

Eye-Tracking-basierte Gestaltung und Evaluation von Mixed Reality Experimentierumgebungen

Dörte Sonntag*, Oliver Bodensiek*

*Abt. Physik und Physikdidaktik, Institut für Fachdidaktik der Naturwissenschaften, TU Braunschweig
doerte.sonntag@tu-braunschweig.de

Kurzfassung

Mixed Reality nimmt eine immer prominentere Rolle als Lerntechnologie in den Naturwissenschaften ein, da sie insbesondere beim Experimentieren unterstützen kann. Durch die direkte Integration von virtuellen Elementen in die reale Experimentierumgebung kann das Verständnis der Lernenden verbessert werden. Basierend auf Eye-Tracking-Daten aus einer realen Experimentierumgebung sowie ergänzenden Interviews wird das Vorgehen der Lernenden untersucht, um eine MR-Experimentierumgebung nutzerorientiert und kriteriengeleitet zu gestalten. Diese soll insbesondere Novizen derart unterstützen, dass sie Problemlösestrategien anwenden, die sonst eher von Experten angewandt werden. Der Erfolg im experimentellen Problemlösen der Probanden in der MR-Umgebung ist dabei signifikant höher als bei Probanden ohne MR und wird von einer geringeren kognitiven Belastung sowie zusätzlich bei den Novizen von signifikanten visuellen Aufmerksamkeitsverschiebungen begleitet. Weiterhin kann gezeigt werden, dass Novizen mit Unterstützung von MR im experimentellen Problemlösen deutlich strukturierter vorgehen und expertenartige Strategien verfolgen.

1. Einleitung

Mixed Reality (MR) integriert virtuelle Elemente in die reale Welt und schafft so Interaktionsmöglichkeiten mit und zwischen den beiden Welten [1]. Es bieten sich insbesondere in den Naturwissenschaften zahlreiche Möglichkeiten beispielsweise Experimentierumgebungen durch virtuelle Informationen anzureichern, sodass Lernende besser unterstützt werden. Dadurch kann unter anderem das konzeptuelle Verständnis erhöht und die kognitive Belastung reduziert werden [2–4].

Aktuelle brillenbasierte MR-Hardware bietet ein integriertes Eye-Tracking, das zur Gestaltung und Evaluation von MR-Experimentierumgebungen sinnvoll genutzt werden kann [5]. Anhand der Analyse von Eye-Tracking-Daten kann nicht nur die Expertise der Lernenden, sondern auch die Gestaltung von Lernumgebungen abgeleitet werden [6]. In der HCI-Forschung kommt die Analyse von Blickdaten häufig zum Einsatz, um die Gestaltung von virtuellen Umgebungen anschließend zu evaluieren [7].

Experimentelles Problemlösen ist von diversen Faktoren abhängig [8–10], bei denen unter anderem das Fachwissen eine wichtige Rolle spielen kann. Je nach Problemlöse-Setting variiert die Zusammensetzung der Faktoren und nicht immer sind alle involviert. Der experimentelle Problemlöseprozess läuft in unterschiedlichen Phasen ab [11–13]. Zunächst wird eine Problemrepräsentation unter Nutzung mentaler Modelle erstellt, in der die Inhalte erkannt und fachlich ausgedrückt werden. Anschließend wird ein Lösungsweg erarbeitet, dieser durchgeführt und abschließend evaluiert und reflektiert. Der Problemlöseprozess

läuft nicht zwangsweise so gradlinig ab, sondern kann auch zwischen den einzelnen Phasen springen. Zwischen Novizen und Experten treten dabei große Unterschiede im Problemlösen auf, da Experten im Gegensatz zu Novizen auf Erfahrungswissen zurückgreifen können und so Informationen effizienter verarbeiten und selektieren können [14–16]. Das schnelle Anknüpfen an vorhandenes Wissen und Abrufen von mentalen Modellen ist nur einer der vielen Vorteile, die Experten gegenüber Novizen aufweisen.

Auch die kognitive Belastung basierend auf der Cognitive Load Theory (CLT) unterscheidet sich zwischen Experten und Novizen häufig stark [17]. Die kognitive Belastung kann über Selbsteinschätzungsbögen gemessen werden [18–20], aber auch beispielsweise durch Eye-Tracking-Daten, die die Messung über einen längeren Zeitraum zulassen, verfolgt werden [21].

2. Studiendesign und Methoden

Im vorliegenden Paper soll eine kriteriengeleitete und benutzerorientierte Gestaltung von Mixed-Reality-Lernumgebungen (MRLE) aufgezeigt und evaluiert werden. Dafür werden insbesondere Eye-Tracking-Daten, Fragebögen und Interviews genutzt. Die MRLE hat das Ziel Novizen beim experimentellen Problemlösen so zu unterstützen, dass sie eher wie Experten vorgehen.

Die Probanden werden zunächst basierend auf einem Fachwissenstest in zwei Gruppen eingeteilt. Die Probanden mit höherer Punktzahl werden hier als Experten bezeichnet und die mit geringer Punktzahl als Novizen. Anschließend wird eine zweigeteilte

experimentelle Problemlöseaufgabe an einem Stromkreis (s. Abb.1) ausgeführt.

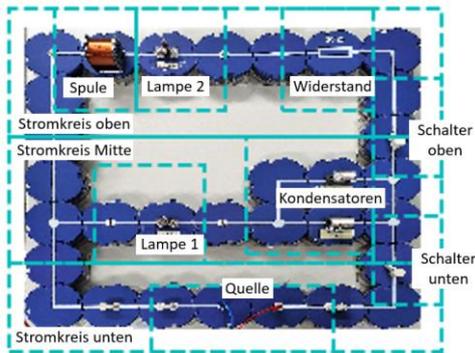


Abb.1: Stromkreis zum experimentellen Problemlösen

Im ersten Teil sollen die Probanden den aufgebauten Stromkreis verstehen und im zweiten Teil mit Hilfe zusätzlicher Bausteine (Spulen, Kondensatoren und Widerstände) so verändern, dass die Zeit zwischen dem Ausgehen der vorderen Lampe und dem Angehen der hinteren Lampe maximiert wird. Diese zwei Phasen basieren auf der Herangehensweise beim experimentellen Problemlösen. Die Probanden erhalten zusätzliche Multimeter, um Messungen der Spannung und Stromstärke durchführen zu können. Während des Experimentierens werden Blickdaten mit einem Pupil-Labs-Eye-Tracker aufgenommen, der sich wie eine Brille trägt und das Experimentieren nicht weiter beeinflusst. Nach jeder Aufgabe wird die kognitive Belastung der Probanden über drei Fragen zur Selbsteinschätzung erhoben [19, 22, 23]. Abschließend werden Interviews mit den Probanden durchgeführt, um das Vorgehen im Experiment noch einmal zu reflektieren, sowie Wünsche für die Gestaltung einer MR-Anwendung zu sammeln.

Basierend auf den Eye-Tracking- und Interviewdaten werden Unterschiede zwischen Experten und Novizen im speziellen experimentellen Problemlösen analysiert, um anschließend mit den gewonnenen Erkenntnissen sowie allgemeinen Designkriterien die MRLE zu erstellen [24].

Um die Gestaltung der MRLE zu evaluieren wird ein zweiter Durchgang mit neuen Probanden durchgeführt, die ebenfalls mit einem Fragebogen zunächst in Experten und Novizen eingeteilt werden und anschließend die zweigeteilte experimentelle

Problemlöseaufgabe mit Unterstützung der MRLE durchführen. Multimeter kommen an dieser Stelle nicht zum Einsatz, da die MR-Brille analoge Funktionen aufweist. Sowohl die Selbsteinschätzung zur kognitiven Belastung als auch die abschließenden Interviews werden analog durchgeführt. Es ergeben sich vier voneinander unabhängige Gruppen: Experten ohne MR, Novizen ohne MR, Experten mit MR und Novizen mit MR zur Evaluation der Anwendung basierend auf den Blick-, Fragebogen- und Interviewdaten.

3. Beschreibung der Stichprobe

Insgesamt haben N=89 Probanden an der Studie teilgenommen. 19 Probanden haben ohne MR experimentiert und 70 Probanden mit MR. Die genauere Aufteilung in die vier unabhängigen Gruppen ist der Tabelle 1 zu entnehmen. Die Experten unterscheiden sich von den Novizen in beiden Bedingungen signifikant im Fachwissen (s. Tab.1) und der Modellvorstellung (nicht MR: $p < .001$, $d = 1.99$, MR: $p < .011$, $d = 1.67$) mit starkem Effekt nach Cohen¹. Ein weitere Analyse bestätigt, dass sich die Novizen ohne MR nicht signifikant von den Novizen mit MR unterscheiden (Fachwissen: $p = .42$, $d = .07$, Modellvorstellung: $p = .34$, $d = .16$), gleiches gilt für die Experten mit und ohne MR (Fachwissen: $p = .17$, $d = .37$, Modellvorstellung: $p = .24$, $d = .27$). Daher können die zwei Gruppen der Experten mit und ohne MR und auch die zwei Gruppen der Novizen mit und ohne MR für die Evaluation der Gestaltung der MRLE miteinander verglichen werden.

		N	μ	σ^2	p	d
Ohne MR	Exp.	9	49.6 %	2.9 %	<.001	2.89
	Nov.	10	13.3 %	0.4%		
Mit MR	Exp.	25	43.7 %	2.4 %	<.001	2.88
	Nov.	45	12.9 %	0.5 %		

Tab.1: Einteilung der Probanden basierend auf dem Fachwissenstest. μ entspricht dem Mittelwert, σ^2 der Varianz, p der Signifikanz und d der Effektstärke nach Cohen.

4. Gestaltung der MRLE

4.1. Analyse der Blick- und Interviewdaten ohne MR

Zur Analyse der Unterschiede zwischen Experten und Novizen ohne MR, die als Grundlage für die Gestaltungsentscheidungen genutzt werden, wurden

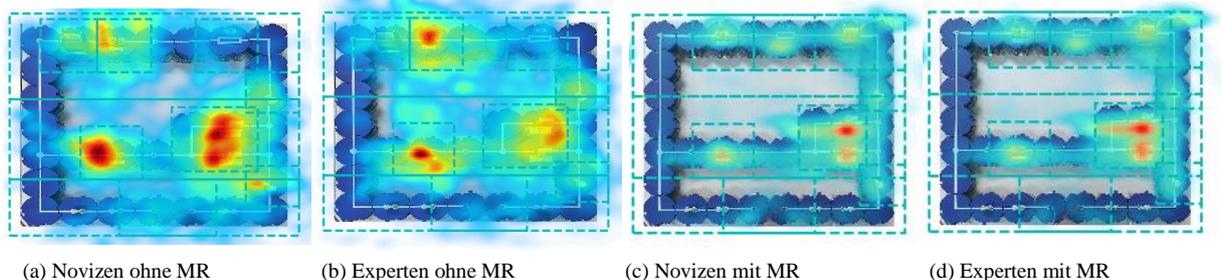


Abb.2: Heatmaps der ersten Phase „Überblick verschaffen“. Die Spule befindet sich ohne MR links und mit MR auf Grund der Messvorrichtung rechts oben im Stromkreis. Alle weiteren Elemente sind identisch angeordnet.

zunächst die Eye-Tracking-Daten genauer untersucht. In Abb.2 sind die Heatmaps der Novizen und Experten ohne MR für die erste Phase des Überblickverschaffens abgebildet. Dafür wurden die Blickdaten eines jeden Probanden über die Zeit gewichtet und anschließend über die Novizen bzw. Experten gemittelt. Während die Novizen stark auf den mittleren Stromkreis und die Kondensatoren fixiert sind, behalten die Experten eher einen globaleren Blick auf den Stromkreis. Insgesamt fallen bei den Experten mehr Blicke zwischen die Leiter, da diese häufiger zwischen Elementen wechseln, während Novizen länger einzelne Elemente fixieren.

Zur statistischen Analyse der Blickhäufigkeiten für die erste Aufgabe des Überblickverschaffens, wurden Areas of Interest (AOIs) definiert. Für jedes wichtige Element des Stromkreises (Spule, Widerstand, Kondensator) wird ein AOI definiert sowie zusätzliche größere AOIs wie oberer, mittlere und unterer Stromkreis (vgl. Abb.1). Basierend auf den AOIs können statistische Analysen durchgeführt werden, indem die Blickpunkte pro AOI jedes einzelnen Probanden gewichtet, über die Zeit aufsummiert und anschließend über alle Experten oder Novizen gemittelt werden. Eine MANOVA [25]ⁱⁱ zeigt statistisch signifikante Unterschiede zwischen der Gruppe der Experten und Novizen für die AOIs als kombinierte abhängige Variablen: $F(8,10)=3.028$, $p=.05$, partielles $\eta^2=.71$, Wilks $\Lambda=.29$. Im Post-hoc Gruppenvergleich treten signifikante Unterschiede zwischen Experten und Novizen an den Kondensatoren, der Spule und dem mittleren Stromkreis auf (vgl. Tab.2). Die Blickhäufigkeiten im oberen Stromkreis weisen eine Tendenz zur Signifikanz auf.

	M.d.Q.	df ₁	df ₂	F	p	part. η^2
Kondensatoren	.035	1	17	4.46	.05	.208
Spule	.008	1	17	6.41	.02	.274
Sk Mitte	.029	1	17	3.94	.06	.188
Sk oben	.022	1	17	2.43	.14	.125

Tab.2: Vergleich der Experten und Novizen ohne MR. MdQ steht für das Mittel der Quadrate und df₁ und df₂ sind die Freiheitsgrade der F-Statistik.

Zusätzlich wurden Blickpfade basierend auf den AOIs analysiert. Dazu wird die individuelle Blickfolge eines jeden Probanden erstellt und anschließend auf Ähnlichkeiten und wiederkehrende Muster innerhalb der Gruppen analysiert. Experten verfolgen signifikant häufiger mit starkem Effekt nach Cohen den Stromkreis entlang der Leiter ($p=.04$, $d=.85$) und haben dadurch eher einen globalen Blick auf das gesamte Experiment, während Novizen häufiger lokal an einzelnen Elementen verweilen. Weitere Analysen zeigen bei den Experten vermehrt eine Zerlegung des Stromkreises in zwei Teile.

Die Blickanalysen werden durch die Interviews gestützt. 88.9 % der Experten geben an, den Stromkreis

in zwei Funktionseinheiten zerlegt zu haben, bei den Novizen hingegen nur 25 %. 62.5 % der Novizen geben an die Funktionsweise des Kondensators nicht verstanden zu haben und sogar 87.5 % der Novizen haben die Funktionsweise der Spule nicht verstanden.

4.2. Folgerungen für die Gestaltung der MRLE

Basierend auf den Analysen der Blick- und Interviewdaten wurden Gestaltungselemente für die MRLE abgeleitet. Da die Novizen dazu neigen an den Kondensatoren lange zu verweilen, da sie die Funktionsweise basierend auf den Interviews nicht verstehen, wurde eine Ladestandanzeige integriert. Ein gelber Balken zeigt den Ladvorgang an, ähnlich einem Batteriesymbol (vgl. Abb.3). Um zusätzlich den globalen Blick auf den Stromkreis zu stärken, wird der Stromfluss durch Punkte entlang der Leiter visualisiert. Das soll auch das wiederkehrende Blickmuster der Experten entlang der Leiter imitieren. Es werden nur die Punkte in Gelb angezeigt, die sich gerade bewegen, also nur über den Leitern mit Stromfluss. Die Leiter ohne Stromfluss, abhängig von der Schalterstellung werden in einem hellen grau angezeigt (vgl. Abb.3). Da die Aufmerksamkeit der Experten an der Spule im Vergleich zu den Novizen erhöht ist, wird das Magnetfeld bei eingeschaltetem Stromfluss angezeigt. Optional werden Diagramme vom zeitlichen Spannungsverlauf oder wahlweise Stromstärkeverlauf angezeigt, um das Verständnis weiter zu stärken. Auch der Potentialverlauf kann farbige entlang der Leiter visualisiert werden. Für die zweite Aufgabe, die Veränderung des Stromkreises, wird eine Stoppuhr integriert, mit der der Fortschritt sichtbar gemacht wird. Alle Visualisierungen können optional im Menü aktiviert oder deaktiviert werden. Die MRLE ist über WLAN mit dem Stromkreis verbunden und entsprechend passen sich die Visualisierungen in MR an die aktuellen Spannungswerte im realen Experiment an [26].

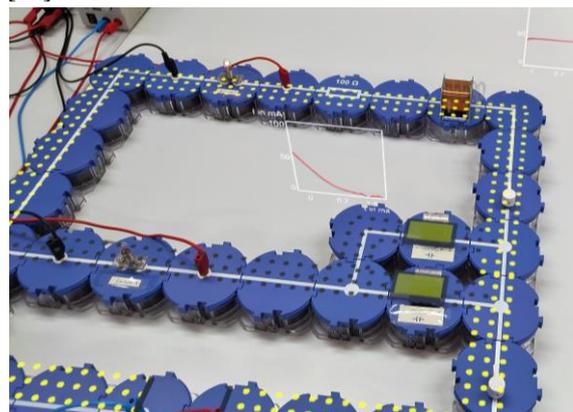


Abb.3: Mixed-Reality-Experimentierumgebung: Die Kondensatoren sind bereits geladen, daher fließt im mittleren Zweig kein Strom mehr.

5. Evaluation der MRLE

Der folgende Abschnitt konzentriert sich insbesondere auf die beiden Gruppen der Novizen mit und ohne MR, da die MRLE mit dem Ziel gestaltet wurde,

die Novizen im Problemlösen bestmöglich zu unterstützen.

5.1. Problemlöseerfolg

Der Problemlöseerfolg wird an dem von den Probanden mit den zusätzlichen Bausteinen veränderten Stromkreis gemessen. Je mehr Bauteile (Spule, Kondensator, Widerstand) in optimaler Weise verändert wurden, desto mehr Punkte gibt es, wobei pro Bauteil maximal ein Punkt vergeben wird. Der Problemlöseerfolg der Novizen mit MR ist signifikant höher als der Problemlöseerfolg der Novizen ohne MR mit starkem Effekt ($p=.005$, $d=1.48$), die Anwendung scheint die Probanden also erfolgreich zu unterstützen (vgl. Abb.4). Interessanterweise verbessern sich auch die Experten mit MR signifikant im Vergleich mit den Experten ohne MR ($p=.03$, $d=.96$).

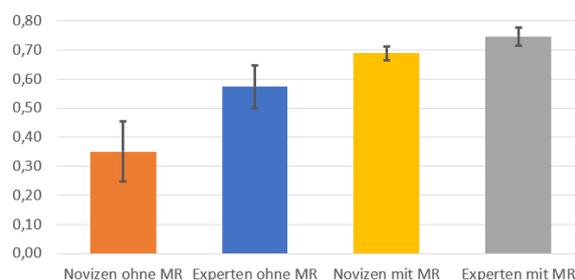


Abb.4: Problemlöseerfolg im Gruppenvergleich. Die Fehlerbalken geben den Standardfehler an.

5.2. Kognitive Belastung

Unter Nutzung der MRLE reduziert sich die kognitive Belastung der Novizen, beim Überblickverschaffen mit starker Tendenz zur Signifikanz ($p=.08$, $d=.46$) und in der zweiten Aufgabe, dem Optimieren des Stromkreises, signifikant mit starkem Effekt nach Cohen ($p=.01$, $d=.80$).

5.3. Analyse der Blick- und Interviewdaten mit MR

Während für die statistische Analyse der Blicke alle Probanden mit MR einbezogen werden, werden bei den Interviewanalysen nur jeweils 10 Novizen mit MR und 10 Experten mit MR berücksichtigt, die zufällig aus allen Probanden ausgewählt wurden.

Insgesamt tritt eine ausgewogenere Verteilung der Blickhäufigkeiten der Novizen mit MR in der ersten Aufgabe auf, die der Blickverteilung der Experten stark ähnelt (vgl. Abb.2c, 2d). Es treten vermehrt Blicke entlang der Leiter auf. Der statistische Vergleich der Blickhäufigkeiten der Novizen mit und ohne MR, zeigt mit MR eine signifikante Abnahme der Blicke auf den Kondensator und eine signifikante Zunahme der Blicke auf die Spule (vgl. Tab.3). Die Blickhäufigkeiten der Novizen mit MR haben sich dementsprechend den Blickhäufigkeiten der Experten ohne MR angenähert.

Analysen der Blickpfade zeigen zusätzlich eine deutliche Zunahme der Blicke entlang der Leiter. Weiterhin geben alle Novizen mit MR in den Interviews an, den Stromfluss zum Überblickverschaffen genutzt zu

haben. Die Funktionsweisen von Spule, Kondensator und Widerstand im Stromkreis können alle Novizen grundlegend erklären.

	MD	SEM	p
Kondensatoren	-.11	.04	.05*
Spule	.03	.01	.02*
Sk Mitte	-.18	.04	.001**
Lampe unten	-.08	.02	.01*
Lampe oben	-.09	.02	.002**

Tab.3: Vergleich der Blickhäufigkeiten der Novizen ohne und mit MR. MD bezeichnet die Mittelwertdifferenz und SEM den Standardfehler.

6. Diskussion und Ausblick

Die Gestaltung von MRLE basierend auf Eye-Tracking-Daten und Interviews stellt eine neue nutzerorientierte und kriteriengeleitete Herangehensweise dar. Der Lernende wird von Anfang an in den Fokus der Entwicklung genommen und kann so bereits in den Gestaltungsprozess von MRLE mit einbezogen werden. Insgesamt zeigt sich eine deutliche Verbesserung der Novizen und teilweise auch der Experten unter Nutzung der MRLE. Der erhöhte Problemlöseerfolg der Novizen geht mit einer reduzierten kognitiven Belastung und einer Verschiebung der visuellen Aufmerksamkeiten einher. Die Nutzung der MRLE führt bei den Novizen zu einem ausgeglicheneren und globaleren Blick auf den Stromkreis. Zusätzlich kann in den Interviews ein erhöhtes Verständnis bei den Novizen, die in der MRLE experimentiert haben, nachgewiesen werden. Diese Ergebnisse zeigen, dass das Nutzen von MRLE in Lehr-Lernkontexten vielversprechend ist, insbesondere im Bezug zu experimentbezogenen Lehr-Lernumgebungen. MRLE sollten allerdings nicht nur in Bezug auf den Lernerfolg, sondern auch im Hinblick auf Designentscheidung und Visualisierungen mit Hilfe von Eye-Tracking evaluiert werden. Die gewonnenen Ergebnisse können die Weiterentwicklung von nutzerorientierten Lernumgebungen mit Mixed Reality vorantreiben.

Zukünftige Forschung wird zeigen, ob sich eine Aufmerksamkeitsverschiebung bei den Novizen direkt auf den Problemlöseerfolg auswirkt. Die Nutzung von unterschiedlichen Arten der Blickführung in MRLE eröffnet zudem zahlreiche Möglichkeiten für innovative und vielversprechende Forschung.

7. Literatur

- [1] SPEICHER, Maximilian ; HALL, Brian D. ; NEBELING, Michael: What is Mixed Reality? In: BREWSTER, Stephen; FITZPATRICK, Geraldine; COX, Anna; KOSTAKOS, Vassilis (Hrsg.): *Proceedings of the 2019 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. New York, NY, USA : ACM, 05022019, S. 1–15
- [2] STRZYS, M. P. ; KAPP, S. ; THEES, M. ; KUHN, J. ; LUKOWICZ, P. ; KNIERIM, P. ; SCHMIDT, A.: *Augmenting the thermal flux experiment* :

- A mixed reality approach with the HoloLens.*
In: *The Physics Teacher* 55 (2017), Nr. 6, S. 376–377
- [3] SONNTAG, Dörte ; ALBUQUERQUE, Georgia ; MAGNOR, Marcus ; BODENSIEK, Oliver: *Hybrid learning environments by data-driven augmented reality.* In: *Procedia Manufacturing* 31 (2019), S. 32–37
- [4] GARZÓN, Juan ; PAVÓN, Juan ; BALDIRIS, Silvia: *Systematic review and meta-analysis of augmented reality in educational settings.* In: *Virtual Reality* 23 (2019), Nr. 4, S. 447–459
- [5] UNGUREANU, Dorin ; BOGO, Federica ; GALLIANI, Silvano ; SAMA, Pooja ; DUAN, Xin ; MEEKHOF, Casey ; STÜHMER, Jan ; CASHMAN, Thomas J. ; TEKIN, Bugra ; SCHÖNBERGER, Johannes L. ; OLSZTA, Pawel ; POLLEFEYS, Marc: *HoloLens 2 Research Mode as a Tool for Computer Vision Research.* 25.08.2020
- [6] JARODZKA, Halszka ; HOLMQVIST, Kenneth ; GRUBER, Hans: *Eye tracking in Educational Science: Theoretical frameworks and research agendas.* In: *Journal of Eye Movement Research* 10 (2017), Nr. 1
- [7] POOLE, Alex ; BALL, Linden J.: *Eye Tracking in HCI and Usability Research.* In: GHAOUL, Claude (Hrsg.): *Encyclopedia of Human Computer Interaction* : IGI Global, 2006, S. 211–219
- [8] ADAMS, Wendy K. ; WIEMAN, Carl E.: *Analyzing the many skills involved in solving complex physics problems.* In: *American Journal of Physics* 83 (2015), Nr. 5, S. 459–467
- [9] BRANDENBURGER, Martina: *Was beeinflusst den Erfolg beim Problemlösen in der Physik? : Eine Untersuchung mit Studierenden.* Dissertation : Logos Verlag Berlin GmbH, 2016 (Studien zum Physik- und Chemielernen 218)
- [10] FRIEGE, Gunnar ; LIND, Gunter: *Allgemeine und fachspezifische Problemlösekompetenz.* In: *Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften* 9 (2003), Nr. 1, S. 63–74
- [11] PÓLYA, George: *How to solve it : A new aspect of mathematical method.* Princeton, N.J. : Princeton University Press, 1945
- [12] HAMMANN, Marcus ; PHAN, Thi Thanh Ho ; BAYRHUBER, Horst: *Experimentieren als Problemlösen: Lässt sich das SDDS-Modell nutzen, um unterschiedliche Dimensionen beim Experimentieren zu messen?* In: *Zeitschrift für Erziehungswissenschaften* (2007), Nr. 8
- [13] FRIEGE, Gunnar: *Wissen und Problemlösen: eine empirische Untersuchung des wissenszentrierten Problemlösens im Gebiet der Elektrizitätslehre auf der Grundlage des ...* : Logos Verlag Berlin GmbH, 2001
- [14] ROSENGRANT, David ; THOMSON, Colin ; MZOUGH, Taha ; SABELLA, Mel ; HENDERSON, Charles ; SINGH, Chandralekha: *Comparing Experts and Novices in Solving Electrical Circuit Problems with the Help of Eye-Tracking.* In: *AIP*, 2009 (AIP Conference Proceedings), S. 249–252
- [15] CHI, Michelene T. H. ; FELTOVICH, Paul J. ; GLASER, Robert: *Categorization and Representation of Physics Problems by Experts and Novices*.* In: *Cognitive Science* 5 (1981), Nr. 2, S. 121–152
- [16] LARKIN, J. ; MCDERMOTT, J. ; SIMON, D. P. ; SIMON, H. A.: *Expert and novice performance in solving physics problems.* In: *Science* 208 (1980), Nr. 4450, S. 1335–1342
- [17] SWELLER, John: *Implications of Cognitive Load Theory for Multimedia Learning.* In: MAYER, Richard (Hrsg.): *The Cambridge Handbook of Multimedia Learning.* Cambridge : Cambridge University Press, 2005, S. 19–30
- [18] LEPPINK, Jimmie ; PAAS, Fred ; VAN DER VLEUTEN, Cees P. M. ; VAN GOG, Tamara ; VAN MERRIËNBOER, Jeroen J. G.: *Development of an instrument for measuring different types of cognitive load.* In: *Behavior research methods* 45 (2013), Nr. 4, S. 1058–1072
- [19] JAEGER, Dennis: *Kognitive Belastung und aufgabenspezifische sowie personenspezifische Einflussfaktoren beim Lösen von Physikaufgaben.* Berlin : Logos Verlag, 2019 (Studien zum Physik- und Chemielernen 276)
- [20] PAAS, Fred G.W.C. ; VAN MERRIËNBOER, Jeroen J. G.: *Instructional control of cognitive load in the training of complex cognitive tasks.* In: *Educational psychology review* 6 (1994), Nr. 4
- [21] ZAGERMANN, Johannes ; PFEIL, Ulrike ; REITERER, Harald: *Measuring Cognitive Load using Eye Tracking Technology in Visual Computing.* In: SEDLMAYER, Michael ; ISENBERG, Petra ; ISENBERG, Tobias ; MAHYAR, Narges ; LAM, Heidi (Hrsg.): *Proceedings of the Beyond Time and Errors on Novel Evaluation Methods for Visualization - BELIV '16.* New York, New York, USA : ACM Press, 2016, S. 78–85
- [22] LEPPINK, Jimmie ; PAAS, Fred ; VAN DER VLEUTEN, Cees P. M. ; VAN GOG, Tamara ; VAN MERRIËNBOER, Jeroen J. G.: *Development of an instrument for measuring different types of cognitive load.* In: *Behavior research methods* 45 (2013), Nr. 4, S. 1058–1072
- [23] LEPPINK, Jimmie ; PAAS, Fred ; VAN GOG, Tamara ; VAN DER VLEUTEN, Cees P. M. ; VAN MERRIËNBOER, Jeroen J.G.: *Effects of pairs of problems and examples on task performance*

- and different types of cognitive load*. In: *Learning and Instruction* 30 (2014), S. 32–42
- [24] SONNTAG, Dörte ; BODENSIEK, Oliver: Eye-Tracking-Based Design of Mixed Reality Learning Environments in STEM. In: GÓMEZ CHOVA, Luis; LÓPEZ MARTÍNEZ, Agustín; CANDEL TORRES, Ignacio (Hrsg.): *INTED2021 Proceedings* : IATED, 2021 (INTED Proceedings), S. 9519–9524
- [25] FRENCH, Aaron ; MACEDO, Marcelo ; POULSEN, John ; WATERSON, Tyler ; YU, Angela: *Multivariate Analysis of Variance*

ⁱ Die Effektstärke d ist hier die Effektstärke nach Cohen. Dabei bedeutet $d > .20$ ein kleiner Effekt, $d > .50$ ein mittlerer Effekt und $d > .80$ ein starker Effekt.

(*MANOVA*). Berlin/Heidelberg : Springer-Verlag, 2008

- [26] SONNTAG, Dörte ; ALBUQUERQUE, Georgia ; MAGNOR, Marcus ; BODENSIEK, Oliver: *Hybrid learning environments by data-driven augmented reality*. In: *Procedia Manufacturing* 31 (2019), S. 32–37

Danksagung

TU4Teachers II wird im Rahmen der gemeinsamen „Qualitätsoffensive Lehrerbildung“ von Bund und Ländern aus Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung gefördert.

ⁱⁱ Die Voraussetzungen zur Durchführung der MANOVA wurden überprüft und sind hinreichend erfüllt.