arbeitsaufgabe erfordert immer wieder Neu- oder Umlernen.	☐	☐	☐	☐	☐	☐
4.7	Einige Bauteile haben keine eindeutige Einbaulage und können falsch montiert werden.	☐	☐	☐	☐	☐	☐
4.8	Die bereitgestellten Werkzeuge können verwechselt werden (z. B. verschiedene Größen, Formen).	☐	☐	☐	☐	☐	☐
4.9	Die Montage umfasst eine Vielzahl an unterschiedlichen Arbeitsschritten.	☐	☐	☐	☐	☐	☐
4.10	Fehlende oder falsche Bauteile erfordern zusätzlichen Aufwand oder Abstimmungsbedarf.	☐	☐	☐	☐	☐	☐

evasys	Fragebogenentwurf Vers. II	evasys

5. **Arbeitsplan**

		Stimme gar nicht zu	Stimme eher nicht zu	Stimme teilweise zu	Stimme eher zu	Stimme voll zu	Weiß ich nicht
5.1	Zur Aufgabenerfüllung werden unterschiedliche Informationsquellen benötigt.	☐	☐	☐	☐	☐	☐
5.2	Fehlende oder unklare Montageinformationen erfordern zusätzlichen Aufwand oder Abstimmungen.	☐	☐	☐	☐	☐	☐
5.3	Montageanweisungen weisen überflüssige Information auf.	☐	☐	☐	☐	☐	☐
5.4	Wichtige Informationen fallen **nicht** direkt ins Auge (z. B. Drehmoment, Schraubensicherung, wichtige Montagehinweise).	☐	☐	☐	☐	☐	☐
5.5	Es müssen oft Entscheidungen getroffen werden, ohne dass ausreichende Informationen zur Verfügung stehen.	☐	☐	☐	☐	☐	☐
5.6	Montageinformationen werden **nicht** zur richtigen Zeit bereitgestellt (z. B. Zeichnung, Auftragsinformationen, Stückliste).	☐	☐	☐	☐	☐	☐
5.7	Es kommt zu häufigen Änderungen der Montageanweisungen/ -informationen.	☐	☐	☐	☐	☐	☐

Anhang F – Retrospektive Befragung induzierte Itemveränderungen

Veränderungen im Teilaspekt Montageobjekt:

	Ursprüngliche Version der Items	Abgeänderte Version der Items
MO1	In dem Arbeitssystem wird eine Vielfalt an Baugruppen montiert.	In dem Arbeitssystem wird eine Vielfalt an Baugruppen montiert.
MO2	Es werden mehrere Varianten einer Baugruppe montiert.	Es werden mehrere Varianten einer Baugruppe montiert.
MO3	Baugruppen ähneln sich in Funktion oder Aussehen.	Baugruppen ähneln sich in Funktion *und/ oder* Aussehen.
MO4	Es kommt zu häufigen Änderungen oder Wechseln von Baugruppen.	Es kommt zu häufigen Änderungen oder Neuentwicklungen der Baugruppen.
MO5	In dem Arbeitssystem steht eine Vielfalt an Bauteilen bereit.	In dem Arbeitssystem steht eine Vielfalt an Bauteilen bereit.
MO6	Es werden mehrere Varianten eines Bauteils montiert.	Es werden mehrere Varianten eines Bauteils montiert.
MO7	Bauteile ähneln sich in Funktion oder Aussehen.	Bauteile ähneln sich in Funktion *und/* oder Aussehen.
MO8	Es kommt zu häufigen Änderungen oder Wechseln von Bauteilen.	Es kommt zu häufigen Änderungen oder Wechseln *der* Bauteile.
Änderungen sind durch unterstrichene und kursiv gesetzte Begriffe gekennzeichnet		

Veränderungen im Teilaspekt Montageprozess:

	Ursprüngliche Version der Items	Abgeänderte Version der Items
MP1	Montageschritte sind nach Vorgaben zu kontrollieren (z. B. Sichtprüfung, Messung usw.).	Montageschritte sind nach Vorgaben zu kontrollieren (z. B. Sichtprüfung, Messung).
MP2	Andere Tätigkeiten beeinträchtigen die Konzentration auf die Montage (z. B. Dokumentation, Buchungen, Übertragung von Daten oder Messwerten).	*Vor, während oder nach der Montage muss eine Vielzahl an* anderen Tätigkeiten *ausgeführt werden* (z. B. Dokumentation, Buchungen, Überprüfung von Daten oder Messwerten).
MP4	Es braucht Zeit, bis ein Montageprozess sicher beherrscht wird.	Es braucht Zeit, bis ein Montageprozess sicher beherrscht wird.
MP5	Die Arbeitsaufgabe erfordert immer wieder Neu- oder Umlernen.	Die Arbeitsaufgabe erfordert immer wieder Neu- oder Umlernen.

Fortsetzung – Veränderungen im Teilaspekt Montageprozess:

	Ursprüngliche Version der Items	Abgeänderte Version der Items
MP7	Es ist oft unklar, welches Bauteil als nächstes zu montieren ist.	*Im Produktionsalltag werden wechselnde Baugruppen montiert.*
MP9	Die Montage umfasst eine Vielzahl an unterschiedlichen Arbeitsschritten.	Die Montage umfasst eine Vielzahl an unterschiedlichen Arbeitsschritten.
MP10	Einige Bauteile haben keine eindeutige Einbaulage und können falsch montiert werden.	Bauteile haben keine eindeutige Einbaulage und können falsch montiert werden.
MP11	Fehlende oder falsche Bauteile erfordern zusätzlichen Aufwand oder Abstimmungsbedarf.	Fehlende oder falsche Bauteile erfordern zusätzlichen Aufwand oder Abstimmungsbedarf.
MP12	Die Auftragsreihenfolge ist nicht immer vorgegeben.	Die Auftragsreihenfolge ist nicht immer vorgegeben.
AM2	Die bereitgestellten Werkzeuge können verwechselt werden (z. B. verschiedene Größen, Formen).	*Zwischen den* bereitgestellten Werkzeugen *bestehen Ähnlichkeiten* (z. B. *ähnliche* Größen *oder* Formen).
Änderungen sind durch unterstrichene und kursiv gesetzte Begriffe gekennzeichnet		

Veränderungen im Teilaspekt Arbeitsplan:

	Ursprüngliche Version der Items	Abgeänderte Version der Items
AP1	Es müssen oft Entscheidungen getroffen werden, ohne das ausreichende Informationen zur Verfügung stehen.	Es müssen oft Entscheidungen getroffen werden, ohne dass ausreichende Informationen zur Verfügung stehen.
AP2	Montageanweisungen weisen überflüssige Information auf.	Montageanweisungen weisen überflüssige Information auf *(z. B. Abbildungen, Maße, Informationen, Zeichnungen)*.
AP3	Zur Aufgabenerfüllung werden unterschiedliche Informationsquellen benötigt.	Zur Aufgabenerfüllung werden unterschiedliche Informationsquellen benötigt.
AP4	Wichtige Informationen fallen nicht direkt ins Auge (z. B. Drehmoment, Schraubensicherung, Montagehinweise).	Wichtige Informationen fallen nicht direkt ins Auge (z. B. Drehmoment, Schraubensicherung, *wichtige* Montagehinweise).
AP7	Montageinformationen werden nicht zur richtigen Zeit bereitgestellt (z. B. Zeichnung, Auftragsinformationen, Stückliste).	Montageinformationen werden nicht zur richtigen Zeit bereitgestellt (z. B. Zeichnung, Auftragsinformationen, Stückliste).

Fortsetzung – Veränderungen im Teilaspekt Arbeitsplan:

	Ursprüngliche Version der Items	Abgeänderte Version der Items
AP8	Fehlende oder unklare Montageinformationen erfordern zusätzliche Abstimmungen.	Fehlende oder unklare Montageinformationen erfordern zusätzliche Aufwand oder Abstimmungen.
AP10	Es kommt zu häufigen Änderungen der Montageanweisungen/ -informationen.	Es kommt zu häufigen Änderungen der Montageanweisungen/ -informationen.
Änderungen sind durch unterstrichene und kursiv gesetzte Begriffe gekennzeichnet		

Anhang G – Finalisierter Fragebogenentwurf für die explorative Faktorenanalyse

evasys	Fragebogenentwurf Vers. III	evasys

Technische Hochschule Ostwestfalen-Lippe

MONTEXAS 4.0

Bitte so markieren: ☐ ☒ ☐ ☐ ☐ Bitte verwenden Sie einen Kugelschreiber oder nicht zu starken Filzstift. Dieser Fragebogen wird maschinell erfasst.

Korrektur: ☐ ■ ☐ ☒ ☐ Bitte beachten Sie im Interesse einer optimalen Datenerfassung die links gegebenen Hinweise beim Ausfüllen.

1. Allgemeine Informationen

Für die Ermittlung des Unterstützungsbedarfs durch informatorische Assistenzsysteme ist es wichtig, neben objektiven Kriterien, Ihre persönlichen Erfahrungen und Einschätzungen zu berücksichtigen. Die Erhebung dieser Daten erfolgt mit dem vorliegenden Fragebogen.

Bitte füllen Sie den Fragebogen vollständig aus. Nur so können wir aus Ihren Angaben das Einsatzpotenzial für ein informatorisches Assistenzsystem bestimmen. Die Befragung wird anonymisiert ausgewertet, das heißt, es sind keine Rückschlüsse auf einzelne Personen möglich. Die Ergebnisse werden im Rahmen des öffentlich geförderten Projektes „Montexas4.0" verwendet und publiziert. Mit der Abgabe des Fragebogens stimmen Sie den genannten Verwendungszwecken zu.

Für Fragen oder Anregungen können Sie uns gerne kontaktieren.

Vielen Dank für Ihre Mitarbeit!

2. Personenbezogene Daten

2.1 Wie alt sind Sie?

2.2 Geschlecht: ☐ Weiblich ☐ Männlich ☐ Divers

2.3 Wie lange arbeiten Sie schon in diesem Betrieb?

☐ bis 6 Monate ☐ 6 bis 12 Monate ☐ 1 bis 5 Jahre
☐ 5 bis 10 Jahre ☐ mehr als 10 Jahre

2.4 Sind Sie über eine Zeitarbeitsfirma beschäftigt? ☐ Ja ☐ Nein

2.5 Bitte nennen Sie uns das Arbeitssystem, auf das sich der Fragebogen ausschließlich bezieht.

2.6 Wie lange arbeiten Sie schon im genannten Arbeitssystem?

☐ bis 6 Monate ☐ 6 bis 12 Monate ☐ 1 bis 5 Jahre
☐ 5 bis 10 Jahre ☐ mehr als 10 Jahre

2.7 In dem genannten Arbeitssystem arbeiten Sie...

☐ selten (bis 25%) ☐ teilweise (25 bis 50%) ☐ überwiegend (50 bis 75%)
☐ ausschließlich (mehr als 75%)

evasys	Fragebogenentwurf Vers. III	evasys

3. **Montageobjekt**

Definition:

Eine **Baugruppe** ist ein aus Bauteilen gefertigtes Zwischen- oder Endprodukt, das in einem Montageprozess erstellt wird. **Bauteile** stellen somit die Einzelteile im Arbeitssystem dar, die zur Fertigstellung einer oder mehrerer Baugruppen benötigt werden.

	Inwieweit treffen die folgenden Aussagen auf **Bauteile** zu:	Stimme gar nicht zu	Stimme eher nicht zu	Stimme teilweise zu	Stimme eher zu	Stimme voll zu	Weiß ich nicht
3.1	In dem Arbeitssystem steht eine Vielfalt an Bauteilen bereit.	☐	☐	☐	☐	☐	☐
3.2	Bauteile ähneln sich in Funktion und/ oder Aussehen.	☐	☐	☐	☐	☐	☐
3.3	Es werden mehrere Varianten eines Bauteils montiert.	☐	☐	☐	☐	☐	☐
3.4	Es kommt zu häufigen Änderungen oder Wechseln der Bauteile.	☐	☐	☐	☐	☐	☐

	Inwieweit treffen die folgenden Aussagen auf **Baugruppen** zu:	Stimme gar nicht zu	Stimme eher nicht zu	Stimme teilweise zu	Stimme eher zu	Stimme voll zu	Weiß ich nicht
3.5	In dem Arbeitssystem wird eine Vielfalt an Baugruppen montiert.	☐	☐	☐	☐	☐	☐
3.6	Baugruppen ähneln sich in Funktion und/ oder Aussehen.	☐	☐	☐	☐	☐	☐
3.7	Es werden mehrere Varianten einer Baugruppe montiert.	☐	☐	☐	☐	☐	☐
3.8	Es kommt zu häufigen Änderungen oder Neuentwicklungen der Baugruppen.	☐	☐	☐	☐	☐	☐

evasys	Fragebogenentwurf Vers. III	evasys

4. **Montageprozess**

		Stimme gar nicht zu	Stimme eher nicht zu	Stimme teilweise zu	Stimme eher zu	Stimme voll zu	Weiß ich nicht
4.1	Die Auftragsreihenfolge ist **nicht** immer vorgegeben.	☐	☐	☐	☐	☐	☐
4.2	Im Produktionsalltag werden wechselnde Baugruppen montiert.	☐	☐	☐	☐	☐	☐
4.3	Montageschritte sind nach Vorgaben zu kontrollieren (z. B. Sichtprüfung, Messung).	☐	☐	☐	☐	☐	☐
4.4	Vor, während oder nach der Montage muss eine Vielzahl an anderen Tätigkeiten ausgeführt werden (z. B. Dokumentation, Buchungen, Überprüfung von Daten oder Messwerten).	☐	☐	☐	☐	☐	☐
4.5	Es braucht Zeit, bis ein Montageprozess sicher beherrscht wird.	☐	☐	☐	☐	☐	☐
4.6	Die Arbeitsaufgabe erfordert immer wieder Neu- oder Umlernen.	☐	☐	☐	☐	☐	☐
4.7	Bauteile haben keine eindeutige Einbaulage und können falsch montiert werden.	☐	☐	☐	☐	☐	☐
4.8	Zwischen den bereitgestellten Werkzeugen bestehen Ähnlichkeiten (z. B. ähnliche Größen oder Formen).	☐	☐	☐	☐	☐	☐
4.9	Die Montage umfasst eine Vielzahl an unterschiedlichen Arbeitsschritten.	☐	☐	☐	☐	☐	☐
4.10	Fehlende oder falsche Bauteile erfordern zusätzlichen Aufwand oder Abstimmungsbedarf.	☐	☐	☐	☐	☐	☐

evasys	Fragebogenentwurf Vers. III	evasys

5. **Arbeitsplan**

		Stimme gar nicht zu	Stimme eher nicht zu	Stimme teilweise zu	Stimme eher zu	Stimme voll zu	Weiß ich nicht
5.1	Zur Aufgabenerfüllung werden unterschiedliche Informationsquellen benötigt.	☐	☐	☐	☐	☐	☐
5.2	Fehlende oder unklare Montageinformationen erfordern zusätzlichen Aufwand oder Abstimmungen.	☐	☐	☐	☐	☐	☐
5.3	Montageanweisungen weisen überflüssige Informationen auf (z. B. Abbildungen, Maße, Informationen, Zeichnungen).	☐	☐	☐	☐	☐	☐
5.4	Wichtige Informationen fallen **nicht** direkt ins Auge (z. B. Drehmoment, Schraubensicherung, wichtige Montagehinweise).	☐	☐	☐	☐	☐	☐
5.5	Es müssen oft Entscheidungen getroffen werden, ohne dass ausreichende Informationen zur Verfügung stehen.	☐	☐	☐	☐	☐	☐
5.6	Montageinformationen werden **nicht** zur richtigen Zeit bereitgestellt (z. B. Zeichnung, Auftragsinformationen, Stückliste).	☐	☐	☐	☐	☐	☐
5.7	Es kommt zu häufigen Änderungen der Montageanweisungen/ -informationen.	☐	☐	☐	☐	☐	☐

Anhang H – Übersetzung des CXI-Fragebogens nach Mattsson (2013a)

evasys	CXI – CompleXity Index	evasys
Technische Hochschule Ostwestfalen-Lippe		MONTEXAS 4.0

Bitte so markieren: ☐ ☒ ☐ ☐ ☐ Bitte verwenden Sie einen Kugelschreiber oder nicht zu starken Filzstift. Dieser Fragebogen wird maschinell erfasst.
Korrektur: ☐ ■ ☐ ☒ ☐ Bitte beachten Sie im Interesse einer optimalen Datenerfassung die links gegebenen Hinweise beim Ausfüllen.

1. Produktvarianten

		Stimme gar nicht zu	Stimme eher nicht zu	Stimme teilweise zu	Stimme eher zu	Stimme voll zu	Weiß ich nicht
1.1	Es gibt viele verschiedene Varianten in diesem Arbeitssystem.	☐	☐	☐	☐	☐	☐
1.2	Viele Varianten ähneln sich in Bezug auf Funktion und/oder Aussehen in diesem Arbeitssystem.	☐	☐	☐	☐	☐	☐
1.3	Es gibt viele Varianten, die selten in diesem Arbeitssystem montiert werden.	☐	☐	☐	☐	☐	☐
1.4	Die Varianten in diesem Arbeitssystem erfordern unterschiedliche Strategien bei der Montage (z. B. Reihenfolge, Schwierigkeit, unterschiedliche Anzahl an Arbeitsschritten).	☐	☐	☐	☐	☐	☐
1.5	Die Bauteile, die zu den verschiedenen Varianten gehören, sind in diesem Arbeitssystem sehr ähnlich.	☐	☐	☐	☐	☐	☐

2. Arbeitsinhalte

		Stimme gar nicht zu	Stimme eher nicht zu	Stimme teilweise zu	Stimme eher zu	Stimme voll zu	Weiß ich nicht
2.1	Wenn ich in diesem Arbeitssystem arbeite, weiß ich, was zu tun ist.	☐	☐	☐	☐	☐	☐
2.2	Ich habe oft das Gefühl, dass ich Zeit habe, die Arbeit in diesem Arbeitssystem auszuführen.	☐	☐	☐	☐	☐	☐
2.3	In diesem Arbeitssystem habe ich abgesehen von der Montagearbeit viele andere Arbeitsaufgaben (z. B. Materialtransport, 5S, Dokumentation etc.).	☐	☐	☐	☐	☐	☐

evasys	CXI – CompleXity Index	evasys

2. Arbeitsinhalte [Fortsetzung]

		Stimme gar nicht zu	Stimme eher nicht zu	Stimme teilweise zu	Stimme eher zu	Stimme voll zu	Weiß ich nicht
2.4	Meine Arbeit an diesem Arbeitssystem ist oft von ungeplanten Änderungen/ Unsicherheiten betroffen (z. B. Planänderungen, neue Anweisungen/ Varianten oder Maschinenstörungen).	☐	☐	☐	☐	☐	☐
2.5	Ich bin bei der Planung von Änderungen an diesem Arbeitssystem beteiligt.	☐	☐	☐	☐	☐	☐

3. Layout

		Stimme gar nicht zu	Stimme eher nicht zu	Stimme teilweise zu	Stimme eher zu	Stimme voll zu	Weiß ich nicht
3.1	Das Arbeitssystem ist hinsichtlich der Zugänglichkeit gut gestaltet.	☐	☐	☐	☐	☐	☐
3.2	Dieses Arbeitssystem ist für schwere Hebetätigkeiten in der Montage gut ausgelegt.	☐	☐	☐	☐	☐	☐
3.3	Dieses Arbeitssystem ist hinsichtlich der Ergonomie bei der Montagearbeit gut durchdacht (z.B. strecken, bücken).	☐	☐	☐	☐	☐	☐
3.4	Das Arbeitssystem ist hinsichtlich der äußeren Erscheinung gut organisiert/ designt (z.B. Verpackung, Anordnung, leicht zu greifendes und anzuordnendes Material).	☐	☐	☐	☐	☐	☐
3.5	Die Platzierung von Werkzeugen, Vorrichtungen und Komponenten in diesem Arbeitssystem ist im Allgemeinen gut.	☐	☐	☐	☐	☐	☐

evasys	CXI – CompleXity Index	evasys

4. Werkzeuge und Hilfsmittel

4.1 Welche unterstützenden Hilfsmittel gibt es in diesem Arbeitssystem? (Wenn keine unterstützenden Hilfsmittel vorhanden sind, fahren Sie bitte mit 6.3 fort.)

☐ Pick-by-Light System (Lichter leuchten für ein bestimmtes Teil)
☐ Barcodes und Scanner
☐ RFID System
☐ Rückmeldung über einen Bildschirm
☐ Rückmeldung über das Werkzeuge (z.B. die richtige Kraft und der richtige Bit)
☐ Kontrollpunkte (Rückmeldung bei der Montage)
☐ Sonstige

		Stimme gar nicht zu	Stimme eher nicht zu	Stimme teilweise zu	Stimme eher zu	Stimme voll zu	Weiß ich nicht
4.2	Die oben genannten Hilfsmittel helfen mir bei der Durchführung meiner Arbeiten in diesem Arbeitssystem.	☐	☐	☐	☐	☐	☐
4.3	Die Werkzeuge/ Vorrichtungen, die in diesem Arbeitssystem verwendet werden, sind gut auf die dort anfallenden Aufgaben abgestimmt.	☐	☐	☐	☐	☐	☐
4.4	Für die Montage der verschiedenen Varianten werden in diesem Arbeitssystem unterschiedliche Werkzeuge verwendet.	☐	☐	☐	☐	☐	☐

5. Arbeitsanweisungen

		Stimme gar nicht zu	Stimme eher nicht zu	Stimme teilweise zu	Stimme eher zu	Stimme voll zu	Weiß ich nicht
5.1	Die Arbeitsanweisungen sind leicht zu verstehen.	☐	☐	☐	☐	☐	☐
5.2	Es dauert eine lange Zeit, die Arbeit in diesem Arbeitssystem zu lernen (im Vergleich zu anderen Arbeitssystemen in meinem Arbeitsbereich).	☐	☐	☐	☐	☐	☐

evasys	CXI – CompleXity Index	evasys

6. Gesamtansicht

		Stimme gar nicht zu	Stimme eher nicht zu	Stimme teilweise zu	Stimme eher zu	Stimme voll zu	Weiß ich nicht
6.1	Im Allgemeinen denke ich, dass die Gestaltung des Arbeitssystems gut ist.	☐	☐	☐	☐	☐	☐

6.2 Anmerkungen: (z. B. Verbesserungsmöglichkeiten, Änderung an der Station, Arbeitsinhalt, Unterstützungsmaßnahmen usw.)

Anhang I – CORAA-Fragebogen

evasys	Complexity Rating for Assembly Assistance	evasys
Technische Hochschule Ostwestfalen-Lippe		MONTEXAS 4.0

Bitte so markieren: ☐ ☒ ☐ ☐ ☐ Bitte verwenden Sie einen Kugelschreiber oder nicht zu starken Filzstift. Dieser Fragebogen wird maschinell erfasst.

Korrektur: ☐ ■ ☐ ☒ ☐ Bitte beachten Sie im Interesse einer optimalen Datenerfassung die links gegebenen Hinweise beim Ausfüllen.

1. Allgemeine Informationen

Für die Ermittlung des Unterstützungsbedarfs durch informatorische Assistenzsysteme ist es wichtig, neben objektiven Kriterien, Ihre persönlichen Erfahrungen und Einschätzungen zu berücksichtigen. Die Erhebung dieser Daten erfolgt mit dem vorliegenden Fragebogen.

Bitte füllen Sie den Fragebogen vollständig aus. Nur so können wir aus Ihren Angaben das Einsatzpotenzial für ein informatorisches Assistenzsystem bestimmen. Die Befragung wird anonymisiert ausgewertet, das heißt, es sind keine Rückschlüsse auf einzelne Personen möglich. Mit der Abgabe des Fragebogens stimmen Sie den genannten Verwendungszwecken zu.

Für Fragen oder Anregungen können Sie uns gerne kontaktieren.

Vielen Dank für Ihre Mitarbeit!

2. Personenbezogene Daten

2.1 Wie alt sind Sie?

2.2 Geschlecht: ☐ Weiblich ☐ Männlich ☐ Divers

2.3 Wie lange arbeiten Sie schon in diesem Betrieb?

☐ bis 6 Monate ☐ 6 bis 12 Monate ☐ 1 bis 5 Jahre
☐ 5 bis 10 Jahre ☐ mehr als 10 Jahre

2.4 Sind Sie über eine Zeitarbeitsfirma beschäftigt? ☐ Ja ☐ Nein

2.5 Bitte nennen Sie uns das Arbeitssystem, auf das sich der Fragebogen ausschließlich bezieht.

2.6 Wie lange arbeiten Sie schon im genannten Arbeitssystem?

☐ bis 6 Monate ☐ 6 bis 12 Monate ☐ 1 bis 5 Jahre
☐ 5 bis 10 Jahre ☐ mehr als 10 Jahre

2.7 In dem genannten Arbeitssystem arbeiten Sie...

☐ selten (bis 25%) ☐ teilweise (25 bis 50%) ☐ überwiegend (50 bis 75%)
☐ ausschließlich (mehr als 75%)

evasys	Complexity Rating for Assembly Assistance	evasys

3. **Definition**

Eine **Baugruppe** ist ein aus Bauteilen gefertigtes Zwischen- oder Endprodukt, das in einem Montageprozess erstellt wird. **Bauteile** stellen somit die Einzelteile im Arbeitssystem dar, die zur Fertigstellung einer oder mehrerer Baugruppen benötigt werden.

4. **Dynamik und Flexibilität**

		Stimme gar nicht zu	Stimme eher nicht zu	Stimme teilweise zu	Stimme eher zu	Stimme voll zu	Weiß ich nicht
4.1	Es kommt zu häufigen Änderungen oder Wechseln der Bauteile.	☐	☐	☐	☐	☐	☐
4.2	Es kommt zu häufigen Änderungen oder Neuentwicklungen der Baugruppen.	☐	☐	☐	☐	☐	☐
4.3	Es müssen oft Entscheidungen getroffen werden, ohne dass ausreichende Informationen zur Verfügung stehen.	☐	☐	☐	☐	☐	☐
4.4	Es kommt zu häufigen Änderungen der Montageanweisungen/-informationen.	☐	☐	☐	☐	☐	☐

5. **Produkt- und Montagevielfalt**

		Stimme gar nicht zu	Stimme eher nicht zu	Stimme teilweise zu	Stimme eher zu	Stimme voll zu	Weiß ich nicht
5.1	In dem Arbeitssystem steht eine Vielfalt an Bauteilen bereit.	☐	☐	☐	☐	☐	☐
5.2	In dem Arbeitssystem wird eine Vielfalt an Baugruppen montiert.	☐	☐	☐	☐	☐	☐
5.3	Es werden mehrere Varianten einer Baugruppe montiert.	☐	☐	☐	☐	☐	☐
5.4	Die Montage umfasst eine Vielzahl an unterschiedlichen Arbeitsschritten.	☐	☐	☐	☐	☐	☐

evasys	Complexity Rating for Assembly Assistance	evasys

6. **Kognitive Zusatzbelastung und Zeitaufwand**

		Stimme gar nicht zu	Stimme eher nicht zu	Stimme teilweise zu	Stimme eher zu	Stimme voll zu	Weiß ich nicht
6.1	Vor, während oder nach der Montage muss eine Vielzahl an anderen Tätigkeiten ausgeführt werden (z. B. Dokumentation, Buchungen, Überprüfung von Daten oder Messwerten).	☐	☐	☐	☐	☐	☐
6.2	Es braucht Zeit, bis ein Montageprozess sicher beherrscht wird.	☐	☐	☐	☐	☐	☐
6.3	Bauteile haben keine eindeutige Einbaulage und können falsch montiert werden.	☐	☐	☐	☐	☐	☐
6.4	Zwischen den bereitgestellten Werkzeugen bestehen Ähnlichkeiten (z. B. ähnliche Größen oder Formen).	☐	☐	☐	☐	☐	☐

7. **Informationsbedarf und - umfang**

		Stimme gar nicht zu	Stimme eher nicht zu	Stimme teilweise zu	Stimme eher zu	Stimme voll zu	Weiß ich nicht
7.1	Zur Aufgabenerfüllung werden unterschiedliche Informationsquellen benötigt.	☐	☐	☐	☐	☐	☐
7.2	Montageschritte sind nach Vorgaben zu kontrollieren (z. B. Sichtprüfung, Messung).	☐	☐	☐	☐	☐	☐
7.3	Die Arbeitsaufgabe erfordert immer wieder Neu- oder Umlernen.	☐	☐	☐	☐	☐	☐