

## **Bewertungsmodell für Komplexität von manuellen Montageaufgaben**

Fabian NOWOTNY<sup>1</sup>, Tina HAASE<sup>2</sup>

<sup>1</sup> *Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, Fakultät für Humanwissenschaften,  
Professur Berufliche Didaktik personenbezogener Berufe,  
Zschokkestraße 32, D-39104 Magdeburg*

<sup>2</sup> *Fraunhofer-Institut für Fabrikbetrieb und -automatisierung IFF Magdeburg,  
Sandtorstraße 22, D-39106 Magdeburg*

**Kurzfassung:** Im vorliegenden Beitrag wird ein Komplexitätsbewertungsmodell für manuelle Montageaufgaben vorgestellt. Das Modell erlaubt die Zuordnung der einzelnen Montageschritte zu kognitiven Fähigkeiten. In einem Pretest sowie der Evaluation wurde das Modell teilweise validiert: Bewusst als hochkomplex angelegte Arbeitsschritte, die mithilfe des Modells auch als solche bewertet wurden, führten u. a. zu längeren Bearbeitungszeiten und mehr Fehlern in den Unterschritten der Montageaufgabe. Für die Gestaltung von kognitiven Assistenzsystemen kann das Modell in der Entwicklung hilfreich sein, die Informationsausgaben, sowie andere Unterstützungen gezielter den kognitiven Fähigkeiten zuzuordnen.

**Schlüsselwörter:** manuelle Montage, Komplexitätsbewertung, kognitive Fähigkeiten, mentale Belastung/Beanspruchung

### **1. Einleitung**

Durch immer variantenreichere, stärker individualisierbare Produkte und kleinere Losgrößen wird die manuelle Montage in Produktionsprozessen weiterhin relevant sein. Dies verlangt von den Werker\*innen, immer schneller neue Montageschritte oder Produktvarianten zu erlernen. Um Mitarbeiter\*innen im Anlernprozess zu unterstützen und die ad-hoc Befähigung der Mitarbeiter\*innen zu ermöglichen, werden lernförderliche, (Fredrich et al. 2021) kognitive Assistenzsysteme eingesetzt, welche innovative Anzeigetechnologien nutzen (Haase et al. 2023).

Um visuelle Anzeigen zielgerichtet zur kognitiven Unterstützung einzusetzen, kann es hilfreich sein, die Arbeitsschritte einer manuellen Montageaufgabe den beanspruchten kognitiven Fähigkeiten wie Wahrnehmung, Aufmerksamkeit und Gedächtnis, sowie Denken, Urteilen und Entscheiden (Wentura & Frings 2013, S. 60–152) zuzuordnen. Das in diesem Beitrag vorgestellte Komplexitätsbewertungsmodell soll hierzu einen Beitrag leisten. Zentral für das Modell ist die Erweiterung bekannter Modelle (insbesondere Zaeh et al. 2009) um die Dimensionen *Werkzeugeinsatz*, *Vorgehen* und *Handhabung*. Es gilt die Annahme, dass komplexere Arbeitsschritte (mit den jeweils zugeordneten kognitiven Fähigkeiten) zu einer höheren mentalen Beanspruchung (van Acker et al. 2018) führen.

Das Modell entstand im Rahmen einer Evaluation verschiedener Anzeigetechnologien an einem stationären Arbeitsplatz der manuellen Montage. Ziel der Evaluation war es, Displaydarstellungen an verschiedenen Montageorten miteinander, sowie mit

einer projektionsbasierten Darstellung zu vergleichen, wobei die projektionsbasierte Anzeige kontaktanalog (Stork & Schubö 2010, S. 324) gestaltet war. Das Modell wurde eingesetzt, um zwei gleich komplexe, künstliche, manuelle Montageaufgaben zu schaffen. Für die Evaluation mussten die Proband\*innen beide Aufgaben nacheinander mithilfe einer Schritt-für-Schritt-Anleitung aufbauen. Dabei kamen pro Aufgabe unterschiedliche Anzeigen (Technologie oder Display-Montageort) zum Einsatz, welche nach mentaler Beanspruchung verglichen wurden.

In einem Pretest sowie der Evaluation wurde das Modell teilweise validiert: Bewusst als hochkomplex angelegte Arbeitsschritte, die mithilfe des Modells auch als solche bewertet wurden, führten u. a. zu längeren Bearbeitungszeiten und mehr Fehlern in den Unterschritten der Montageaufgabe.

## 2. Theoretische Bezüge

Eine Gestaltungsdimension für kognitive Assistenzsysteme stellt die Lernförderlichkeit dar. Dabei folgen die Kriterien der lernförderlichen Gestaltung von kognitiven Assistenzsystemen, denen einer lern- und kompetenzförderlichen Gestaltung der Arbeit (Fredrich et al. 2021, S. 5).

Um ein kognitives Assistenzsystem lernförderlich zu gestalten, gilt es, mit Blick auf die Cognitive Load Theory (Sweller et al. 2011), den *extraneous load* gering zu halten. Dieser beschreibt den Anteil mentaler Belastung, welche nicht zum Erlernen des dargebotenen Materials führt. Um diesen Anteil bestimmen zu können, ist es jedoch auch notwendig, den *intrinsic load*, also die von der Aufgabe selbst ausgehende Belastung, zu kennen. Da der *intrinsic load* mit der Komplexität des zu erlernenden Materials steigt, bedarf es eines Modells, welches dazu geeignet ist, die Komplexität des Materials zu bestimmen.

Um Komplexität von Montageaufgaben an einem festen Arbeitsplatz zu bewerten, existieren eine Vielzahl von Modellen, welche sich entweder zwischen den Polen der rein objektiven (Zhu et al. 2008; Zaeh et al. 2009) bzw. subjektiven Messmethoden (Falck et al. 2016) befinden, oder eine Mischform der beiden Extreme darstellen und so eine dritte, mittlere Kategorie bilden. Objektive Messmethoden verlassen sich dabei auf Daten, wie im Unternehmen bekannte Kennzahlen. Im Gegenzug dazu werden für subjektive Komplexitätsbewertungen Experten\*innen vor Ort interviewt und so eine Einschätzung gewonnen (Bornewasser & Hinrichsen 2020, S. 57f).

Ausgehend von den vorgestellten Modellen und den Funktionen der Montage nach VDI 2860, wurden für die vorliegende Arbeit Dimensionen identifiziert, anhand derer die Komplexität der Montageaufgabe für das nachfolgend beschriebene Experiment bemessen wurde. Je mehr Auswahlmöglichkeiten die Werker für jede der genannten Dimensionen haben, desto komplexer ist die Montageaufgabe. (Zhu et al. 2008) Darüber hinaus lassen sich den fünf Dimensionen wiederum Unterschritte zuordnen, wobei die Unterschritte jeweils eine Entsprechung in kognitiven Fähigkeiten finden: Ein Prinzip, das stark von Zaeh et al. (2009) beeinflusst ist. Die Komplexität der Dimensionen erhöht sich auch bei Schwierigkeiten bezogen auf die zugeordneten kognitiven Fähigkeiten.

Die Reihenfolge der Dimensionen muss in der tatsächlichen Montageaufgabe nicht zwingend der Reihenfolge der Dimensionen in Tabelle 1 folgen: Die Werker\*innen können in der praktischen Ausführung des Montagevorgangs zwischen den Dimensionen springen oder Teilschritte zugunsten anderer abbrechen.

Das vorgestellte Modell ist der subjektiven Bewertung zuzurechnen. Für die Erstellung und die Bewertung der Montageaufgabe im Experiment wurde die Komplexität in den Unterschritten mit den Werten „niedrig, mittel und hoch“ bewertet.

**Tabelle 1:** Komplexitätsbewertungsmodell

Dimensionen	Unterschritte	Mentale Prozesse
<b>Auswahl des Bauteils</b>	benötigtes Material identifizieren	Wahrnehmung der Objekteigenschaften
	Material merken	Arbeitsgedächtnis
	Bauteil (am Lageort) finden	Selektieren / abgleichen mit Objektrepräsentation/ visuelle Suche
	Bauteil nehmen	Bewegung ausführen
<b>Werkzeugauswahl</b>	benötigtes Werkzeug identifizieren	Wahrnehmung der Objekteigenschaften
	Werkzeug merken	Arbeitsgedächtnis
	Werkzeug (am Lageort) finden	Selektieren/ abgleichen mit Objektrepräsentation/ visuelle Suche
	Werkzeug nehmen	Bewegung ausführen
<b>Fügen</b>	SOLL-Zustand identifizieren	Wahrnehmung der Objekteigenschaften/ Arbeitsgedächtnis
	Fügeort finden	Selektieren/ abgleichen mit Objektrepräsentation/ visuelle Suche
	Fügen durchführen	Bewegung ausführen
<b>Handhaben</b>	Bauteile setzen und ausrichten	abgleichen mit Objektrepräsentation
	Bauteile fixieren	geplante Bewegung ausführen
	Werkzeug einsetzen	(geplante) Bewegung ausführen
<b>Vorgehen</b>	Vorgehen planen	Problemlösen (mental Rotation, Arbeitsgedächtnis)
	Ergebnis bewerten	Selektieren/ abgleichen mit Objektrepräsentation/ Arbeitsgedächtnis/ Urteilen /Entscheiden
<b>Erfahrung</b>	Abrufen/Lernen	Zugriff auf Langzeitgedächtnis

### 3. Forschungsfrage

Die Evaluation der Anzeigearten war eingebettet in die Methodologie des research through design (Zimmerman et al. 2007). Da die beschriebene Evaluation (mit Pretest) die erste Iterationsschleife war, hatte diese noch stark den Charakter einer Vorstudie und war somit explorativ angelegt. Vor diesem Hintergrund lautete die Forschungsfrage, bezogen auf das vorgestellte Bewertungsmodell, in der ersten Evaluation:

Führt die gleiche Komplexitätsbewertung von Dimensionen und Unterschritten einer Montageaufgabe mithilfe des Modells auch zu gleicher mentaler Beanspruchung?

#### 4. Durchführung

Die Validierung des Modells erfolgte parallel zur durchgeführten Evaluation der visuellen Anzeigen: Die Proband\*innen sollten nacheinander zwei manuelle Montageaufgaben bearbeiten, wobei für jede Aufgabe eine andere Anzeige verwendet wurde. Dazu sollten beide Montageaufgaben jeweils ähnliche Komplexitätsbewertungen entlang der Dimensionen des vorgestellten Modells enthalten. So konnte bei der Evaluation sichergestellt werden, dass die gezeigten Effekte auf die Variation der Anzeigen zurückzuführen waren.

Die Evaluation fand mit 15 Proband\*innen statt, wobei sich die Stichprobe aus Studierenden unterschiedlicher Studiengänge rekrutierte.

Die Proband\*innen trugen während des Versuchs eine Eye-Tracking-Brille Glasses 3 des Herstellers Tobii. Jeweils nach dem Bearbeiten einer der beiden Aufgaben wurde von den Proband\*innen der NASA-TLX Fragebogen (Hart 2006) ausgefüllt.

Die erstellten Arbeitsaufgaben waren abstrakt, sodass der nächste Arbeitsschritt nicht logisch oder mithilfe von Vorerfahrung für die Proband\*innen erkennbar war. Die Proband\*innen mussten somit ausschließlich die dargebotenen Instruktionen verwenden und die Dimension Erfahrung konnte kontrolliert werden, da nicht auf bereits vorhandene mentale Modelle zurückgegriffen werden konnte. Eine Argumentation, die auch van Acker et al. (2020, S. 7) verfolgen.

Als Materialien für die Montageaufgabe wurden Bauteile des Alufix-Baukastens der Witte Barskamp GmbH & Co. KG verwendet, welche auf eine Lochplatte montiert wurden, die einen Werkstückträger simulierte.

Die Eye-Tracking-Aufnahmen wurden nach dem von Seewald & Hassenzahl (2004) vorgestellten Verfahren qualitativ beobachtet. Eine quantitative Auswertung der Eye-Tracking-Aufnahmen war aufgrund technischer Beschränkungen nicht möglich. Die NASA-TLX Werte wurde mithilfe von Microsoft Excel ausgewertet.

#### 5. Ergebnisse

Die als gleich angenommene Komplexität der beiden Montageaufgaben führte bei den Proband\*innen zu einer ähnlichen mentalen Belastung nach NASA-TLX. (1. Aufgabe: TLX 44,49, SD: 12,80; 2. Aufgabe: TLX: 31,21 SD: 16,69)

Die etwas geringere mentale Beanspruchung bei der zweiten, bearbeiteten Aufgabe kann auf Lerneffekte bezüglich des Prinzips der Schraubverbindungen zurückgeführt werden.

Bei der Beobachtung der Eye-Tracking-Aufnahmen zeigte sich, dass kritische Ereignisse vor allem an den Arbeitsschritten auftraten, welche im Voraus als mittel bis hochkomplex bewertet wurden. Zwei Probanden hatten eine einschlägige Berufsausbildung und somit hohe Vorerfahrung in der manuellen Montage, diese Probanden konnten die komplexen Schritte in der Dimension Handhabung besonders gut meistern.

Zudem wurde beobachtet, dass die Instruktion mithilfe der kontaktanalogen Projektion in den Unterschritten *Bauteil finden*, *Werkzeug finden* und *Fügeort finden* der

Displaydarstellung überlegen war. Dies lässt sich auf die bessere Unterstützung der kognitiven Fähigkeit der Aufmerksamkeit bei den Proband\*innen erklären und kann als weiterer Hinweis auf die Validität des Modells gewertet werden. Ein Ergebnis, das auch im Einklang mit den Ergebnissen anderer Untersuchungen zu kontaktanalogen Projektionen steht. (Stork und Schubö 2010; Büttner et al. 2016; Funk et al. 2016; Bosch et al. 2017)

## 6. Diskussion

Das vorgestellte Modell rückt mit den Dimensionen *Handhabung* und *Vorgehen* stärker die tatsächliche Ausführung der Montage durch die Werker in den Blick. Ebenso stellt die Dimension des *Werkzeugeinsatzes* eine Erweiterung dar, die aufgrund der Beliebtheit von werkzeuglosen LEGO-Montageaufgaben bisher in Versuchen eine untergeordnete Rolle spielte. (z. B. Büttner et al. 2016; Funk et al. 2016)

Für die Gestaltung von kognitiven Assistenzsystemen kann das Modell in der Entwicklung hilfreich sein, die Informationsausgaben, sowie andere Unterstützungen gezielter den kognitiven Fähigkeiten zuzuordnen.

Nicht zuletzt dient das Modell auch im betrieblichen Kontext dazu, komplexitäts-treibende Arbeitsschritte zu identifizieren, wodurch Produktionsplaner\*innen, Produktdesigner\*innen oder Ausbilder\*innen gezielt Komplexität im Montageprozess z. B. auch durch den Einsatz kognitiver Assistenzsysteme verringern können.

Im vorgestellten Zustand verbleibt das Modell auf der Stufe einer subjektiven Bewertung, kann jedoch bereits für eine einfache überblicksartige Analyse genutzt werden. Ebenso können weitere Evaluationsschleifen die Zuordnung der kognitiven Fähigkeiten zu den Unterschritten besser validieren. Diese ist im jetzigen Zustand vorrangig konzeptionell.

Zukünftige Forschung verlangt nach einer weiteren Validierung des Modells. Zudem kann es Ziel von nachfolgenden Studien sein, mithilfe des Modells Informationsausgaben von Assistenztechnologien den kognitiven Fähigkeiten zuzuordnen, welche diesen die beste Unterstützung bieten. Die Auswertung von Pupillendurchmessern mithilfe von Eye-Tracking-Daten zur Bestimmung von mentaler Beanspruchung bietet Potenzial. Die externe Validität der in Labortests bewährten Methode, den Pupillendurchmesser zur Messung mentaler Beanspruchung einzusetzen, ist gering. (van Acker et al. 2020) Ob das von Schwalm (2009) vorgestellte Verfahren im Montagekontext die externe Validität erhöhen kann, bleibt offen.

## 7. Literatur

- Bornewasser M, Hinrichsen S (2020): Informatorische Assistenzsysteme in der variantenreichen Montage. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Bosch T, Könemann R, Cock H de, van Rhijn G (2017): The effects of projected versus display instructions on productivity, quality and workload in a simulated assembly task. In: Proceedings of the 10th International Conference on Pervasive Technologies Related to Assistive Environments. PETRA '17: 10th International Conference on Pervasive Technologies Related to Assistive Environments. Island of Rhodes Greece, 21 06 2017 23 06 2017. New York, NY, USA: ACM, S. 412–415.
- Büttner S, Funk M, Sand O, Röcker C (2016): Using Head-Mounted Displays and In-Situ Projection for Assistive Systems. In: Proceedings of the 9th ACM International Conference on Pervasive Technologies Related to Assistive Environments. PETRA '16: 9th ACM International Conference on

- Pervasive Technologies Related to Assistive Environments. Corfu Island Greece, 29 06 2016 01 07 2016. New York, NY, USA: ACM, S. 1–8.
- DIN EN ISO 9241-110, Oktober 2020: Ergonomie der Mensch-System-Interaktion – Teil 110: Interaktionsprinzipien.
- Falck A-C, Örtengren R, Rosenqvist M, Söderberg R (2016): Criteria for Assessment of Basic Manual Assembly Complexity. In: *Procedia CIRP* 44, S. 424–428. DOI: 10.1016/j.procir.2016.02.152.
- Fredrich H, Dick M, Haase T (2021): Zur Passung von Arbeitsanforderungen und digitalen Assistenztechnologien in handwerklichen und industriellen Montageprozessen. In: *Gesellschaft für Arbeitswissenschaft e.V. (Hg.): Frühjahrskongress 2021. Arbeit HUMAINE gestalten*. Bochum, 3.–5. März. Dortmund: GfA-Press.
- Funk M, Kosch T, Schmidt A (2016): Interactive worker assistance. In: Lukowicz P, Krüger A, Bulling A, Lim Y-K & Patel SN (Hg.): *Proceedings of the 2016 ACM International Joint Conference on Pervasive and Ubiquitous Computing. UbiComp '16: The 2016 ACM International Joint Conference on Pervasive and Ubiquitous Computing*. Heidelberg Germany, 12 09 2016 16 09 2016. New York, NY, USA: ACM, S. 934–939.
- Haase T, Keller A, Warschewske F, Woitag M, Sauer S, Berndt D (2023): Digital Assembly Assistance Systems: Methods, Technologies and Implementation Strategies. In: Röcker C & Büttner S (Hg.): *Human-Technology Interaction*. Cham: Springer International Publishing, S. 15–48.
- Hart SG (2006): Nasa-Task Load Index (NASA-TLX); 20 Years Later. In: *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting* 50 (9), S. 904–908. DOI: 10.1177/154193120605000909.
- Schwalm M (2009): Pupillometrie als Methode zur Erfassung mentaler Beanspruchungen im automotiven Kontext. Dissertation. Universität des Saarlandes, Saarbrücken. Philosophische Fakultät.
- Seewald F, Hassenzahl M (2004): Vom kritischen Ereignis zum Nutzungsproblem: Die qualitative Analyse in diagnostischen Usability Tests. Stuttgart: Fraunhofer Verlag.
- Stork S, Schubö A (2010): Human cognition in manual assembly: Theories and applications. In: *Advanced Engineering Informatics* 24 (3), S. 320–328. DOI: 10.1016/j.aei.2010.05.010.
- Sweller J, Ayres P, Kalyuga S (Hg.) (2011): *Cognitive Load Theory*. New York, NY: Springer New York.
- van Acker BB, Bombeke K, Durnez W, Parmentier DD, Mateus JC, Biondi A et al. (2020): Mobile pupillometry in manual assembly: A pilot study exploring the wearability and external validity of a renowned mental workload lab measure. In: *International Journal of Industrial Ergonomics* 75, S. 102891. DOI: 10.1016/j.ergon.2019.102891.
- van Acker BB, Parmentier DD, Vlerick P, Saldien J (2018): Understanding mental workload: from a clarifying concept analysis toward an implementable framework. In: *Cogn Tech Work* 20 (3), S. 351–365. DOI: 10.1007/s10111-018-0481-3.
- VDI 2860, 1990: VDI Richtlinie 2860: Montage- und Handhabungstechnik; Handhabungsfunktionen, Handhabungseinrichtungen; Begriffe, Definitionen, Symbole.
- Wentura D, Frings C (2013): *Kognitive Psychologie*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden.
- Zaeh MF, Wiesbeck M, Stork S, Schubö A (2009): A multi-dimensional measure for determining the complexity of manual assembly operations. In: *Prod. Eng. Res. Devel.* 3 (4-5), S. 489–496. DOI: 10.1007/s11740-009-0171-3.
- Zhu X, Hu SJ, Koren Y, Marin SP (2008): Modeling of Manufacturing Complexity in Mixed-Model Assembly Lines. In: *Journal of Manufacturing Science and Engineering* 130 (5), Artikel 051013. DOI: 10.1115/1.2953076.
- Zimmerman J, Forlizzi J, Evenson S (2007): Research through design as a method for interaction design research in HCI. In: Mary Beth Rosson und David Gilmore (Hg.): *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems. CHI07: CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. San Jose California USA, 28 04 2007 03 05 2007. New York, NY, USA: ACM, S. 493–502.





Gesellschaft für Arbeitswissenschaft e.V.

## Arbeitswissenschaft in-the-loop

**Mensch-Technologie-Integration  
und ihre Auswirkung auf Mensch,  
Arbeit und Arbeitsgestaltung**

70. Kongress der  
Gesellschaft für Arbeitswissenschaft e.V.

Institut für Arbeitswissenschaft und  
Technologiemanagement IAT  
Universität Stuttgart

In Zusammenarbeit mit dem Fraunhofer-Institut für  
Arbeitswirtschaft und Organisation IAO

06. – 08. März 2024

---

## GfA-Press

---

**Bericht zum 70. Arbeitswissenschaftlichen Kongress vom 06. – 08. März 2024**

**Institut für Arbeitswissenschaft und Technologiemanagement (IAT), Universität Stuttgart**

**In Zusammenarbeit mit: Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation (IAO), Stuttgart**

Herausgegeben von der Gesellschaft für Arbeitswissenschaft e.V.

Sankt Augustin: GfA-Press, 2024

ISBN 978-3-936804-34-8

NE: Gesellschaft für Arbeitswissenschaft: Jahresdokumentation

Als Manuskript zusammengestellt. Diese Jahresdokumentation ist nur in der Geschäftsstelle (s. u.) erhältlich.

Alle Rechte vorbehalten.

© **GfA-Press, Sankt Augustin, Schriftleitung: Prof. Dr. Rolf Ellegast**

im Auftrag der Gesellschaft für Arbeitswissenschaft e.V.

Ohne ausdrückliche Genehmigung der Gesellschaft für Arbeitswissenschaft e.V. ist es nicht gestattet:

- den Kongressband oder Teile daraus in irgendeiner Form (durch Fotokopie, Mikrofilm oder ein anderes Verfahren) zu vervielfältigen,
- den Kongressband oder Teile daraus in Print- und/oder Nonprint-Medien (Webseiten, Blog, Social Media) zu verbreiten.

Die Verantwortung für die Inhalte der Beiträge tragen alleine die jeweiligen Verfasser; die GfA haftet nicht für die weitere Verwendung der darin enthaltenen Angaben.

### **Geschäftsstelle der GfA**

Simone John, Tel.: +49 (0)30 1300-13003, Alte Heerstraße 111, D-53757 Sankt Augustin

[info@gesellschaft-fuer-arbeitswissenschaft.de](mailto:info@gesellschaft-fuer-arbeitswissenschaft.de) · [www.gesellschaft-fuer-arbeitswissenschaft.de](http://www.gesellschaft-fuer-arbeitswissenschaft.de)

### **Screen design und Umsetzung**

© 2024 fröse multimedia, Frank Fröse,

[office@internetkundenservice.de](mailto:office@internetkundenservice.de), [www.internetkundenservice.de](http://www.internetkundenservice.de)