MedienPädagogik
Zeitschrift für Theorie und Praxis der Medienbildung
www.medienpaed.com **ISSN 1424-3636**

Themenheft Nr. 51:
Immersives Lehren und Lernen mit Augmented und Virtual Reality – Teil 2.
Herausgegeben von Miriam Mulders, Josef Buchner, Andreas Dengel und Raphael Zender

Aktives Integrieren von Repräsentationen bei interaktiven Augmented Reality-Anwendungen

Betrachtung von kognitiver Belastung und Lernerfolg

Jule M. Krüger[1], Franziska Schacht[1] und Daniel Bodemer[1]

[1] Universität Duisburg-Essen

Zusammenfassung
Augmented Reality (AR) bietet viele Möglichkeiten, mit Lernmaterialien zu interagieren. Dabei ist es wichtig, dass diese zielgerichtet eingesetzt werden, um Lernende nicht zu überlasten, jedoch relevante Verarbeitungsprozesse anzuregen. Unterschiedliche Repräsentationsformen selbst extern zuzuordnen (Aktives Integrieren) kann relevante Organisations- und Integrationsprozesse anregen und wird hier auf eine AR-Lernanwendung übertragen, die virtuelle und reale Komponenten verknüpft. In einem experimentellen Vergleich zu einer vorintegrierten Version (N = 94), werden Variablen zur kognitiven Belastung, Aufgabenbelastung und dem Lernerfolg erfasst. Die Hypothesen, dass das Aktive Integrieren zu höherem Germane Cognitive Load und besserem Lernerfolg führt, wurden nicht bestätigt und die deskriptiven Daten zeigten sogar einen gegenteiligen Unterschied. Auch die meisten weiteren Hypothesen mussten verworfen werden, da sich keine signifikanten Unterschiede zeigten. Nur die wahrgenommene Leistung war mit Aktivem Integrieren signifikant höher. In der explorativen Betrachtung von Bildschirmaufnahmen in der Lernphase zeigte sich, dass beim Aktiven Integrieren die virtuellen Elemente in der AR-Anwendung weniger stabil und insgesamt weniger häufig sichtbar waren. Die Ergebnisse werden hinsichtlich dieser Besonderheit und der hohen Komplexität bei der AR-Nutzung diskutiert, weitere Forschung und der Einsatz interaktiver AR in der Praxis werden empfohlen.

Active Integration of Representations in Interactive Augmented Reality Applications. Considering Cognitive Load and Learning Success

Abstract
Augmented reality (AR) offers many possibilities to interact with learning materials. It is important to use these in a targeted way in order not to overload learners, but still stimulate relevant information processing and learning processes. Assigning different

This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License
http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

Krüger, Jule M. , Franziska Schacht, und Daniel Bodemer. 2023. «Aktives Integrieren von Repräsentationen bei interaktiven Augmented Reality-Anwendungen. Betrachtung von kognitiver Belastung und Lernerfolg». *MedienPädagogik* 51 (AR/VR - Part 2): 373–401. https://doi.org/10.21240/mpaed/51/2023.01.25.X.

forms of representations externally by oneself (active integration) can stimulate relevant organisational and integration processes and is here transferred to an AR learning application that links virtual and real components. In an experimental comparison to a pre-integrated version (N = 94), variables on cognitive load, task load and learning success are recorded. The hypotheses that Active Integration leads to higher Germane Cognitive Load and better learning success were not confirmed and the descriptive data even showed an opposite difference. Most of the other hypotheses were also rejected, as no significant differences were found. Only perceived performance was significantly higher for actively integrating learners. In the exploratory examination of screen-recordings of the learning phase, it became apparent that with active integration the virtual elements in the AR application were less stable and less frequently visible overall. The results are discussed with regard to this particularity and the high complexity of using AR. Recommendations for further research and using interactive AR in practice are given.

1. Einleitung und theoretischer Hintergrund

Augmented Reality (AR) kombiniert reale und virtuelle Elemente. Im Bereich des Lehrens und Lernens kann diese Form der Darstellung durch neue Möglichkeiten für die Gestaltung von Lernmaterial zu einer besonderen Art der Informationsvermittlung genutzt werden. Für einen zielgerichteten Einsatz müssen jedoch einige Punkte beachtet werden, z. B. die Anpassung des Materials an das entsprechende Lernziel und das zielgerichtete Design von Interaktionen zum Herbeiführen relevanter mentaler Verarbeitungsprozesse bei gleichzeitiger Reduzierung irrelevanter mentaler Prozesse.

1.1 Interaktives Lernen mit AR

AR ermöglicht durch die Kombination realer und virtueller Elemente Interaktion mit rein realen oder rein virtuellen Elementen, aber auch vermittelte Interaktion, in der virtuelle Elemente durch die Manipulation realer Elemente verändert werden können (Krüger und Bodemer 2020; Tangible Interface Metaphor; vgl. Billinghurst und Dünser 2012). Hierbei können z. B. Papiermarker Ankerpunkte für virtuelle Elemente bieten, sodass das Verschieben einer Papierkarte die Bewegung eines virtuellen Objekts auslöst. Die Interaktion mit dem Material kann in unterschiedlicher Form erfolgen und unterschiedlich aufwendig sein. Beim Herumgehen um ein virtuelles Objekt können z. B. verschiedene Perspektiven betrachtet und räumliche Beziehungen erlernt werden (Holmes, Newcombe und Shipley 2018). Dies ist trotz der Anforderung, den ganzen Körper zu bewegen, eine intuitive Interaktion von vergleichsweise geringer Komplexität. Dagegen kann z. B. der Zusammenbau virtueller Elemente oder

das Zuordnen von virtuellen und realen Objekten mit den Händen zur externen und mentalen Integration von Teilstrukturen und zur Generierung neuer Objekte führen. Diese Handlungen stellen jedoch hohe Anforderungen an die Interagierenden.

Moreno und Mayer (2007) definieren interaktive Lernumgebungen darüber, dass Lernende durch Aktionen Ereignisse auslösen können. Die Gestaltung der Interaktion soll kognitive Kapazitäten der Lernenden nicht überfordern. Dementsprechend wird in der Forschung zu multimedialem Lernen betont, dass nicht die körperliche Interaktion unmittelbar für vertiefte Lernprozesse verantwortlich ist, sondern die mentale Interaktion (Clark und Mayer 2016). Körperliche Interaktion kann demnach zwar lernförderliche mentale Prozesse anregen, aber auch lernhinderlich sein (Stull und Mayer 2007).

Körperliche Interaktion sollte also zielgerichtet eingesetzt werden, um die erwünschte mentale Auseinandersetzung mit dem Lernmaterial zu initiieren oder zu vertiefen. Dies gilt sowohl für klassische multimediale Darstellungen als auch für den spezifischen Fall von AR, welche insbesondere auf Grund der oben beschriebenen komplexen Interaktionsmöglichkeiten ein zielgerichtetes Design zur Reduzierung lernirrelevanter und Erhöhung lernrelevanter Verarbeitungsprozesse erfordert.

1.2 Kognitive Belastung beim interaktiven Lernen

Forschungsergebnisse zu schlechteren Lernerfolgen bei körperlicher Aktivität können auf Basis der Theorie der kognitiven Belastung (Cognitive Load Theory, CLT) begründet werden (u. a. Clark und Mayer 2016; Stull und Mayer 2007). Die CLT postuliert ein begrenztes Arbeitsgedächtnis und drei Arten kognitiver Belastung beim Lernen: *intrinsische kognitive Belastung* (intrinsic cognitive load, ICL), *lernrelevante kognitive Belastung* (germane cognitive load, GCL) und *extrinsische kognitive Belastung* (extraneous cognitive load, ECL; Sweller, van Merrienboer, und Paas 1998; Sweller, van Merriënboer, und Paas 2019). Die ICL bezieht sich auf die Schwierigkeit der Lernaufgabe, die ECL hängt von der Materialgestaltung ab, die nichts mit der inhaltlichen Lernaufgabe zu tun hat, und die GCL entsteht durch tiefere Verarbeitungs- und Lernprozesse. Die CLT beschreibt als Ziel der Instruktionsgestaltung, ECL zu verringern und GCL innerhalb der vorhandenen Arbeitsgedächtniskapazität durch die Aktivierung relevanter Lernprozesse zu erhöhen.

Laut der kognitiven Theorie des multimedialen Lernens (Cognitive Theory of Multimedia Learning, CTML) finden im Arbeitsgedächtnis aktive mentale Prozesse der Informationsverarbeitung statt, die die Auswahl, die Organisation in eine kohärente mentale Repräsentation, und die Integration miteinander und mit vorhandenem Vorwissen enthalten (Mayer 2020a). Hierbei wird beim «extraneous processing» (analog zur ECL) davon ausgegangen, dass diese Prozesse nicht bzw. nicht

erfolgreich ablaufen, beim «essential processing» (analog zur ICL), Auswahlprozesse ausgeführt werden, und beim «generative processing» (analog zur GCL) Organisations- und Integrationsprozesse stattfinden.

Lernmaterialien sollten demnach mit dem Ziel gestaltet sein, kognitive Organisations- und Integrationsprozesse über die Auswahlprozesse hinaus anzuregen, um vertieftes Lernen und Verstehen anzuregen. Da im Design von AR-basierten Lernanwendungen die vielfältigen Möglichkeiten der Technologie dazu verleiten, diese weitestgehend auszuschöpfen, ist der Hinweis auf die Relevanz der Anregung von vertieften Verarbeitungsprozessen durch gezieltes Instruktionsdesign besonders wichtig.

Eine weitere Unterteilung von kognitiver Belastung, die häufig im Rahmen von AR-bezogenen Studien genutzt wird (Buchner, Buntins, und Kerres 2021a; 2021b), ist die Konzeption nach Hart und Staveland (1988), die im Rahmen des NASA Task Load Index (NASA TLX) sechs globale Konstrukte der Aufgabenbelastung beschreibt. Im Vergleich zur CLT-Konzeption wird die zugrundeliegende Aufgabe stärker berücksichtigt, dies geschieht jedoch im Zusammenspiel mit individuellem Verhalten und Empfinden. Hierbei beschreiben *mentale*, *körperliche* und *zeitliche Anforderung* drei aufgabenbezogene Konstrukte (Hart und Staveland 1988). Die Anforderung ergibt sich direkt aus der Schwierigkeit der Aufgabe, wird jedoch nicht wie in der CLT in lernförderliche und lernhinderliche Anteile klassifiziert. Insbesondere die körperliche Belastung bringt hier eine zusätzliche Komponente mit ein, die für interaktive Lernsettings von Interesse sein kann. Wahrgenommene *Leistung* und *Aufwand* sind in der Konzeption als verhaltensbezogene Konstrukte enthalten, und *Frustration* als personenbezogenes Konstrukt. «Aufwand» ist eine aktive Komponente, die den erbrachten Aufwand für das Erreichen der Leistung beschreibt und mit der aktiv investierten GCL (Klepsch und Seufert 2021) einhergehen kann. Durch die NASA TLX-Konzeption können weitere Erkenntnisse über die Belastung von Lernenden beim Ausführen verschiedener Lernaufgaben erlangt werden. Krüger und Bodemer (2020) fanden positive Korrelationen von GCL mit Aufwand sowie mentalen Anforderungen, und eine positive Korrelation von ECL und Frustration. Dies zeigt mögliche Zusammenhänge zwischen den CLT- und den NASA TLX-Konstrukten, jedoch auch eine weiterführende Differenzierung zwischen verschiedenen Arten der Belastung, die mit Verarbeitungsprozessen einhergehen können.

1.3 Aktives Integrieren für vertiefte Verarbeitungsprozesse

In der CTML werden Designprinzipien zur Reduzierung nicht direkt lernrelevanter Prozesse beschrieben. Das räumliche Kontiguitätsprinzip beschreibt z. B. den Vorteil visuell-räumlich integrierter multimedialer Darstellungen von zusammengehörenden Bildern und Texten im Vergleich zur getrennten Darstellung, da hierdurch

visuelle Suchprozesse verringert und Kapazitäten im Arbeitsgedächtnis für die vertiefte Verarbeitung freigehalten werden können (Mayer 2020b). Der Split-Attention-Effekt in der CLT beschreibt dasselbe Phänomen (Ayres und Sweller 2014) und in vielen empirischen Studien wurde ein positiver Effekt auf die Lernergebnisse bei Beachtung des Prinzips festgestellt (Schroeder und Cenkci 2018). Mit AR ist dieses Prinzip spezifisch anwendbar auf die Kombination virtueller und physischer Elemente, die mithilfe von AR-Technologien in derselben visuellen Ansicht dargestellt werden können: integriert am tatsächlichen Ort des realen Objekts im dreidimensionalen Raum der «echten» Welt (Krüger und Bodemer 2022; Altmeyer et al. 2020). Thees et al. (2020) fanden z. B., dass bei einer integrierten Darstellung überblendeter Informationen mithilfe einer AR-Brille die ECL geringer war als bei einer separat auf einem Bildschirm gezeigten Darstellung, auch wenn keine Effekte auf den Lernerfolg gefunden wurden.

Die Entlastung kognitiver Kapazitäten bei Befolgen des Kontiguitätsprinzips ist jedoch kein Garant für die Nutzung freier Kapazitäten zur vertieften kognitiven Verarbeitung von Inhalten. Bodemer et al. (2004) schlugen aus diesem Grund vor, Aufgaben zum Aktiven Integrieren unterschiedlicher Repräsentationsformen in Lernmaterialien einzubetten, um mentale Prozesse der Organisation und Integration anzuregen und zu vertiefen: Lernende sollen dabei durch schrittweise physisch-interaktive Zuordnung einander entsprechender Elemente und Strukturen eine integrierte Gesamtdarstellung erreichen. Auf diese Weise sollen Lernende bei der mentalen Kohärenzbildung unterstützt und soll einer zu oberflächlichen mentalen Verarbeitung, die bei bereits vorintegriertem Material auftreten kann, oder einer zu hohen kognitiven Belastung durch nicht integriertes Material entgegengewirkt werden. In einer Reihe von Studien zeigten sich lernbezogene Vorteile durch Aktives Integrieren im Vergleich zu vorintegrierten und nicht integrierten Darstellungen. Dabei unterstützt Aktives Integrieren insbesondere das Verständnis von Zusammenhängen, die durch unterschiedliche Repräsentationsformen vermittelt werden (z. B. Bodemer et al. 2004), und von komplexen Inhaltsbereichen (z. B. Bodemer et al. 2005; Florax und Ploetzner 2010). In Bezug auf die mediale Komplexität des Lernmaterials zeigen sich dagegen Vorteile, wenn die Lernenden das Material zunächst statisch integrieren und dann erst dynamisch und interaktiv nutzen (z. B. Bodemer et al. 2004, 2005).

Das Vorgehen beim Aktiven Integrieren entspricht dem Ziel der in Abschnitt 1.1 vorgestellten Anregung mentaler Aktivitäten durch zielgerichtete körperliche Aktivitäten und soll die in Abschnitt 1.2 beschriebenen Organisations- und Integrationsprozesse (GCL) anregen, während durch die resultierende integrierte Darstellung nicht lernrelevante Prozesse (ECL) geringgehalten werden sollen. In der aktuellen Studie soll das Konzept des Aktiven Integrierens in einer AR-basierten Lernumgebung umgesetzt werden, um die Übertragbarkeit der bisher gefundenen Ergebnisse

auf komplexe, realitätsüberbrückende Visualisierungen zu prüfen. In der AR-Umgebung sollen hierbei physische Elemente (hier: Textkarten) und virtuelle Elemente (hier: animierte virtuelle Modelle) miteinander verknüpft werden. Im Vergleich zu rein virtuellen Umgebungen ist eine natürliche, intuitive Interaktion zur externen Zuordnung physischer Elemente möglich, die die mentale Zuordnung auslösen und unterstützen soll. Im Vergleich zu rein physischen Umgebungen ist eine dreidimensionale, dynamische Darstellung virtueller Modelle möglich, die das Verständnis textuell beschriebener Prozesse unterstützen soll. Um eine Übertragung der beschriebenen theoretischen Annahmen und Ergebnisse zu überprüfen, soll die Forschungsfrage beantwortet werden:

> Führt Aktives Integrieren in einer AR-Umgebung mit realen und virtuellen Elementen zu lernförderlicherer kognitiver Belastung und Arbeitsbelastung und besseren Lernergebnissen als eine vorintegrierte Darstellung?

Zusätzlich zur Messung verschiedener Arten von Lernerfolg in den vorgestellten Studien zum Aktiven Integrieren sollen in der aktuellen Studie zur genaueren Beschreibung der erwarteten Effekte auch kognitive Belastung und Arbeitsbelastung erfasst werden. Hierzu sollen die in Abschnitt 1.4 vorgestellten Hypothesen überprüft werden.

1.4 Hypothesen

Die in Abschnitt 1.3 vorgestellten theoretischen Überlegungen und empirischen Befunde zum Aktiven Integrieren beim Lernen mit multimedialem Lernmaterial beschreiben Vorteile gegenüber vorintegriertem Material in Bezug auf die Unterstützung mentaler Organisations- und Integrationsprozesse und damit einhergehend einen höheren Lernerfolg. Entsprechend gehen wir auch bei AR-Material, das physische und virtuelle Objekte verknüpft und unterschiedliche, teilweise ungewohnte Interaktionsformen erfordert, von verbesserter mentaler Organisation und Integration und somit einer erhöhten GCL im Vergleich zu einer vorintegrierten Darstellung aus (H1a). Bei zunächst getrennter Darstellung der Materialien und erhöhter körperlicher Belastung durch Aktives Integrieren, wird ausserdem eine im Vergleich zur integrierten Darstellung erhöhte ECL erwartet (H1b), die jedoch durch das Aktive Integrieren über die Zeit verringert werden und insgesamt gering genug sein sollte, um keinen negativen Einfluss auf das Lernergebnis zu haben. Da die Lerninhalte gleich sind und von gleichem Vorwissen ausgegangen wird, vermuten wir eine gleich hohe ICL bei vorintegriertem und aktiv integriertem Material (H1c).

Hypothesenblock 1: Beim Lernen mit AR-Material führt Aktives Integrieren im Unterschied zu vorintegriertem Material zu

(a) höherer GCL.
(b) höherer ECL.
(c) gleich hoher ICL.

Auch in Bezug auf die sechs Konstrukte zur Aufgabenbelastung (NASA TLX) wird auf Basis der theoretischen Überlegungen von einer insgesamt höheren Belastung beim Aktiven Integrieren im Vergleich zu vorintegriertem Material aufgrund zusätzlich erforderlicher mentaler (H2a) und körperlicher (H2b) Prozesse ausgegangen. Die mentale Anforderung ergibt sich hierbei aus der mentalen, die körperliche Anforderung aus der externen Integration der Elemente. Durch die explizite Tätigkeit bei gleichbleibender Lernzeit wird auch eine Erhöhung der zeitlichen Anforderung erwartet (H2c), jedoch auch eine erhöht wahrgenommene Leistung (H2d). Durch die nötige mentale Integration und die Möglichkeit, bei einer Zuordnung länger überlegen zu müssen, werden auch der wahrgenommene investierte Aufwand (H2e) und die Frustration (H2f) beim Aktiven Integrieren höher erwartet.

Hypothesenblock 2: Beim Lernen mit AR-Material führt Aktives Integrieren im Unterschied zu vorintegriertem Material zu

(a) höherer mentaler Anforderung.
(b) höherer körperlicher Anforderung.
(c) höherer zeitlicher Anforderung.
(d) höherer selbsteingeschätzter Leistung.
(e) höherem wahrgenommenem investiertem Aufwand.
(f) höherer Frustration.

Insgesamt wird auf Basis der theoretischen Überlegungen und der Erhöhung der mentalen Verarbeitung (einhergehend mit höherer GCL) durch Aktives Integrieren auch von einem höheren Lernerfolg im Vergleich zu einer vorintegrierten Darstellung ausgegangen, wie dies auch schon in den in Abschnitt 1.3 vorgestellten empirischen Studien gefunden wurde. Hierbei wird erwartet, dass sich durch das Integrieren der Elemente die möglicherweise lernhinderlichen Belastungen (einhergehend mit höherer ECL) über die Zeit verringern, da am Ende eine integrierte Darstellung vorhanden ist und die physische Integration die mentale Integration unterstützen soll. Daher gehen wir trotz zu Beginn erhöhter ECL von einem höheren Lernerfolg aus (H3).

Hypothese 3: Beim Lernen mit AR-Material führt Aktives Integrieren im Unterschied zu vorintegriertem Material zu höherem Lernerfolg.

2. Methode

Zur Überprüfung der Annahmen wurde in einer Laborstudie mithilfe einer Tablet-basierten AR-Anwendung ein experimentelles Zwischen-Gruppen-Design umgesetzt. Es konnten zwei Personen parallel teilnehmen. Die Verteilung in die Gruppen erfolgte grösstenteils randomisiert – mit der Einschränkung, dass bei gleichzeitiger Teilnahme die beiden Personen in gegensätzliche Gruppen eingeteilt werden mussten, da es pro Bedingung nur ein Material-Set gab.

Die Manipulation der unabhängigen Variable erfolgte durch die Variation der Aufgabenstellung und der damit verbundenen Interaktivität des Lernmaterials, das aus virtuellen, animierten 3D Modellen der Komponenten eines Gas-und-Dampf-Kombi-Kraftwerks sowie entsprechenden textuellen Kurzbeschreibungen auf Papierkarten bestand (vgl. Abschnitt 2.2.1). Während eine Gruppe die Aufgabe und die Möglichkeit hatte, das Lernmaterial physisch zu integrieren, war das Lernmaterial in der anderen Gruppe bereits vorintegriert.

Die untersuchten abhängigen Variablen in dieser Studie entsprechen den in den Hypothesen genannten: drei Variablen zur kognitiven Belastung (GCL (H1a), ECL (H1b), und ICL (H1c)), sechs Variablen zur Aufgabenbelastung (mentale Anforderung (H2a), physische Anforderung (H2b), zeitliche Anforderung (H2c), Leistung (H2d), Aufwand (H2e), Frustration (H2f)) und Lernerfolg (H3). Darüber hinaus wurden anhand von Bildschirmaufzeichnungen auch Prozessdaten zur Interaktion der Teilnehmenden mit dem Material erhoben und explorativ ausgewertet. Die Studie mit der ID psychmeth_2019_AR5_74 wurde in Übereinstimmung mit ethischen Richtlinien durchgeführt und das Protokoll wurde von der Ethikkommission der Abteilung Informatik und Angewandte Kognitionswissenschaft genehmigt (Votums-ID 1911PFSF0722).

2.1 Teilnehmende

102 Personen nahmen an der Studie teil, die grösstenteils aus dem Studiengang «Angewandte Kognitions- und Medienwissenschaft» der Universität Duisburg-Essen rekrutiert wurden. Davon wurden vier Personen auf Basis des 1.5 Interquartilsabstand-Kriteriums mit sehr kurzer (< 21.30 Minuten) oder sehr langer Bearbeitungszeit (> 37.42 Minuten) entfernt (mittlere Bearbeitungszeit: 29.72 Minuten; $SD = 3.78$). Weitere vier Personen wurden aus der Bedingung Aktiv Integrieren entfernt, da aus den Bildschirmaufnahmen ersichtlich war, dass sie die Zuordnungsaufgabe nicht ausführten. Insgesamt blieben $N = 94$ Personen im endgültigen Datenset, $n = 49$ in der vorintegrierten und $n = 45$ in der Bedingung Aktiv Integrieren.

Als Geschlecht gaben 20 Personen männlich an, 73 weiblich, und eine divers. Die Teilnehmenden waren 18 bis 44 Jahre alt ($M = 21.44$, $SD = 3.88$). 90% waren Studierende. Die Teilnehmenden gaben in einem fünfstufigen Antwortformat (1 «nie»,

2 «selten», 3 «ab und zu», 4 «häufiger», 5 «regelmässig») an, in der Vergangenheit nur selten oder noch nie allgemeine mobile AR-Anwendungen ($M = 1.63$, $SD = 0.70$; nie: 48%) und mobile AR-Lernanwendungen ($M = 1.14$, $SD = 0.35$; nie: 86%) genutzt zu haben. Auch die Wissensüberzeugung in Bezug auf das Thema Gas-und-Dampf-Kombi-Kraftwerke, abgefragt mit drei Items im Fünfpunktformat, war sehr gering ($M = 1.23$, $SD = 0.35$). In Tabelle 1 sind Mittelwerte und Standardabweichungen der Eigenschaften der Teilnehmenden beider Bedingungen angegeben, die sich in den meisten Werten sehr ähnlich sind.

		Geschlecht			**Alter**	**Wissens-überzeugung**	**Nutzung AR-Apps**	
Bedingung	***n***	**m**	**w**	**d**	***M (SD)***	***M (SD)***	**Allgemein** ***M (SD)***	**Lernen** ***M (SD)***
Aktiv Integr.	45	11	33	1	21.16 (2.43)	1.26 (0.41)	1.64 (0.68)	1.13 (0.34)
Vorintegriert	49	9	40	0	21.69 (4.85)	1.21 (0.29)	1.61 (0.73)	1.14 (0.35)

Tab. 1: Mittelwerte und Standardabweichungen ausgewählter Eigenschaften der Teilnehmenden nach Bedingung.

2.2 Material

2.2.1 Lernmaterial und Anwendung

Das Lernmaterial bestand aus einem animierten dreidimensionalen Gas-und-Dampf-Kombi-Kraftwerk, das mithilfe einer AR-Anwendung auf einem Android Tablet durch Einscannen von elf in einem Cluster zusammengeklebten AR-Markern betrachtet werden konnte (Markercluster s. Abbildung 1 und 2). Hierbei wurde pro Marker eine Komponente des Kraftwerks angezeigt (s. Abbildung 3). Die AR-Anwendung wurde mithilfe von Unity 3D, Version 2018.2.11f1 (Unity Technologies 2018), und dem Plugin Vuforia, Version 7.5 (PTC Inc. 2018), im Rahmen einer Masterarbeit (Buchholz 2018) programmiert, für diese Studie geringfügig angepasst und auf einem 10.8 Zoll Tablet genutzt (s. Abbildung 4). Sie war für beide Gruppen in den Markern und daran gekoppelten virtuellen Elementen gleich. Die Manipulation erfolgte durch die zusätzlichen Textelemente, die entweder schon an die Marker angefügt waren (vorintegrierte Darstellung, Abbildung 1 und 5), oder getrennt waren und von den Teilnehmenden selbst zugeordnet werden sollten (Aktives Integrieren, Abbildung 2 und 6). Inhaltlich waren die Texte in beiden Bedingungen gleich. Es wurde eine Tablet-basierte Umsetzung gewählt, da diese Geräte freier verfügbar sind als z. B. AR- oder VR-Brillen und somit einfacher in echten Lernsettings eingesetzt werden können.

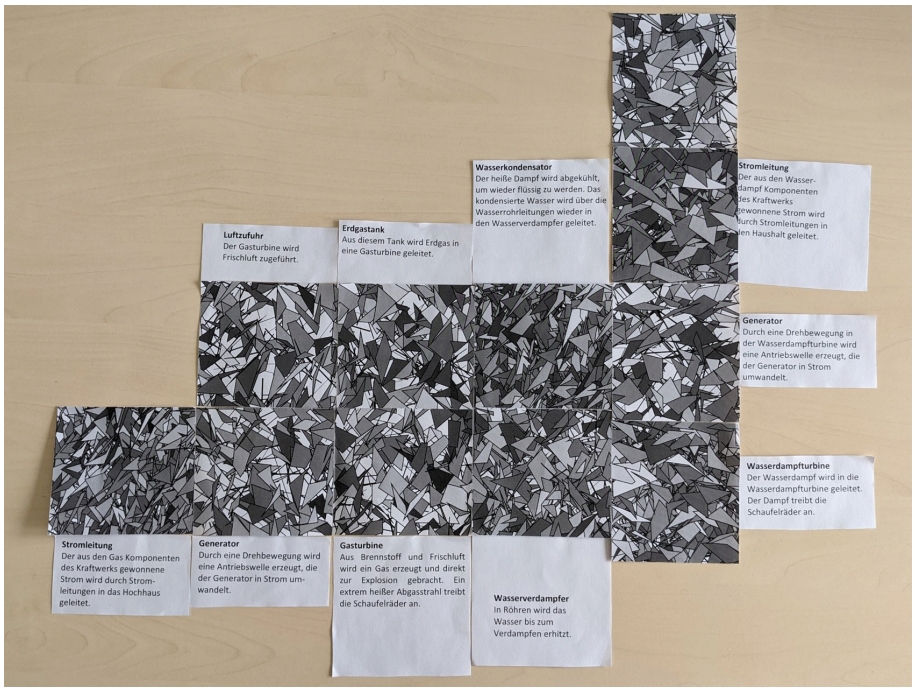

Abb. 1: Versuchsaufbau vorintegrierte Darstellung.

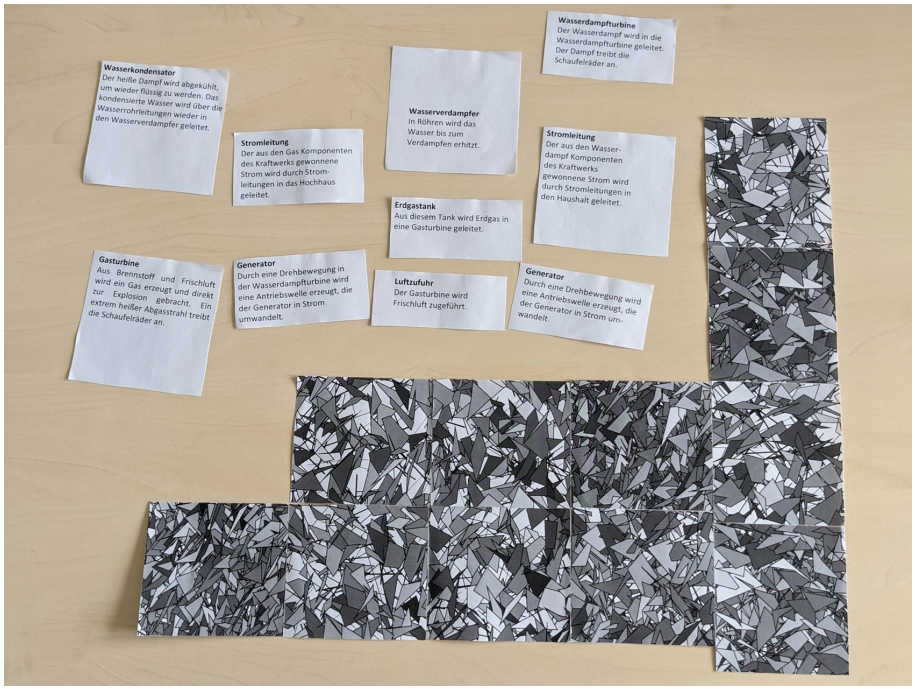

Abb. 2: Versuchsaufbau Aktives Integrieren.

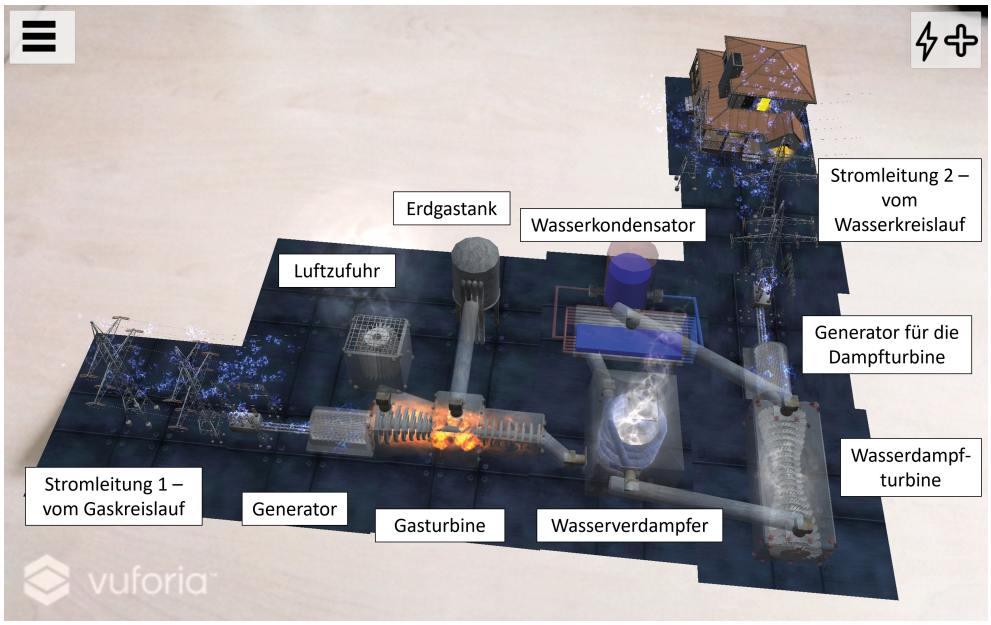

Abb. 3: Übersicht der Kraftwerkkomponenten in AR-Anwendung.

Abb. 4: Nutzung der Tablet-Anwendung.

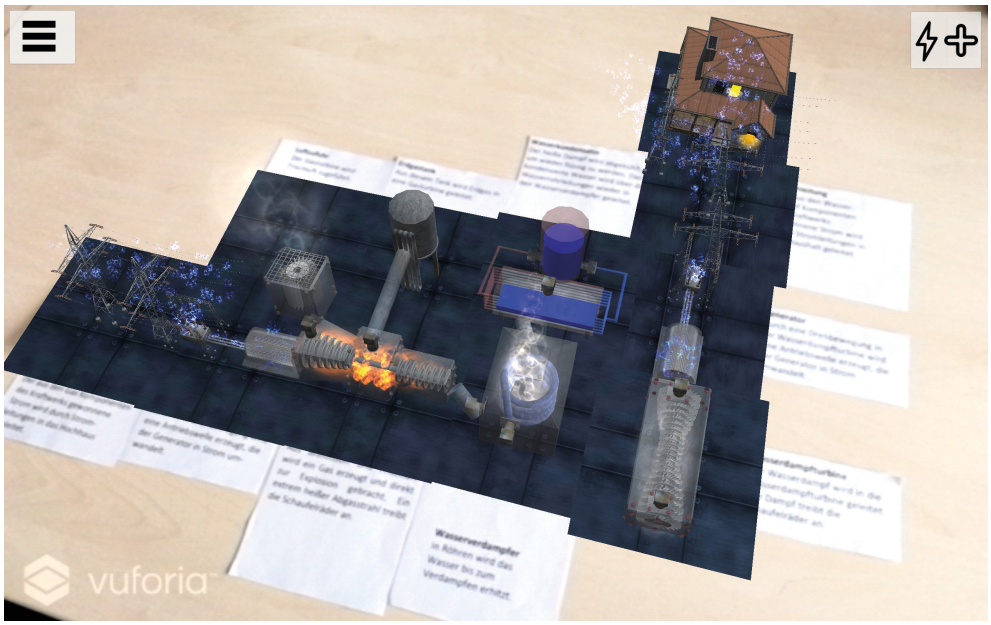

Abb. 5: Screenshot der Nutzung von vorintegriertem Material.

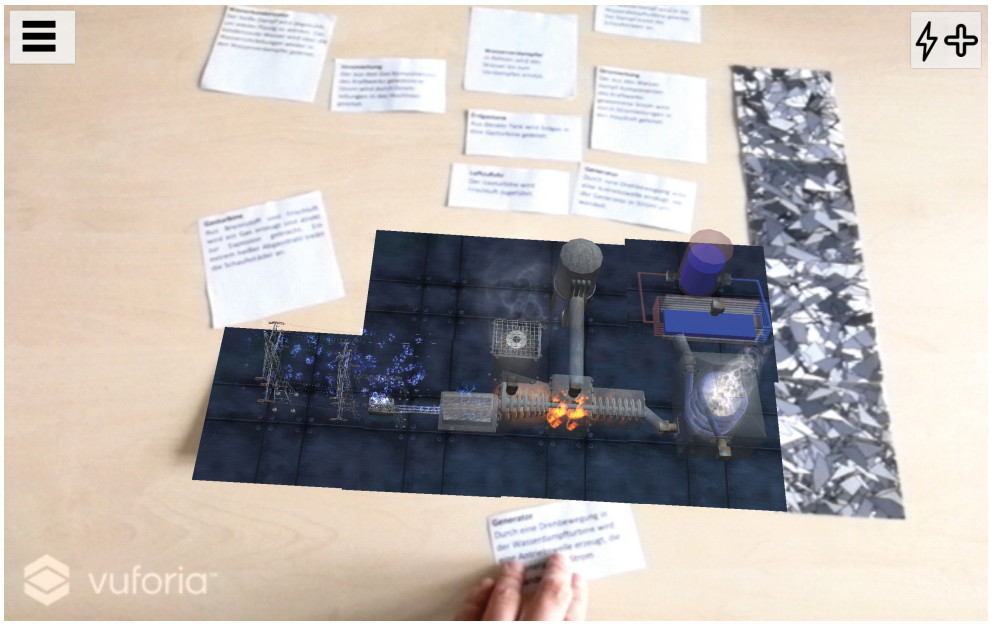

Abb. 6: Screenshot der Nutzung beim Aktiven Integrieren.

2.2.2 Fragebögen

Zur Messung der kognitiven Belastung wurde der Fragebogen von Klepsch, Schmitz und Seufert (2017) genutzt, der GCL (drei Items), ECL (drei Items) und ICL (zwei Items) siebenstufig von «Vollkommen unzutreffend» (1, niedrig) bis «Vollkommen zutreffend» (7, hoch) misst. Es wurden Mittelwerte für jede Subskala berechnet. Die in der Validierungsstudie ermittelte Faktorenstruktur bildet diese 3-Subskalen-Struktur ab (Klepsch, Schmitz, und Seufert 2017). McDonald's Omega als Mass der internen Konsistenz, das generischer verwendet werden kann als Cronbach's Alpha (Hayes und Coutts 2020), fällt in dieser Stichprobe akzeptabel für GCL ($\omega = .73$) und hoch für ECL ($\omega = .86$) und ICL ($\omega = .79$) aus, sodass der Fragebogen wie geplant genutzt werden kann.

Die Aufgabenbelastung wurde mit einer selbst ins Deutsche übersetzen Version des NASA TLX (Hart und Staveland 1988; Hart 2006) gemessen, die sechs Ein-Item-Skalen für die sechs Variablen mentale Anforderung, physische Anforderung, zeitliche Anforderung, Leistung, Aufwand und Frustration enthält. Die Items wurden in einem 21-Punkte-Antwortformat (1 – niedrig, 21 – hoch) beantwortet.

2.2.3 Wissenstest

Am Ende der Studie beantworteten die Teilnehmenden einen Wissenstest, der mehrfach im Verlauf der Studie angekündigt wurde. Er bestand aus zehn Fragen im Single-Choice-Format mit jeweils vier Antwortmöglichkeiten. Die Fragen konnten auf Basis der Texte und Visualisierungen der Lernphase beantwortet werden. Um verschiedene Bereiche und Arten von Informationen abzufragen, wurden fünf Fragen zu verschiedenen individuellen Komponenten des Kraftwerks (z. B. «Was ist die Aufgabe des Erdgastanks?») und fünf Fragen zur Verknüpfung der Prozesse mehrerer Komponenten (z. B. «Wodurch werden die Schaufelräder in den Turbinen angetrieben?») formuliert. In Anhang A1 ist der Anteil korrekter Antworten auf die einzelnen Fragen in der Stichprobe abgebildet, wobei insgesamt ein hohes Mass an korrekten Antworten erkennbar ist. Insgesamt konnten zehn Punkte erreicht werden. Der Punkteverteilung in Abbildung 7 ist zu entnehmen, dass viele der Versuchspersonen die volle Punktzahl erreicht haben.

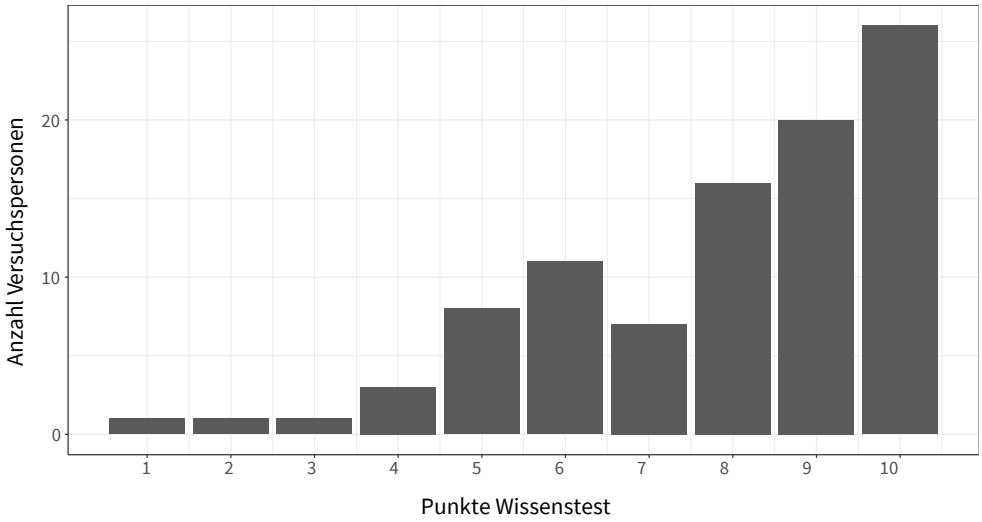

Abb. 7: Punkteverteilung im Wissenstest.

2.2.4 Prozessdaten

Zur genaueren Beobachtung der Interaktion der Teilnehmenden mit dem Material wurde während der Lernphase der Bildschirm der Tablets permanent als Video aufgenommen. Aufgrund der unerwarteten Ergebnisse wurde dieses Material nachträglich mit dem Programm BORIS (Friard und Gamba 2016) kodiert. Hierbei gab es vier Kategorien für die Sichtbarkeit der virtuellen Elemente: ein Element sichtbar, 2 bis 4 Elemente sichtbar, 5 bis 8 Elemente sichtbar und 9 bis 12 (alle) Elemente sichtbar. Es wurde der Zeitraum der Sichtbarkeit pro Kategorie festgehalten. Zusätzlich wurde die Dauer der Tablet-Nutzung für die Aufgabenerfüllung kodiert sowie Pausen, in denen das Tablet keine relevanten Objekte (d. h. die Marker) erfasste. In der Aktiv-Integrieren-Gruppe wurden ausserdem alle (sichtbaren) Platzierungen der Textkarten festgehalten, um den Zeitraum der Platzierungen zu definieren. In der Auswertung wurden von den State Events (d. h. Anzahl Elemente sichtbar, Tablet nicht genutzt) nur Events mit einer Dauer von mindestens einer Sekunde einbezogen, da kleinere Schwankungen als nicht relevant betrachtet wurden. Aufgrund technischer Probleme gibt es nur für $n = 77$ Teilnehmende Bildschirmaufnahmen, sodass alle Analysen der Beobachtungen auf Basis dieses Subsets mit $n = 37$ in der Aktiv-Integrieren- und $n = 40$ in der vorintegrierten Bedingung durchgeführt wurden.

2.3 Versuchsablauf

Nach Begrüssung, Aufklärung und Einverständniserklärung startete die Umfrage in LimeSurvey mit der Abfrage der Wissensüberzeugung. Nach einem kurzen technischen Test der Anwendung startete die Lernphase, in der die Teilnehmenden je nach Bedingung das Lernmaterial vorintegriert oder aktiv integrierend bearbeiteten (15 Minuten, ggf. mit Hinweis, die volle Zeit zu nutzen). Die Teilnehmenden wurden in beiden Bedingungen mit einem Hinweis auf den Wissenstest am Ende instruiert, die Texte aufmerksam zu lesen und sich das Kraftwerk durch das Tablet genau anzuschauen. In der Bedingung Aktiv Integrieren mussten zusätzlich die Textteile den richtigen Kraftwerksteilen zugeordnet werden. Hier wurde nach der Aufgabe die richtige Zuordnung präsentiert und abgefragt, wie viele Karten richtig platziert wurden. Im Anschluss wurden die Fragebögen zu Cognitive Load, Task Load und der Wissenstest beantwortet. Vor Debriefing und Verabschiedung wurden schliesslich die in Abschnitt 2.1 berichteten demografischen Daten abgefragt.

2.4 Datenanalyse

Die Analysen nutzen ein Signifikanzniveau von $\alpha = .05$ und Shapiro-Wilk Tests (Shapiro und Wilk 1965) zur Überprüfung der Normalverteilung (s. Anhang A2 für Ergebnisse). Bei nicht gegebener Normalverteilung (H1a, H1b, H2a, H2b, H2c, H3) wurden non-parametrische Mann-Whitney *U* Tests zum Testen von Gruppenunterschieden verwendet. Bei gegebener Normalverteilung in beiden Gruppen (H2d, H2e, H2f) wurden, wie von Delacre, Lakens und Leys (2017) vorgeschlagen, standardmässig Welch's *t*-Tests durchgeführt. Alle Tests wurden einseitig für die erwartete Richtung durchgeführt. Die Interpretationen der Effektgrösse Cohen's *d* basieren auf den Klassifikationen von Cohen (1988). Für H1c wurde eine Äquivalenztest in Form eines TOST (two one-sided *t*-Tests) (Lakens, Scheel und Isager 2018) durchgeführt. Die kleinste interessierende Effektgrösse (smallest effect size of interest, SESOI; Lakens 2014) für die Äquivalenztests wurde im Vorfeld auf eine kleine Effektgrösse von Cohen's $d = +/ 0.3$ festgelegt, musste aber auf Cohen's $d = +/ 0.42$ korrigiert werden, da dies die kleinste nachweisbare Effektgrösse mit $n = 45$ in jeder Gruppe ist (hier abgerundet auf die kleinere Gruppengrösse; berechnet mit dem Tool beschrieben in Lakens (2017)). Für Cohen's *d* werden 95% Konfidenzintervalle angegeben.

3. Ergebnisse

Die zentralen deskriptiven Ergebnisse zu den formulierten Hypothesen sind in Tabelle 2 aufgeführt, die Ergebnisse der Shapiro-Wilk Tests in Anhang A2.

Mittelwert und SD pro Bedingung [a]	**Möglicher Bereich**	**Aktiv Integrieren** *M (SD)*	**Vorintegriert** *M (SD)*
H1a: GCL	1–7	5.35 (1.21)	**5.72 (0.80)**
H1b: ECL	1–7	2.48 (1.42)	**2.50 (1.17)**
H1c: ICL	1–7	3.37 (1.30)	**3.53 (1.29)**
H2a: Mentale Anforderung	1–21	9.42 (4.15)	**9.47 (3.64)**
H2b: Körperliche Anforderung	1–21	**8.18 (5.27)**	7.31 (4.64)
H2c: Zeitliche Anforderung	1–21	**4.29 (3.32)**	3.98 (3.06)
H2d: Leistung	1–21	**15.16 (3.86)**	11.88 (4.00)
H2e: Aufwand	1–21	9.64 (4.38)	**10.08 (4.20)**
H2f: Frustration	1–21	**12.04 (5.22)**	10.88 (4.39)
H3: Wissen	0–10	7.49 (2.37)	**8.24 (1.73)**
[a] deskriptiv höherer Mittelwert jeweils **fett gedruckt**			

Tab. 2: Mittelwerte und Standardabweichungen der Kernvariablen pro Hypothese aufgeteilt nach Bedingung.

3.1 Kognitive Belastung

In H1a bis H1c wurden bei GCL und ECL jeweils höhere Werte mit Aktivem Integrieren im Vergleich zum Lernen mit vorintegriertem Material angenommen und bei der ICL gleiche Werte.

- H1a: GCL ist etwas geringer mit Aktivem Integrieren als mit vorintegriertem Material, ohne signifikanten Unterschied zwischen den Gruppen, $U = 936.50$, $p = .898$, $d = -0.37$, 95% CI [-0.78, 0.05].
- H1b: ECL ist in beiden Bedingungen sehr ähnlich und der Unterschied nicht signifikant, $U = 1041.00$, $p = .682$, $d = -0.01$, 95% CI [-0.42, 0.39].
- H1c: ICL ist mit Aktivem Integrieren etwas geringer als mit vorintegriertem Material. Die Äquivalenzgrenzen entsprechen mit Cohen's $d = +/-0.42$ den rohen Grenzen von +/ 0.54. Die Hypothese der Gleichheit wurde nicht unterstützt, 90% CI für d [-0.61, 0.28], untere Grenze, $t(91.14) = 1.42$, $p = .079$, obere Grenze, $t(91.14) = -2.65$, $p = .005$. Hierbei unterscheiden sich die Gruppen jedoch auch nicht signifikant, $U = 1029.50$, $p = .580$, $d = -0.13$, 95% CI [-0.53, 0.28].

H1a, H1b und H1c werden somit verworfen.

3.2 Aufgabenbelastung

In H2a bis H2f wurden für alle Arten von Aufgabenbelastung höhere Werte mit Aktivem Integrieren im Vergleich zum Lernen mit vorintegriertem Material angenommen.

- H2a: Mentale Anforderung ist in beiden Bedingungen ähnlich und der Unterschied nicht signifikant, $U = 1068.50$, $p = .400$, $d = -0.01$, 95% CI [-0.42, 0.39].
- H2b: Physische Anforderung ist mit Aktivem Integrieren etwas höher als mit vorintegriertem Material, jedoch ohne signifikanten Unterschied, $U = 1004.00$, $p = .228$, $d = 0.18$, 95% CI [-0.42, 0.39].
- H2c: Zeitliche Anforderung ist mit Aktivem Integrieren etwas höher als mit vorintegriertem Material, jedoch auch ohne signifikanten Unterschied, $U = 1050.50$, $p = .347$, $d = 0.10$, 95% CI [-0.31, 0.50].
- H2d: Wahrgenommene Leistung ist mit Aktivem Integrieren höher als mit vorintegriertem Material, was sich in einem signifikanten Unterschied mit grossem Effekt zeigt, $t(91.79) = 4.04$, $p < .001$, $d = 0.83$, 95% CI [0.39, 1.27].
- H2e: Wahrgenommener Aufwand ist etwas geringer mit Aktivem Integrieren als mit vorintegriertem Material, jedoch ohne signifikanten Unterschied, $t(90.53) = -0.49$, $p = .688$, $d = -0.10$, 95% CI [-0.51, 0.30].
- H2f: Frustration ist mit Aktivem Integrieren etwas höher als mit vorintegriertem Material, jedoch ebenfalls ohne signifikanten Unterschied, $t(86.32) = 1.17$, $p = .111$, $d = 0.24$, 95% CI [-0.17, 0.65].

Somit wird nur H2d angenommen. In H2b, H2c und H2f weisen die deskriptiven Werte zwar in die erwartete Richtung, sie werden jedoch auf Grund des kleinen Effekts verworfen, und H2a und H2e werden schon aus deskriptiver Sicht verworfen.

3.3 Wissen

In Hypothese H3 wird höheres resultierendes Wissen mit Aktivem Integrieren als mit vorintegriertem Material angenommen. Das gemessene Wissen ist jedoch etwas geringer mit Aktivem Integrieren als mit vorintegrierten Informationen und es zeigt sich kein signifikanter Unterschied zwischen den Gruppen, $U = 923.50$, $p = .917$, $d = -0.37$, 95% CI [-0.78, 0.05]. H3 wird somit verworfen. Die Ergebnisse der Teilkategorien (Wissen zu einzelnen Komponenten und Verknüpfendes Wissen) zeigten dasselbe Muster wie die Gesamtauswertung des Wissenstests.

3.4 Beobachtungsdaten

Um die unerwarteten Ergebnisse der Hypothesentestungen zu erklären und Besonderheiten in der Interaktion mit der AR-Anwendung zu beschreiben, analysierten wir weitergehend die Interaktionen der Teilnehmenden auf Basis von Bildschirmaufnahmen des Tablets während der Lernphase. Allgemein kann festgehalten werden, dass Teilnehmende sehr unterschiedliche Vorgehensweisen zeigten, welche wir hier kurz zusammenfassen. Einige Personen betrachteten den Text auf den physischen Textkarten durch das Kamerabild des Tablets, andere hielten das Tablet zeitweise in andere Richtungen oder legten es weg. Mehrere Personen unterbrachen die Nutzung, aber einige nutzten das Tablet durchgängig. Nur wenige Personen drehten das Markercluster, jedoch betrachteten einige durch Positionswechsel das Kraftwerk von verschiedenen Seiten. Während manche Teilnehmende sich die Komponenten zuerst einzeln anschauten, versuchten andere, direkt das Gesamtbild des Kraftwerks zu sehen. An manchen Stellen konnten Vergleichsbewegungen z. B. zwischen den beiden Generatoren beobachtet werden. Beim Aktiven Integrieren legten mehrere Teilnehmende zu Beginn die Textkarten auf die Marker statt daneben, sodass die virtuellen Elemente meist nicht mehr abrufbar waren. Viele merkten dies jedoch und nahmen die Textkarten spätestens nach vollständiger Zuordnung von den Markern herunter, legten sie daneben und schauten sich die virtuellen Elemente nochmals an.

3.4.1 Tablet-Nutzung und Sichtbarkeit

Eine Besonderheit der AR-Umsetzung beim Aktiven Integrieren ist die Verknüpfung virtueller und physischer Elemente. In der aktuellen Studie sollten physische Textkarten virtuellen Modellen zugeordnet werden. Die Anzeige der virtuellen Elemente kann hierbei unterbrochen werden, wenn das Tablet das Tracking eines Markers verliert oder ein Marker aus dem Kamerabild verschwindet. Zudem kann das neue Einscannen von Markern einen ständigen Wechsel der Ansicht bedeuten. Hier muss also, insbesondere wenn die Interaktion noch unbekannt ist, mehr Aufwand aufgebracht werden, um die bildlichen Elemente zu betrachten, als bei rein virtuellen oder rein physischen Elementzusammenstellungen. Beim Aktiven Integrieren gab es hierdurch zwei Formen der externen Manipulation, (1) Halten und Koordinieren des Tablets und (2) Zuordnen der Textkarten. Hierdurch kann sich die Ansicht häufiger ändern oder unterbrechen, wenn das Tablet mehr hin- und hergeschwenkt wird. In der Videoauswertung wurden zur Überprüfung dieser Annahmen verschiedene Kategorien von Sichtbarkeit kodiert (s. Abschnitt 2.2.4 Prozessdaten). In Anhang A3 sind deskriptive Werte und Ergebnisse der Unterschiedstests zu allen Variablen aufgeführt. Im nächsten Absatz beschreiben wir zentrale Ergebnisse.

Wir führten fünf zweiseitige Unterschiedstestungen durch, um die Annahme zu testen, dass beim Aktiven Integrieren häufiger Ansichtsunterbrechungen oder -änderungen der virtuellen Elemente vorkommen. Zur Häufigkeit der Änderung der Ansicht fanden wir insgesamt mehr kodierte Sichtbarkeitsevents beim Aktiven Integrieren ($M = 63.65$, $SD = 22.54$) als der vorintegrierten Bedingung ($M = 53.40$, $SD = 25.07$). Dieser Unterschied war jedoch nicht signifikant, $t(74.94) = 1.89$, $p = .063$, $d = 0.43$, 95% CI [-0.03, 0.88]. Bei genauerer Betrachtung fand sich ein signifikanter Unterschied in der Anzahl der Events nur in der Kategorie «1 Element sichtbar» ($M_{AI} = 12.16$, $SD_{AI} = 8.27$; $M_{I} = 7.78$, $SD_{I} = 6.29$), $U = 497.00$, $p = .013$, d = 0.60, 95% CI [0.13, 1.06]. Zur mittleren Länge aller Sichtbarkeitsevents fanden wir signifikant längere Eventphasen in der vorintegrierten Bedingung ($M_{AI} = 39.18$, $SD_{AI} = 19.87$; $M_{I} = 53.57$, $SD_{I} = 31.57$), $U = 524.00$, $p = .027$, $d = -0.54$, 95% CI [-1.00, -0.07]. Teilnehmende wechselten beim Aktiven Integrieren also häufiger zwischen Ansichten und blieben im Mittel kürzer in stabilen Ansichten.

Die Anzahl der Events, in denen das Tablet nicht auf relevante Elemente gerichtet oder ganz weggelegt war ($M_{AI} = 1.97$, $SD_{AI} = 2.25$; $M_{I} = 0.90$, $SD_{I} = 1.86$), $U = 468.50$, $p = .003$, $d = 0.52$, 95% CI [0.05, 0.98], und auch die Gesamtdauer der Unterbrechungen ($M_{AI} = 83.55$, $SD_{AI} = 119.52$; $M_{I} = 43.26$, $SD_{I} = 96.03$), $U = 516.00$, $p = .016$, $d = 0.37$, 95% CI [-0.08, 0.83] war beim Aktiven Integrieren signifikant grösser. Dies wurde auch durch die signifikant kürzere Gesamtdauer der Elementsichtbarkeit beim Aktiven Integrieren unterstützt ($M_{AI} = 679.13$, $SD_{AI} = 177.21$; $M_{I} = 773.06$, $SD_{I} = 218.52$), $U = 420.00$, $p < .001$, $d = -0.47$, 95% CI [-0.93, -0.01]. Teilnehmende richteten beim Aktiven Integrieren also das Tablet häufiger und insgesamt länger von den relevanten Elementen weg und betrachteten also die AR-basierten virtuellen Elemente für einen kürzeren Zeitraum als bei der vorintegrierten Ansicht.

3.4.2 Ausführung Aufgabe zum Aktiven Integrieren

Zur Analyse des Vorgehens beim Aktiven Integrieren wurden die Zeitpunkte der Platzierung der Textkarten und somit die Zuordnung der Texte festgehalten ($n = 37$). Auch hier gab es sehr grosse Unterschiede zwischen den Personen in der zeitlichen Abfolge (z. B. zuerst Textkarten platzieren, dann Kraftwerk genauer betrachten, oder andersherum) und der Länge des Zeitraums in dem die Textkarten platziert wurden. Die Ergebnisse sind in Tabelle 3 zusammengefasst. Hier sehen wir z. B. Unterschiede in Bezug auf die Zeit zwischen Start der Betrachtung und der Fertigstellung aller Platzierungen (zwischen 01:28 und 14:49). Zur Korrektheit der Platzierungen konnten nur n = 36 Aufnahmen ausgewertet werden. Bei 10 möglichen korrekten Antworten erhielten 33% die volle Punktzahl und 31% 8 Punkte, wobei hier häufig z. B. die beiden Stromleitungen oder Generatoren vertauscht waren. In

einer Korrelationsanalyse des Zusammenhangs der korrekten Zuordnung und des Lernerfolgs entdeckten wir einen signifikanten positiven, starken Zusammenhang, Kendall's Tau $B = 0.39$, $p = .003$.

Mittelwert und SD[a]	*M (SD)*	*Min*	*Max*	*IQR*
Dauer: Start Betrachtung → erste Platzierung	87.59 (42.85)	15.17	219.50	**27.33**
Dauer: Start Betrachtung → letzte Platzierung	506.32 (197.27)	87.77	888.60	**297.37**
Dauer: erste → letzte Platzierung	418.73 (193.05)	58.27	796.10	**302.50**
Dauer: letzte Platzierung → Ende Betrachtung	316.78 (199.59)	21.10	692.42	**293.27**
Anzahl Platzierungen	9.62 (3.71)	2	**20**	3
Korrektheit Platzierungen	8.00 (1.96)	2	**10**	3

Tab. 3: Beschreibung der Beobachtungsdaten zum Aktiven Integrieren (n = 37; bei Korrektheit n = 36), Dauer in Sekunden.

4. Diskussion

Ziel der in diesem Artikel vorgestellten Studie war es, eine Aufgabe zum Aktiven Integrieren physischer und virtueller Repräsentationen in einer AR-Umgebung umzusetzen und ihre Auswirkungen auf Lernprozesse und Lernergebnisse im Vergleich zur Präsentation vorintegrierter Informationen einzuschätzen. Dafür wurden Hypothesen zur Auswirkung auf kognitive Belastung und Lernerfolg formuliert und überprüft sowie explorativ Beobachtungsdaten analysiert, um die Interaktion mit der Anwendung besser verstehen zu können.

Die aufgestellten Hypothesen mussten bis auf H2d (wahrgenommene Leistung) alle verworfen werden. Teilweise zeigten sich deskriptiv sogar gegenläufige Ergebnisse. Sowohl die GCL (H1a) als auch der Lernerfolg (H3) waren beim Aktiven Integrieren hypothesenwidrig nicht höher und deskriptiv sogar geringer als im Fall der vorintegrierten Darstellung. Dies kann unter anderem auf den AR-spezifischen Aufbau in Kombination mit der Aufgabe des Aktiven Integrierens zurückgeführt werden, die zu Schwierigkeiten der Koordination der beiden externen Aufgaben Tabletkoordination und Textkartenplatzierung führten. Diese Schwierigkeiten schlugen sich zwar nicht in ECL (H1b) oder mentalen Anforderungen (H2a) nieder, jedoch wurde deskriptiv die körperliche Anforderung beim Aktiven Integrieren höher bewertet (H2b). Auch die Einschätzung der zeitlichen Anforderung (H2c), des Aufwands (H2e) und der Frustration (H2f) waren deskriptiv beim Aktiven Integrieren etwas höher, was einen weiteren Hinweis auf Erschwerung durch zusätzliche Aufgaben geben könnte. Die Unterschiede waren jedoch sehr gering und nicht signifikant, sodass eine Überprüfung in weiteren Studien vorgenommen werden muss. Die einzige Hypothese, die angenommen wurde, ist H2d zur wahrgenommenen Leistung. Da die Teilnehmenden beim Aktiven Integrieren eine feste Aufgabe hatten, in der sie gut

oder schlecht abschneiden konnten, konnten sie besser die eigene Leistung einschätzen als die Teilnehmenden mit vorintegrierter Ansicht, die sich lediglich mit dem Lernmaterial beschäftigen sollten.

Im Unterschied zu den Ergebnissen von Bodemer et al. (z. B. 2005, 2004) sowie Florax und Ploetzner (2010) wurden keine Vorteile des Aktiven Integrierens gegenüber einem vorintegrierten Format in Bezug auf den Lernerfolg gefunden. Dies kann z. B. mit der Natur der AR-Anwendung und dem zusätzlichen Aufwand zusammenhängen, den die Betrachtung der virtuellen Elemente auf Markern durch das Tablet mit sich bringt. In den Beobachtungsdaten zeigte sich, dass Lernende beim Aktiven Integrieren die virtuellen Objekte weniger lange betrachteten, was dem erwarteten kognitiven Vorteil der Aufgabe entgegengewirkt haben könnte. Ausserdem hatten sie durchschnittlich kürzere stabile Abschnitte ohne Veränderung der Anzahl sichtbarer virtueller Objekte, sodass der Aufbau einer mentalen Repräsentation des gesamten Kraftwerks vermutlich erschwert wurde. In Studien, in denen sich positive Auswirkungen durch Aktives Integrieren gezeigt haben (z. B. Bodemer et al. 2004, 2005; Florax und Ploetzner 2010), gab es zusätzlich zum Aktiven Integrieren des statischen Materials eine weiterführende, komplexere Aufgabe mit dynamisch-interaktivem Material, die auf Basis des erlangten grundlegenden Wissens ausgeführt wurde. In der aktuellen Studie fand nur *eine* Lernphase statt, die die direkte Verarbeitung des dynamischen Lernmaterials und zusätzliche Interaktionen erforderte. Die Komplexität der Aufgabe war somit direkt erhöht und das erworbene Wissen konnte anschliessend nicht mit zunehmender Komplexität weiter genutzt werden. Dies könnte in zukünftigen Studien genutzt werden um zu betrachten, ob das grundlegende Wissen über ein Objekt, das durch Aktives Integrieren mit AR-Unterstützung erlangt wurde, in Aufgaben mit ansteigender Komplexität erweitert werden kann.

4.1 Limitationen

In der Studie gibt es mehrere Limitationen, die bei der Interpretation der Ergebnisse beachtet werden sollten. Eine Limitation der Ergebnisse bezieht sich auf den Wissenstest, der grösstenteils Wissen abfragte, das zwar Aufbau und Funktionen des Kraftwerks betraf, jedoch in den meisten Fällen bereits durch die Informationstexte erlangt werden konnte. Die räumliche Integration half bei der Beantwortung einiger Zusammenhangsfragen, jedoch gab es keine Fragen, die bildliche Elemente aus den virtuellen Modellen aufgriffen. Thees et al. (2022) fanden in einem Vergleich von separaten und durch AR integrierten Darstellungen virtueller und physischer Elemente einen Vorteil der separaten Darstellung für den Lernerfolg. Als mögliche Erklärung nannten die Autor:innen die Relevanz der in der separaten Darstellung einfacheren lokalen Integration textueller Informationen im Vergleich zur globalen Integration textueller und bildlicher Informationen (für «local coherence formation»

und «global coherence formation» s. Seufert und Brünken 2006, 2004). Auch in der aktuellen Studie war für die Beantwortung des Wissenstests nur die lokale Integration innerhalb der textuellen Repräsentationsform notwendig, nicht die globale Integration bildlicher und textueller Repräsentationsformen, die durch das Aktive Integrieren unterstützt werden sollte. In weiteren Studien sollte ein Wissenstest eingesetzt werden, der auch die Integration der bildlichen und textuellen Materialien abfragt. Im Lernmaterial der aktuellen Studie waren die bildlichen Inhalte hauptsächlich für die Veranschaulichung der textuell beschriebenen Prozesse in den Kraftwerkskomponenten relevant, sodass diese keine essenziellen zusätzlichen Informationen vermittelt haben, die hätten abgefragt werden können. Auch dies sollte bei zukünftigen Studien im Lernmaterial bedacht werden.

Eine weitere Limitation stellt der Umgang mit der AR-Anwendung dar. Die Teilnehmenden mussten gleichzeitig Text und Bild integrieren und die Marker mit dem Tablet erfassen, um die virtuelle Repräsentation zu sehen. Dies kann zu unerwarteten Wechselwirkungen der verschiedenen Formen der Interaktion geführt haben, die hier jedoch nicht weiter überprüft werden konnten. In zukünftigen Studien sollte darauf geachtet werden, dass das Material leichter nutzbar ist, z. B. durch eine Technologie wie AR-Brillen, bei denen die Person die Hände für die Interaktion zur externen Integration frei hat. Dabei muss jedoch beachtet werden, dass AR-Brillen noch nicht weitreichend verfügbar sind und somit Umsetzungen in echten Lernsettings vorerst mit Tablets erfolgen müssten.

4.2 Implikationen und Fazit

Trotz der Limitationen haben die hier vorgestellten Ergebnisse verschiedene Implikationen für Theorie und Praxis. Einerseits unterstützen sie die Annahme, dass nicht alle körperlichen Interaktionen mit Lernmaterial unmittelbar zu Lernerfolg führen (vgl. Stull und Mayer 2007; Clark und Mayer 2016). Es gab einen klaren Zusammenhang zwischen der Korrektheit der Zuordnung und dem Ergebnis im Wissenstest, bei dem der Kausalzusammenhang jedoch auf Basis der aktuellen Studie nicht eindeutig definiert werden kann. Einerseits könnten Personen bei der Zuordnung einen Lernzuwachs gehabt haben, der bei korrekten Annahmen zum besseren Ergebnis im Wissenstest führte. Andererseits könnte ein grundlegendes Wissen zum Thema sowohl zur korrekten Zuordnung als auch zum guten Ergebnis im Wissenstest geführt haben. In der aktuellen Studie gab es zwar eine subjektive Einschätzung zum Vorwissen der Personen, jedoch keinen Vorwissenstest oder eine Einleitung zum Thema, die das Vorwissen den Teilnehmenden hätte angleichen können. Dies sollte in zukünftigen Studien beachtet werden.

Ob die Ergebnisse in dieser Studie speziell auf die AR-Umsetzung oder auf das allgemeine Instruktionsdesign dieses Lernsettings zurückzuführen sind, ist nicht abschliessend zu beurteilen. Es kann jedoch für die Umsetzung einer solchen Lernaufgabe in der Praxis festgehalten werden, dass es wichtig ist, Lernende bei der ersten Nutzung einer innovativen Technologie zu unterstützen, insbesondere bei der Koordination von Aktivitäten, die durch Nutzung der Technologie komplexer werden. In der aktuellen Studie ist deutlich erkennbar, dass die Teilnehmenden, die gleichzeitig die Tabletkoordination und Aktives Integrieren durchführten, mindestens eine der beiden Aufgaben nicht ausreichend umsetzen konnten und das Tablet weniger konsistent zur Betrachtung der virtuellen Objekte nutzten. Die Schwierigkeiten bei der Gerätekoordination würden sich vermutlich über die Zeit und mit mehr Übung reduzieren, sollten aber insbesondere beim ersten Einsatz in der Praxis beachtet werden, z. B. durch eine Phase des Bekanntmachens mit dem Gerät und der Lernumgebung.

Abschliessend kann festgestellt werden, dass Designprinzipien, die sich in klassischen multimedialen Lernumgebungen bewährt haben und typischerweise nur virtuelles Lernmaterial bereitstellen (wie hier das Prinzip des Aktiven Integrierens), sich nicht automatisch auch auf AR-Szenarien übertragen lassen, in denen physische und virtuelle Objekte verknüpft werden. Hier gilt es in Zukunft, die Unterschiede der Lernumgebungen systematisch zu differenzieren, um theoretisch und empirisch fundierte AR-spezifische Instruktionsprinzipien zu identifizieren, die Lernen bestmöglich unterstützen. Hierbei sollten nicht nur interaktive Möglichkeiten der verschiedenen Technologien in das Design einbezogen werden, sondern auch deren Notwendigkeit in Bezug auf die Anregung kognitiver Verarbeitungsprozesse. AR bietet die Möglichkeit, physische Tätigkeiten – wie das hier untersuchte Aktive Integrieren –, die die mentale Verarbeitung anregen können, in die echte Welt einzubetten. Ziel sollte es sein, in zukünftigen AR-Studien ein geeignetes Mass an Komplexität zu identifizieren, sodass lernrelevante Prozesse angeregt werden können, ohne die Lernenden zu überfordern. Dadurch kann das Potenzial von AR-basiertem Lernen, den Transfer von theoretischem Wissen auf reale angewandte Situationen und Orte zu unterstützen, noch besser zur Geltung kommen.

Literatur

Altmeyer, Kristin, Sebastian Kapp, Michael Thees, Sarah Malone, Jochen Kuhn, und Roland Brünken. 2020. «The Use of Augmented Reality to Foster Conceptual Knowledge Acquisition in STEM Laboratory Courses – Theoretical Background and Empirical Results». *British Journal of Educational Technology*, January, bjet.12900. https://doi.org/10.1111/bjet.12900.

Ayres, Paul, und John Sweller. 2014. «The split-attention principle in multimedia learning». In *The Cambridge Handbook of Multimedia Learning*, herausgegeben von Richard E. Mayer, 206–26. Cambridge: Cambridge University Press.

Billinghurst, Mark, und Andreas Dünser. 2012. «Augmented reality in the classroom». *Computer* 45 (7): 56–63. https://doi.org/10.1109/MC.2012.111.

Bodemer, Daniel, Rolf Ploetzner, Katrin Bruchmüller, und Sonja Häcker. 2005. «Supporting learning with interactive multimedia through active integration of representations». *Instructional Science* 33 (1): 73–95. https://doi.org/10.1007/s11251-004-7685-z.

Bodemer, Daniel, Rolf Ploetzner, Inge Feuerlein, und Hans Spada. 2004. «The active integration of information during learning with dynamic and interactive visualisations». *Learning and Instruction* 14 (3): 325–41. https://doi.org/10.1016/j.learninstruc.2004.06.006.

Buchholz, Alexander. 2018. «*Computersimulationen mit Augmented Reality als Lernunterstützung: Eine komparative Untersuchung von kognitiven Auswirkungen auf Lernende bei verschiedenen Darstellungs- und Interaktionsmedien*». Masterarbeit, Universität Duisburg-Essen.

Buchner, Josef, Katja Buntins, und Michael Kerres. 2021a. «The Impact of Augmented Reality on Cognitive Load and Performance: A Systematic Review». *Journal of Computer Assisted Learning.* https://doi.org/10.1111/jcal.12617.

Buchner, Josef, Katja Buntins, und Michael Kerres. 2021b. «A Systematic Map of Research Characteristics in Studies on Augmented Reality and Cognitive Load». *Computers and Education Open* 2 (Dezember): 100036. https://doi.org/10.1016/j.caeo.2021.100036.

Clark, R. C., und Richard E. Mayer. 2016. «Engagement in e-Learning». In *e-Learning and the Science of Instruction: Proven Guidelines for Consumers and Designers of Multimedia Learning*, herausgegeben von R. C. Clark und Richard E. Mayer, 4th Aufl., 219–38. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons. https://doi.org/10.1002/9781119239086.ch11.

Cohen, Jacob. 1988. *Statistical Power Analysis for the Behavioral Sciences.* 2nd ed. Hillsdale, N.J: L. Erlbaum Associates.

Delacre, Marie, Daniël Lakens, und Christophe Leys. 2017. «Why psychologists should by default use Welch's t-test instead of Student's t-test». *International Review of Social Psychology* 30 (1): 92–101. https://doi.org/10.5334/irsp.82.

Florax, Mareike, und Rolf Ploetzner. 2010. «The Influence of Presentation Format and Subject Complexity on Learning from Illustrated Texts in Biology». In *Learning in the Disciplines: Proceedings of the 9th International Conference of the Learning Sciences (ICLS 2010) - Volume 1, Full Papers*, herausgegeben von Kimberley Gomez, Leilah Lyons, und J. Radinsky, 17–24. Chicago, IL: ISLS.

Friard, Olivier, und Marco Gamba. 2016. «BORIS: A Free, Versatile Open-Source Event-Logging Software for Video/Audio Coding and Live Observations». *Methods in Ecology and Evolution* 7 (11): 1325–30. https://doi.org/10.1111/2041-210X.12584.

Hart, Sandra G. 2006. «Nasa-Task Load Index (NASA-TLX); 20 Years Later». *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting* 50 (9): 904–8. https://doi.org/10.1177/154193120605000909.

Hart, Sandra G., und Lowell E. Staveland. 1988. «Development of NASA-TLX (Task Load Index): Results of Empirical and Theoretical Research». *Advances in Psychology*, 52: 139–83. Elsevier. https://doi.org/10.1016/S0166-4115(08)62386-9.

Hayes, Andrew F., und Jacob J. Coutts. 2020. «Use Omega Rather than Cronbach's Alpha for Estimating Reliability. But …». *Communication Methods and Measures* 14 (1): 1–24. https://doi.org/10.1080/19312458.2020.1718629.

Holmes, Corinne A., Nora S. Newcombe, und Thomas F. Shipley. 2018. «Move to Learn: Integrating Spatial Information from Multiple Viewpoints». *Cognition* 178 (September): 7–25. https://doi.org/10.1016/j.cognition.2018.05.003.

Klepsch, Melina, Florian Schmitz, und Tina Seufert. 2017. «Development and Validation of Two Instruments Measuring Intrinsic, Extraneous, and Germane Cognitive Load». *Frontiers in Psychology* 8 (November). https://doi.org/10.3389/fpsyg.2017.01997.

Klepsch, Melina, und Tina Seufert. 2021. «Making an Effort Versus Experiencing Load». *Frontiers in Education* 6: Article 645284. https://doi.org/10.3389/feduc.2021.645284.

Krüger, Jule M., und Daniel Bodemer. 2020. «Different types of interaction with augmented reality learning material». In *6th International Conference of the Immersive Learning Research Network (iLRN)*, herausgegeben von Daphne Economou, Alexander Klippel, Heather Dodds, Anasol Peña-Rios, Mark J.W. Lee, Dennis Beck, Johanna Pirker, Andreas Dengel, Tiago M. Peres, und Jonathon Richter, 78–85. San Luis Obispo, CA: IEEE. https://doi.org/10.23919/iLRN47897.2020.9155148.

Krüger, Jule M., und Daniel Bodemer. 2022. «Application and Investigation of Multimedia Design Principles in Augmented Reality Learning Environments». *Information* 13 (2): Article 74. https://doi.org/10.3390/info13020074.

Lakens, Daniël. 2014. «Performing High-Powered Studies Efficiently with Sequential Analyses». *European Journal of Social Psychology* 44 (7): 701–10. https://doi.org/10.1002/ejsp.2023.

Lakens, Daniël. 2017. «The 20% Statistician: How a power analysis implicitly reveals the smallest effect size you care about». *The 20% Statistician* (blog). 11. Mai 2017. http://daniellakens.blogspot.com/2017/05/how-power-analysis-implicitly-reveals.html.

Lakens, Daniël, Anne M. Scheel, und Peder M. Isager. 2018. «Equivalence Testing for Psychological Research: A Tutorial». *Advances in Methods and Practices in Psychological Science* 1 (2): 259–69. https://doi.org/10.1177/2515245918770963.

Mayer, Richard E. 2020a. «2 Science of learning: Determining how multimedia learning works». In *Multimedia Learning*, 3. Aufl., 29–62. Cambridge University Press. https://doi.org/10.1017/9781316941355.004.

Mayer, Richard E. 2020b. «9 Spatial contiguity principle». In *Multimedia Learning*, 3. Aufl., 207–26. Cambridge University Press. https://doi.org/10.1017/9781316941355.012.

Moreno, Roxana, und Richard E. Mayer. 2007. «Interactive Multimodal Learning Environments». *Educational Psychology Review* 19 (3): 309–26. https://doi.org/10.1007/s10648-007-9047-2.

PTC Inc. 2018. «*Vuforia Augmented Reality SDK* (Version 7.5)».

Schroeder, Noah L., und Ada T. Cenkci. 2018. «Spatial Contiguity and Spatial Split-Attention Effects in Multimedia Learning Environments: A Meta-Analysis». *Educational Psychology Review* 30 (3): 679–701. https://doi.org/10.1007/s10648-018-9435-9.

Seufert, Tina, und Roland Brünken. 2004. «Supporting Coherence Formation in Multimedia Learning». In *Instructional Design for Effective and Enjoyable Computer-Supported Learning. Proceedings of the First Joint Meeting of the EARLI SIGs Instructional Design and Learning and Instruction with Computers*, herausgegeben von Peter Gerjets, Paul Kirschner, Jan Elen, und Richard Joiner, 138–47. Tübingen: Knowledge Media Research Center.

Seufert, Tina, und Roland Brünken. 2006. «Cognitive Load and the Format of Instructional Aids for Coherence Formation». *Applied Cognitive Psychology* 20 (3): 321–31. https://doi.org/10.1002/acp.1248.

Shapiro, S. S., und M. B. Wilk. 1965. «An analysis of variance test for normality (complete samples)». *Biometrika* 52 (3–4): 591–611. https://doi.org/10.1093/biomet/52.3-4.591.

Stull, Andrew T., und Richard E. Mayer. 2007. «Learning by Doing versus Learning by Viewing: Three Experimental Comparisons of Learner-Generated versus Author-Provided Graphic Organizers.» *Journal of Educational Psychology* 99 (4): 808–20. https://doi.org/10.1037/0022-0663.99.4.808.

Sweller, John, Jeroen J. G. van Merriënboer, und Fred G. W. C. Paas. 1998. «Cognitive Architecture and Instructional Design». *Educational Psychology Review* 10 (3): 251–96. https://doi.org/10.1023/A:1022193728205.

Sweller, John, Jeroen J. G. van Merriënboer, und Fred G. W. C. Paas. 2019. «Cognitive Architecture and Instructional Design: 20 Years Later». *Educational Psychology Review* 31 (2): 261–92. https://doi.org/10.1007/s10648-019-09465-5.

Thees, Michael, Kristin Altmeyer, Sebastian Kapp, Eva Rexigel, Fabian Beil, Pascal Klein, Sarah Malone, Roland Brünken, und Jochen Kuhn. 2022. «Augmented Reality for Presenting Real-Time Data During Students' Laboratory Work: Comparing a Head-Mounted Display With a Separate Display». *Frontiers in Psychology* 13. https://doi.org/10.3389/fpsyg.2022.804742.

Thees, Michael, Sebastian Kapp, Martin P. Strzys, Fabian Beil, Paul Lukowicz, und Jochen Kuhn. 2020. «Effects of Augmented Reality on Learning and Cognitive Load in University Physics Laboratory Courses». *Computers in Human Behavior* 108 (Juli): 106316. https://doi.org/10.1016/j.chb.2020.106316.

Unity Technologies. 2018. «*Unity* (Version 2018.2.11f1)».

Anhang

Anhang A1

Item	*M*	*SD*
I1	0.72	0.45
I2	0.90	0.30
I3	0.84	0.39
I4	0.76	0.43
I5	0.95	0.23
V1	0.88	0.32
V2	0.80	0.40
V3	0.66	0.48
V4	0.72	0.45
V5	0.65	0.48

Tab. 1: Mittelwert und Standardabweichung pro Frage im Wissenstest (Fragen zu individuellen Komponenten: I1 – I5; Fragen zu Verknüpfungen: V1 – V5).

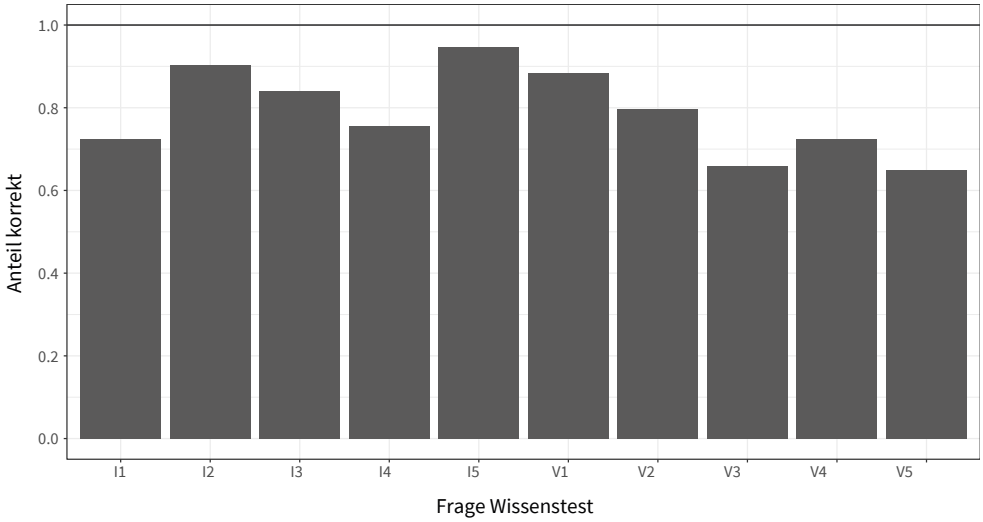

Abb. 2: Anteil korrekter Antworten pro Frage im Wissenstest (Fragen zu individuellen Komponenten: I1 – I5; Fragen zu Verknüpfungen: V1 – V5).

Anhang A2

Shapiro-Wilk Tests pro Bedingung	Aktives Integrieren	Vorintegriert
H1a: GCL	$W = 0.93$, $p = .010$	$W = 0.93$, $p = .006$
H1b: ECL	$W = 0.83$, $p < .001$	$W = 0.91$, $p = .002$
H1c: ICL	$W = 0.96$, $p = .097$	$W = 0.93$, $p = .007$
H2a: Mentale Anforderung	$W = 0.94$, $p = .015$	$W = 0.95$, $p = .057$
H2b: Körperliche Anforderung	$W = 0.91$, $p = .002$	$W = 0.92$, $p = .003$
H2c: Zeitliche Anforderung	$W = 0.87$, $p < .001$	$W = 0.85$, $p < .001$
H2d: Leistung	$W = 0.96$, $p = .085$	$W = 0.97$, $p = .229$
H2e: Aufwand	$W = 0.97$, $p = .431$	$W = 0.98$, $p = .481$
H2f: Frustration	$W = 0.97$, $p = .396$	$W = 0.97$, $p = .250$
H3: Wissen	$W = 0.89$, $p < .001$	$W = 0.86$, $p < .001$

Tab. 3: Ergebnisse des Shapiro-Wilk Tests der Kernvariablen pro Hypothese aufgeteilt nach Bedingung.

Anhang A3

Mittelwert und SD pro Bedingung [a]	Akt. Integrieren *M (SD)*	Vorintegriert *M (SD)*	Unterschiedstest		
			t / *U*	*p*	*d* [95% CI]
Tablet weggerichtet					
Anzahl Events	**1.97 (2.25)**	0.90 (1.86)	468.50	.003***	0.52 [0.05, 0.98]
Gesamtlänge	**83.55 (119.52)**	43.26 (96.03)	516.00	.016*	0.37 [-0.08, 0.83]
Mittlere Länge	**30.95 (48.43)**	20.18 (43.39)	546.00	.037*	0.23 [-0.22, 0.68]
1 Element sichtbar					
Anzahl Events	**12.16 (8.27)**	7.78 (6.29)	497.00	.013*	0.60 [0.13, 1.06]
Gesamtlänge	**64.03 (56.03)**	35.12 (36.65)	466.00	.005**	0.62 [0.14, 1.08]
Mittlere Länge	**4.74 (1.90)**	4.48 (3.56)	545.00	.047*	0.09 [-0.36, 0.54]
2–4 Elemente sichtbar					
Anzahl Events	**30.65 (10.88)**	26.85 (14.19)	1.32 (*df* = 72.56)	.190	0.30 [-0.16, 0.75]
Gesamtlänge	295.87 (97.33)	**373.10 (177.03)**	-2.40 (*df* = 61.53)	.020*	-0.53 [-1.00, -0.07]
Mittlere Länge	10.80 (4.84)	**14.91 (7.80)**	479.00	.007**	-0.63 [-1.09, -0.15]
5–8 Elemente sichtbar					
Anzahl Events	**19.46 (11.88)**	17.52 (9.01)	702.50	.706	0.18 [-0.27, 0.63]
Gesamtlänge	291.94 (163.73)	**317.24 (141.8)**	-0.72 (*df* = 71.51)	.472	-0.17 [-0.61, 0.28]
Mittlere Länge	16.83 (9.79)	**20.27 (10.98)**	579.00	.102	-0.33 [-0.78, 0.13]
9–12 Elemente sichtbar					
Anzahl Events	**1.38 (2.61)**	1.25 (2.57)	724.50	.862	0.05 [-0.40, 0.50]
Gesamtlänge	27.30 (71.20)	**47.60 (105.66)**	720.00	.821	-0.22 [-0.67, 0.23]
Mittlere Länge	6.82 (12.89)	**13.90 (23.81)**	706.00	.698	-0.37 [-0.82, 0.09]
Summe Events «Elemente sichtbar»					
Anzahl Events	**63.65 (22.54)**	53.40 (25.07)	1.89 (*df* = 74.94)	.063	0.43 [-0.03, 0.88]
Gesamtlänge	679.13 (177.21)	**773.06 (218.52)**	420.00	< .001***	-0.47 [-0.93, -0.01]
Mittlere Länge	39.18 (19.87)	**53.57 (31.57)**	524.00	.027*	-0.54 [-1.00, -0.07]
[a] Der deskriptiv höhere Mittelwert ist jeweils **fett gedruckt**					

Tab. 4: Beobachtungsdaten zur Tablet-Nutzung und Sichtbarkeit virtueller Elemente aufgeteilt nach Bedingung ($n_{AI} = 37$, $n_{I} = 40$). Gesamtlänge und mittlere Länge in Sekunden.