








Konzeption eines adaptiven Systems für Augmented Reality Lehr-Lernsysteme mit individuellen Lernszenarien

Dennis Wohlers ¹, Roland Schröder-Kroll¹, Svetlana Golovanev ¹, Michael Geis ², Maximilian Mushoff ³, Valerie Varney ³, Joachim Metternich², Rüdiger Weißbach ¹ und Axel Wagenitz ¹








Abstract: Adaptives Lernen, ein personalisierter Lehransatz der Lerninhalte an die individuellen Bedürfnisse der Lernenden anpasst, führt bei der Integration in Augmented und Virtual Reality (AR, VR) Lernumgebungen zu vielversprechenden Ergebnissen im Kontext lernförderlicher Faktoren. Im Bereich von AR Lehr-Lernsystemen, die es Lehrenden erlauben, unabhängig vom Lehrgegenstand selbstständig Lernsimulationen zu erstellen, konnten in der Literatur keine bestehenden Ansätze für adaptive Modelle identifiziert werden. Für das gegenwärtige Forschungsprojekt „easyARguide“ erscheint die Integration von Adaptivität als vielversprechender Weg, um den Lerntransfer zu verbessern. In dem Paper wird ein adaptives AR-Lehr-Lernsystem mit anpassbaren Lehrinhalten entwickelt. Das System adressiert eine flexible Lerngestaltung, um die individuelle Präferenz von Lehrenden bei der Lernumgebungserstellung zu gewährleisten und gleichzeitig eine unabhängige Anwendung auf diverse Lerngebiete sicherzustellen. Dieser Ansatz ist als konzeptionelle Ausarbeitung zu verstehen, dessen Wirksamkeit noch nicht empirisch untersucht worden ist. Das entwickelte Modell soll als Grundlage für weitere Forschungsarbeiten fungieren.

Keywords: Adaptives Lernen, Augmented Reality, Lehr-Lernsystem

Disclaimer: Die in der vorliegenden Arbeit verwendeten Personenbezeichnungen beziehen sich gleichermaßen auf weibliche, männliche und diverse Personen. Auf eine Doppelnennung und gegenderte Bezeichnungen wird zugunsten einer besseren Lesbarkeit verzichtet.

1 Einleitung

Der demografische Wandel führt in Handwerk und produzierenden Unternehmen zum Verlust ausgebildeter Fachkräfte und deren Fachwissen [MH22]. Das Augmented Reality

-
- 1 Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg, Fakultät Wirtschaft und Soziales, Berliner Tor 5, 20099 Hamburg, Deutschland, dennis.wohlers@haw-hamburg.de,  <https://orcid.org/0009-0005-2233-7629>; roland.schroeder-kroll@haw-hamburg.de; svetlana.golovanev@haw-hamburg.de,  <https://orcid.org/0009-0003-3094-3851>; ruediger.weissbach@haw-hamburg.de,  <https://orcid.org/0000-0002-7435-2135>; axel.wagenitz@haw-hamburg.de,  <https://orcid.org/0009-0002-9612-9257>
 - 2 Technische Universität Darmstadt, Institut für Produktionsmanagement, Technologie und Werkzeugmaschinen (PTW), 64287 Darmstadt, Deutschland, m.geis@ptw.tu-darmstadt.de,  <https://orcid.org/0009-0000-6805-6340>; j.metternich@ptw.tu-darmstadt.de
 - 3 Technische Hochschule Köln, Department, 50678 Köln, Deutschland, maximilian.mushoff@th-koeln.de,  <https://orcid.org/0009-0007-2260-5755>; valerie.varney@th-koeln.de,  <https://orcid.org/0000-0002-6252-7217>

(AR) Forschungsprojekt easyARguide⁴ zielt unter anderem darauf ab, diesem Verlust durch Sicherung des Wissens entgegenzuwirken. Lehrende können mit der im Projekt entwickelten Anwendung ohne Programmierkenntnisse domänenunabhängig Lerninhalte mit einem AR Head-Mounted-Display umsetzen und Lernenden zur Verfügung stellen.

Der Einsatz von AR kann in Aus- und Weiterbildungsprozessen eine Reduzierung von Anlernzeiten und Prozessfehlern bewirken [Ka21][WM98][LQB16][HWT15]. Ein Anstieg der Lerneffizienz kann sowohl während des als auch nach dem Training beobachtet werden [Ka21][WM98]. Dabei sind die Kosten für Entwicklung, Einrichtung und Implementierung von konventionellen AR-Technologien im Aus- und Weiterbildungsprozess eine der größten Herausforderungen [Fe17]. Durch die in easyARguide entwickelte Anwendung wird Fachpersonal in die Erstellung von AR-Trainingsszenarien einbezogen, was den monetären Aufwand reduziert und einen niederschweligen Zugang zur Integration von AR in Lehr-Lernprozesse fördert. In dem Zusammenhang gewinnt auch die lernförderliche Gestaltung von AR-Szenarien an Bedeutung, z.B. durch die Umsetzung adaptiver Lernsysteme in AR- und VR-Lernumgebungen, welche in vorangegangenen Studien untersucht wurden [Hu21][Si16]. Hierbei lässt sich Adaptivität als System definieren, das sich beim Lernen an Vorwissen, Lernfortschritt und Verhalten der Lernenden anpasst [Ke69]. Insgesamt besteht das Ziel darin, durch die Adaption der Lernumgebung an den Lernenden das Lernumfeld zu verbessern und den Lernerfolg positiv zu beeinflussen. Aktuell existieren Gestaltungsrichtlinien für adaptive VR- und AR-Lernsysteme [ZA20][Hu21], jedoch nicht für Anwendungen –wie im Rahmen des Projekts easyARguide entwickelt– mit frei erstellbaren Inhalten. Die vorliegende Arbeit erstellt auf Basis relevanter Studienergebnisse und lernpsychologischer Grundlagen ein Konzept für ein solches adaptives Lernsystem, welches die Anforderungen aus der Anwendung im Rahmen von easyARguide erfüllt.

2 Lern-adaptive und lernpsychologische Grundlagen

Zahabi et al. präsentieren ein Framework für adaptive VR-Lernszenarien mit den Aspekten Performanzmessung, adaptive Logik und adaptive Variablen [ZA20]. Für den Spezialfall des Trainings an Maschinen ist AdapTutAR ein adaptives AR Lehr-Lernsystem mit fünf Leveln von Hinweisen [Hu21]. Nach einer Zeit ohne Interaktion oder dem Manipulieren des falschen Objektes wird das Level erhöht, nach Abschluss eines Schrittes verringert [Hu21]. Verbunden mit diesen Beispielen wird in dieser Arbeit in lernpsychologischer Hinsicht die Theorie der kognitiven Belastung (KB) nach Sweller und Chandler als Grundlage angewendet [SC91]. Sie gliedert die Belastung des Arbeitsgedächtnis beim Wissenserwerb in drei Kategorien. Die intrinsische kognitive Belastung (IKB), welche die Belastung durch Komplexität und Zusammenhang des Lernmaterials beschreibt [Sw10], die extrinsische kognitive Belastung (EKB), welche durch die Darstellung der Lerninhalte beeinflusst wird [Ja18][Sw10] und die lernbezogene kognitive Belastung (LKB). Die LKB kann hierbei sowohl durch ein Zunehmen der IKB als auch der EKB ansteigen, wobei eine Zunahme durch

⁴ Ein vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) gefördertes Projekt als Teil des Mittelstand-Digital Netzwerks

EKB das Lernen reduziert und somit im Sinne eines möglichst effektiven Lernfortschritts zu vermeiden ist [Sw10][Ma09][HY13].

Daher ist es zielführend, die Lerninhalte auf das Kompetenzniveau des Lernenden zu adaptieren, um ein anregendes Niveau zu erreichen, welches weder über- noch unterfordert. Für die Adaption wird exemplarisch auf ein dreistufiges Beurteilungskonzept, das in "Kenner", "Köner" und "Experte" einstuft, zurückgegriffen [NRS13]. In dieser Arbeit wird die Bezeichnung der Kompetenzstufen verändert und der "Kenner" zur besseren Abgrenzung zum "Köner" als "Anfänger" bezeichnet.

3 Aufbau des adaptiven Systems

Der grundsätzliche Aufbau des hier entwickelten adaptiven Systems ist dem Framework zu adaptiven VR-Lernsystemen von Zahabi und Razak nachempfunden und gliedert sich in die Teilbereiche Performanzmessung, adaptive Variablen und adaptive Logik [ZA20].

Performanzmessung

Um die Anwendungsfreundlichkeit im beruflichen Kontext zu gewährleisten, wird hier auf Hardware zur sensorischen Erfassung des Lernempfindens der Lernenden verzichtet, was die Arten der möglichen Performanzmessung limitiert. Da die Anwendung auf verschiedenen Endgeräten mit abweichender Sensorik zum Einsatz kommen soll, muss eine universell zugängliche Messgröße eingesetzt werden. Daher wird für die Performanzmessung die Zeit zur Durchführung eines Lernschrittes als Leistungsindikator gewählt.

Adaptive Variablen

Adaptive Variablen sind Lernelemente, die in der Anwendung des easyARguide verwendet werden. Jedes Lernelement kann verschiedene Arten von übergeordneten Informationen vermitteln, wie beispielsweise Orientierung und Positionierung, die nachfolgend als Informationstypen bezeichnet und analog zu [La22] verwendet werden.

Die Definition der adaptiven Variablen des Lehr-Lernsystems dient dazu, den Funktionsumfang der Trainingserstellung einzuschränken und den vermittelten Informationsgehalt eines Lernelements zur Anwendung im Lernsystem zu konkretisieren und vergleichen zu können. Arbeitsschritte, aus denen sich Trainings zusammensetzen, sind definiert als atomare und in sich schlüssige Schritte (an [Gal9] angelehnt). Sie setzen sich aus mehreren Lernelementen zusammen. In der Tabelle 1 sind die im Projekt easyARguide entwickelten Lernelemente, sowie deren Definition und inhärente Informationstypen dargestellt.

Adaptive Logik

Die adaptive Logik basiert auf der fortlaufenden Erfassung der benötigten Zeit für jeden Arbeitsschritt und der darauf basierenden Einteilung der Lernenden in eine Kompetenzgruppe. Entsprechend dieser werden angemessene Lernelemente eingeblendet, um die Herausforderung des Lernprozesses und somit die kognitive Belastung auf einem für die Lernenden anregenden Niveau zu halten. Die Logik teilt hierbei Lernende auf Basis des dreistufigen Beurteilungskonzeptes in "Anfänger", "Köner" und "Experte" ein.

Lernelemente	Definition	Informationstypen
3D Modelle	3D Objekte, die zur Veranschaulichung von Handlungsschritten eingesetzt werden. Im easyARguide-Projekt werden Modelle von Werkzeugen und Arbeitsteilen bereitgestellt, die auch animiert werden können.	H, O, P, I
Arbeitsschritttitle	Bezeichnung des Arbeitsschrittes.	Arbeitsschritttitle
Auxiliary Modelle	Einfache 3D-Modelle, die das Lernen durch visuelle Hinweise unterstützen (z.B. Pfeile für räumliche Orientierung oder Bewegungen eines Objektes) und animiert werden können.	O, P
Bilder	2D-Grafiken, die durch das AR-System eingebunden werden, z.B. Handgriffe, Werkzeuge und Anwendungsbeispiele.	H, O, P, I
Handbewegung	Handbewegungen von 3D Handmodellen, die vom Lehrenden aufgenommen werden können.	H, O, P
Sicherheitshinweis	Optionale Sicherheits- oder Warnhinweise, um auf Besonderheiten im Arbeitsschritt aufmerksam zu machen.	Sicherheitshinweis
Sprachaufnahmen	Auditive Texte, die den Prozess erklären, mit der Möglichkeit, sie als Text auszugeben, um die Barrierefreiheit zu erhöhen.	Beschreibung des Arbeitsschritts
Text	2D-Texte, die ergänzende Handlungsinformationen in kurzen Stichworten oder Sätzen liefern.	Anweisung
Video mit Ton	2D-Videos mit Ton, die durch das AR-System aufgenommen werden. Sie ermöglichen Erläuterungen durch den Lehrenden.	Beschreibung des Arbeitsschritts H, O, P, I
Video ohne Ton	2D-Videos ohne Ton, die durch das AR-System aufgenommen werden und Handgriffe, Werkstücke und Anwendungsbeispiele zeigen.	Handhaltung H, O, P, I

Tab. 1: Definition der Lernelemente und inhärente Informationstypen (abgekürzt wie folgt: H[andhabung], O[rientierung], P[ositionierung], I[dentität])

"Anfänger" verfügen über Grundkenntnisse, die ihnen das erfolgreiche Bearbeiten der Lernsituation ermöglichen, haben aber keine konkreten Kenntnisse über die Arbeitsschritte und bedürfen beim Erlernen einer engmaschigen Anleitung mit hoher Informationsdichte. "Köner" haben bereits erste Grundkenntnisse über das Lernszenario und benötigen für die Bearbeitung der Aufgabe ergänzende Informationen, um ihr Verständnis zu vertiefen.

"Experten" sind mit dem Lernszenario vertraut, sodass Lernaufgaben mit nur minimalen Kontextinformationen eigenständig zu bewältigen sind.

Die für einen Arbeitsschritt benötigte Zeit wird durch den Lehrenden nach der Erstellung des Trainings durch Durchführung der Lernsimulation eingemessen und als Idealwert für die Kompetenzgruppe "Experte" festgelegt. Abhängig von der durch einen Lernenden benötigten Zeit werden beim Überschreiten eines Schwellenwerts zusätzliche Kompetenzgruppen mit den zugehörigen adaptiven Variablen eingeblendet oder reduziert. Die Einstufung bleibt bestehen, solange die zeitliche Bearbeitung der Aufgabenschritte in den Schwellenwerten liegt. Diese Art der Messung baut auf [Hu21] auf. Die Lernenden können vor Beginn des Trainings ihre Erfahrung in einem Lernszenario angeben. Dies dient als Ausgangspunkt für das adaptive System. Die genauen zeitlichen Schwellenwerte zum Übergang zwischen den

Kompetenzgruppen werden in zukünftigen Untersuchungen experimentell ermittelt. Da die easyARguide Anwendung für eine lernaufgabenunabhängige Erstellung von Lernszenarien gedacht ist, muss das adaptive System so entwickelt werden, dass eine möglichst flexible Anwendung von Lernelementen nach individueller Präferenz der Lehrenden und Kontext möglich ist. Nach der vorgenommenen Definition der Kompetenzgruppen benötigen „Experten“ Lernende am wenigsten Informationen zur Erfüllung der Lernschritte. Arbeitsschritttitle sollten als Lernelement ausreichend Kontextinformationen vermitteln. Der Arbeitsschritttitle muss zur Lernerstellung verwendet werden. Optional können Sicherheitshinweise auch erfahrenen Lernenden relevante Inhalte vermitteln. Für die Kompetenzgruppe „Köner“ wurden die Informationstypen „Positionierung“, „Orientierung“, „Handhabung“ und „Anweisung“ als notwendig identifiziert. Um den Lehrenden eine hohe Flexibilität bei der Erstellung von Lernszenarien zu ermöglichen, ist es erforderlich, mindestens eine der Variablen "Text", "Handbewegung" und "Hilfsmodelle" zu nutzen. Dies ermöglicht, auch die Elemente der Lernsituation anzupassen und zu kombinieren. Zur Lernunterstützung wurden die informativen Merkmale „Identität“ und „Beschreibung des Arbeitsschritts“ als zusätzliche benötigte Informationen identifiziert. Der Kompetenzgruppe „Anfänger“ wurden zwei Möglichkeiten der Trainingserstellung gegeben. „Video mit Erklärung“ entspricht dabei einem Informationsniveau, die einer Kombination aus „Sprachaufnahme“ und einem der Merkmale „3D Modelle“, „Bilder“ und „Video ohne Erklärung“ entspricht. Die resultierende Einteilung von adaptiven Variablen in den einzelnen Kompetenzgruppen ist in Abbildung 1 dargestellt.

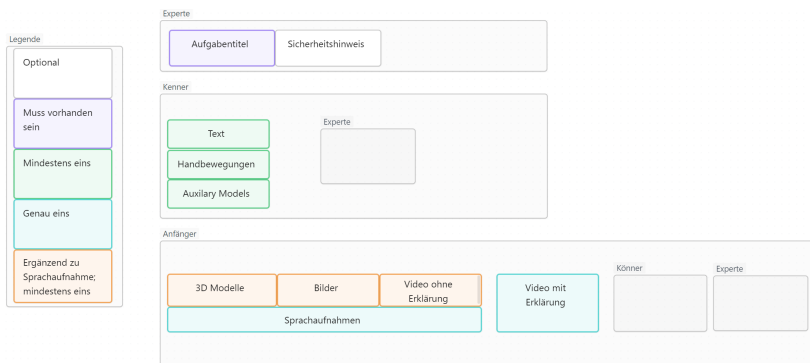


Abb. 1: Zuordnung der Lernelemente nach Kompetenzgruppen

4 Diskussion

In dieser Arbeit wurde ein adaptives Lernsystem zur Anwendung in frei erstellbaren AR Lehr-Lernszenarien entwickelt. Im Vergleich zu dem adaptiven Modell von Huang et al. [Hu21] unterscheidet sich unser Modell durch eine Einteilung von Lernenden und Lernelementen in Kompetenzgruppen und die dementsprechende Adaption. Diese Entscheidung basierte auf einem Kompromiss zwischen einer möglichst hohen Flexibilität und einem möglichst

geringen Aufwand in der Erstellung von Lerninhalten. Lehr-Lernsysteme mit durch Lehrende anpassbaren Lernelementen sind von vielen Randbedingungen gekennzeichnete Systeme. Einerseits müssen sie die Funktionalität haben, Lernende in ihrem Fortschritt bestmöglich zu unterstützen. Gleichzeitig muss ihre Nutzung flexibel sein, um Lehrenden eine der Aufgaben und persönlichen Präferenzen entsprechende Lerngestaltung zu ermöglichen. Das von uns vorgestellte Modell adaptiven Lernens mit einer beispielhaften Einteilung in drei Kompetenzgruppen kann hier ein erster Ansatz sein, um einen Kompromiss aus diesen Faktoren herzustellen. Ob hierbei eine Lernunterstützung bestmöglich gewährleistet wird, soll im Laufe des Projekts easyARguide evaluiert werden. Eine Ergänzung der Kompetenzgruppen um eine weitere Gruppe wäre eine Möglichkeit, um eine kleinteiligere Anpassung der Lernsimulation vorzunehmen und die Unterstützung der Lernenden verbessern zu können. Auch könnte Optimierungsbedarf in der Anordnung der Lernelemente innerhalb der Kompetenzgruppen liegen. Nach der derzeitigen Aufteilung können teilweise Doppelungen von Informationstypen durch verschiedene Lernelemente entstehen. So besitzen beispielsweise beide Lernelemente Bilder und Videos die Informationstypen Orientierung und Positionierung. Dies kann auf Lernende ablenkend wirken oder verschiedene Lerntypen besser unterstützen.

Zur Performanzmessung wurde die für eine Aufgabe benötigte Bearbeitungszeit ausgewählt. Es kann sein, dass Rückschlüsse alleine basierend auf diesem Merkmal nicht für alle Lernenden ein optimales Performanzkriterium darstellt. Aufgrund der Rahmenbedingungen des Projektes ist es nicht möglich, das System durch eine sensorische Erfassung physiologischer Merkmale von Lernenden zu erweitern, um die Akzeptanz durch möglichst geringe Kosten und einer einfachen Anwendbarkeit in der Praxis zu gewährleisten.

Die Wirkung dieses adaptiven AR Lehr-Lernsystems ist noch nicht in seiner Effektivität untersucht. Eine Untersuchung im Anschluss an die Umsetzung des Projektes easyARguide wird angestrebt. Im Kontext von AR sind Forschungsarbeiten zu adaptiven Systemen wenig vertreten und nicht hinreichend in ihrer Effektivität bestätigt.

5 Fazit

Diese Arbeit präsentiert ein neuartiges adaptives Lehr-Lernmodell für frei erstellbare AR-Lernsimulationen, das eine variable Anpassung von Lerninhalten ermöglicht. Das vorgestellte adaptive Modell ist so konstruiert, dass es aufgabenstellungsunabhängig angewendet werden kann. Die Übertragbarkeit auf bestehende AR-Lernsimulationen eröffnet für Unternehmen und Bildungseinrichtungen die Möglichkeit, die Lernerfahrungen durch die Implementierung des adaptiven Systems zu verbessern. Viele Elemente des Modells basieren auf einer Kombination aus diversen theoretischen Vorarbeiten. Etwaige Synergien der Elemente sowie die Effektivität der Elemente in Kombination sind weitgehend unerforscht. Es besteht daher der Bedarf einer empirischen Untersuchung zur Wirksamkeit, um den Einfluss des Systems auf den Lerneffekt zu ermitteln. Als erste wissenschaftliche Arbeit, die ein solches adaptives Lehr-Lern-Modell entwickelt hat, bietet sie einen wichtigen Beitrag zur Weiterentwicklung im Einsatz von adaptiven AR-Systemen in der Bildungstechnologie.

Literaturverzeichnis

- [Fe17] Fehling, C. D.: Erweiterte Lernwelten Für Die Berufliche Bildung. Augmented Reality Als Perspektive. In (Thissen, F., Hrsg.): Lernen in Virtuellen Räumen. De Gruyter, S. 125–142, 2017, ISBN: 978-3-11-050113-1, DOI: 10.1515/9783110501131-009, Stand: 11. 04. 2024.
- [Ga19] Gattullo, M.; Scurati, G. W.; Fiorentino, M.; Uva, A. E.; Ferrise, F.; Bordegoni, M.: Towards Augmented Reality Manuals for Industry 4.0: A Methodology. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing 56, S. 276–286, 2019, ISSN: 0736-5845, DOI: 10.1016/j.rcim.2018.10.001, Stand: 19. 03. 2024.
- [Hu21] Huang, G.; Qian, X.; Wang, T.; Patel, F.; Sreeram, M.; Cao, Y.; Ramani, K.; Quinn, A. J.: AdapTutAR: An Adaptive Tutoring System for Machine Tasks in Augmented Reality. In: Proceedings of the 2021 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems. ACM, Yokohama Japan, S. 1–15, 2021, ISBN: 978-1-4503-8096-6, DOI: 10.1145/3411764.3445283, Stand: 11. 04. 2024.
- [HWT15] Hou, L.; Wang, X.; Truijens, M.: Using Augmented Reality to Facilitate Piping Assembly: An Experiment-Based Evaluation. Journal of Computing in Civil Engineering 29(1), S. 05014007, 2015, ISSN: 0887-3801, 1943-5487, DOI: 10.1061/(ASCE)CP.1943-5487.0000344, Stand: 11. 04. 2024.
- [HY13] Hattie, J.; Yates, G. C. R.: Visible Learning and the Science of How We Learn. Routledge, 2013, ISBN: 978-1-134-64311-0.
- [Ja18] Jadin, T.: Psychologische Aspekte Des Lernens Mit Digitalen Medien. Zeitschrift für Psychologie / Journal of Psychology 38(5), S. 368–374, 2018, ISSN: 2151-2604.
- [Ka21] Kaplan, A. D.; Cruik, J.; Endsley, M.; Beers, S. M.; Sawyer, B. D.; Hancock, P. A.: The Effects of Virtual Reality, Augmented Reality, and Mixed Reality as Training Enhancement Methods: A Meta-Analysis. Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society 63(4), S. 706–726, 2021, ISSN: 0018-7208, 1547-8181, DOI: 10.1177/0018720820904229, Stand: 11. 04. 2024.
- [Ke69] Kelley, C. R.: What Is Adaptive Training? Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society 11(6), S. 547–556, 1969, ISSN: 0018-7208, 1547-8181, DOI: 10.1177/001872086901100602, Stand: 11. 04. 2024.
- [La22] Laviola, E.; Gattullo, M.; Manghisi, V. M.; Fiorentino, M.; Uva, A. E.: Minimal AR: Visual Asset Optimization for the Authoring of Augmented Reality Work Instructions in Manufacturing. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 119(3), S. 1769–1784, 2022, ISSN: 1433-3015, DOI: 10.1007/s00170-021-08449-6, Stand: 19. 03. 2024.
- [LQB16] Loch, F.; Quint, F.; Bristel, I.: Comparing Video and Augmented Reality Assistance in Manual Assembly. In: 2016 12th International Conference on Intelligent Environments (IE). IEEE, London, United Kingdom, S. 147–150, 2016, ISBN: 978-1-5090-4056-8, DOI: 10.1109/IE.2016.31, Stand: 11. 04. 2024.
- [Ma09] Mayer, R. E.: Multimedia Learning. Cambridge University Press, 2009, ISBN: 978-0-521-51412-5 978-0-521-73535-3 978-0-511-81167-8.
- [MH22] Malin, L.; Hickmann, H.: Fachkräftemangel Und Ausbildung Im Handwerk. Kompetenzzentrum Fachkräftesicherung (KOFA), 2022.
- [NRS13] North, K.; Reinhardt, K.; Sieber-Suter, B.: Kompetenzmanagement in der Praxis: Mitarbeiterkompetenzen systematisch identifizieren, nutzen und entwickeln ; mit vielen Fallbeispielen. Springer Gabler, Wiesbaden, 2013, ISBN: 978-3-8349-2815-3.

- [SC91] Sweller, J.; Chandler, P.: Evidence for Cognitive Load Theory. *Cognition and Instruction* 8 (4), S. 351–362, 1991, ISSN: 07370008, 1532690X, JSTOR: 3233599, Stand: 11. 04. 2024.
- [Si16] Siu, K.-C.; Best, B. J.; Kim, J. W.; Oleynikov, D.; Ritter, F. E.: Adaptive Virtual Reality Training to Optimize Military Medical Skills Acquisition and Retention. *Military Medicine* 181 (5S), S. 214–220, 2016, ISSN: 0026-4075, 1930-613X, DOI: 10.7205/MILMED-D-15-00164, Stand: 11. 04. 2024.
- [Sw10] Sweller, J.: Element Interactivity and Intrinsic, Extraneous, and Germane Cognitive Load. *Educational Psychology Review* 22 (2), S. 123–138, 2010, ISSN: 1040-726X, 1573-336X, DOI: 10.1007/s10648-010-9128-5, Stand: 11. 04. 2024.
- [WM98] Waller, D.; Miller, J.: A Desktop Virtual Environment Trainer Provides Superior Retention of a Spatial Assembly Skill, 1998.
- [ZA20] Zahabi, M.; Abdul Razak, A. M.: Adaptive Virtual Reality-Based Training: A Systematic Literature Review and Framework. *Virtual Reality* 24 (4), S. 725–752, 2020, ISSN: 1359-4338, 1434-9957, DOI: 10.1007/s10055-020-00434-w, Stand: 11. 04. 2024.