

Kognitive Entlastung durch Zeichenaktivitäten? Eine empirische Untersuchung im Kontext der Vektoranalysis

Um Konzepte der Vektoranalysis wie die Divergenz in physikalischen Kontexten anzuwenden, ist ein konzeptionelles Verständnis der Operatoren notwendig. Bisherige empirische Forschungsergebnisse berichten jedoch von studentischen Schwierigkeiten im Umgang mit dem Divergenzkonzept und fordern daher – in Einklang mit lerntheoretischen Erkenntnissen – den Einsatz multipler Repräsentationen. Zu diesem Zweck wurden Lehr-Lern-Materialien entwickelt, die einen visuellen Zugang zum Divergenzkonzept anhand fachdidaktischer Elementarisierungen ermöglichen. Dieser Beitrag stellt erste Ergebnisse einer Wirksamkeitsstudie ($N = 54$) vor, die den Einfluss unterstützender Zeichenaktivitäten auf die kognitive Belastung und den Lernerfolg als Zwischensubjektfaktor untersucht.

Theoretischer Hintergrund

Auf Grundlage bisheriger Forschungsergebnisse zum qualitativen Verständnis der Divergenz von Vektorfeldern betonen WissenschaftlerInnen den Einsatz (multipler) visueller Repräsentationen zur Förderung des Konzeptwissens zur Divergenz (z.B. Bollen, van Kampen, Baily, Kelly & De Cock, 2017; Klein, Viiri, Mozaffari, Dengel & Kuhn, 2018; Singh & Maries, 2013). Für die Analyse der dabei stattfindenden Lernprozesse eignen sich vor allem kognitionspsychologische Lerntheorien; so untersucht die Cognitive Theory of Multimedia Learning nach Mayer (2005) Lernprozesse im Zusammenhang mit Text (auch Formeln) und Bildern (Schnotz & Bannert, 2003) und bezieht sich dabei auf das Arbeitsgedächtnismodell nach Baddeley (1986), das verschiedene Kanäle begrenzter Kapazität postuliert. An dieser Stelle knüpft die Cognitive Load Theory an, die sich mit der kognitiven Belastung beim Wissenserwerb beschäftigt (Sweller, 2010). Sie unterscheidet dabei (1) die intrinsische kognitive Belastung des Lerngegenstands, (2) die extrinsische kognitive Belastung durch die Darstellung des Lernmaterials, und (3) die lernbezogene kognitive Belastung durch die Arbeitsgedächtnisressourcen, die Lernende dem Lerngegenstand widmen.

Die visuelle Interpretation der Divergenz von Vektorfeldern basiert auf drei sequenziell ablaufenden, mentalen Prozessen: (1) der Zerlegung einzelner Vektoren eines Vektorfelddiagramms in ihre Komponenten, (2) der Aufrechterhaltung dieser Zerlegung, und (3) der Beurteilung ihrer (Längen-)Änderung in Richtung der Basisvektoren des Koordinatensystems (Hahn & Klein, 2021). Die Veränderung einer Größe (hier: Länge der Komponente) in Abhängigkeit einer anderen (hier: kartesische x-/y-Koordinate), die sog. Kovariation, kennzeichnet dabei ein typisches Prinzip in der Physik, für dessen Beurteilung mentale Gedächtnisoperationen (Zerlegung, Aufrechterhaltung, Abgleich) essentiell sind. Diese stellen jedoch besondere Anforderungen an das visuell-räumliche Arbeitsgedächtnis und sorgen so für eine erhöhte kognitive Belastung (Baddeley 1986; Logie 1995). Bisherige Forschung in diesem Bereich zeigt, dass die Externalisierung visuell-räumlicher Informationen das Arbeitsgedächtnis entlasten kann und so eine effektive Ausführung anderer Aufgaben ermöglicht (z.B. Bilda & Gero, 2005). Ein Ansatz, der diese Externalisierung umsetzt, ist das Skizzieren visueller Hilfen, welches die visuell-räumlichen Anforderungen des spezifischen Lerngegenstands erfüllt. Es ermöglicht, mehr Aufmerksamkeit auf Details zu legen (Ainsworth & Scheiter, 2021), was hilft, Konzepte visuell zu verstehen (Wu & Rau,

2018). Im Einklang damit berichten bisherige Studien von positiven Lerneffekten beim Einsatz von Zeichenaktivitäten in (multi-)repräsentationalen Lernumgebungen (z.B. Kohnle, Ainsworth & Passante, 2020; Leopold & Leutner, 2012; Wu & Rau, 2018).

Forschungsfrage

Welchen Einfluss hat die Implementation von Zeichenaktivitäten in eine multi-repräsentationale Lehr-Lern-Umgebung zur Divergenz von Vektorfeldern auf die wahrgenommene kognitive Belastung der Studierenden während der Bearbeitung des Lehr-Lern-Materials (LLM) und beim anschließenden Problemlösen?

Material und Methoden

Die Stichprobe besteht aus 54 Physikstudierenden (B. Sc. und Lehramt) vorwiegend aus dem zweiten Fachsemester an der Georg-August-Universität Göttingen. Diese absolvierten zuerst einen Konzepttest zur Vektorkomponentenzerlegung und Divergenz, bevor sie das LLM zur visuellen Interpretation der Divergenz bearbeiteten (Abb. 1). Anschließend beantworteten sie einen mehrteiligen Posttest (Problemlösen) und einen Fragebogen zu den mentalen Anforderungen durch das LLM sowie bei der Anwendung der erlernten Strategie im Posttest. Abschließend fand ein Interview statt. Im Zuge der Bearbeitung des LLM wurde die Stichprobe in zwei gleichstarke Gruppen unterteilt, die sich darin unterschieden, dass das LLM der Interventionsgruppe (IG) Zeichenaktivitäten beinhaltet, wohingegen die Kontrollgruppe (KG) ohne Zeichenaktivitäten arbeitete. Die Gruppen wiesen keine signifikanten Unterschiede hinsichtlich ihres Vorwissens sowie verschiedener soziodemographischer Variablen auf.

Der Fragebogen zu den mentalen Anforderungen enthielt zehn Items eines etablierten Instruments zur Messung der kognitiven Belastung (Leppink, Paas, Van der Vleuten, Van Gog & Van Merriënboer, 2013) sowie elf weitere LLM-spezifische Items. Neben der Analyse der drei Arten kognitiver Belastung wurde eine explorative Faktorenanalyse auf Basis aller 21 Items durchgeführt (Kaiser-Kriterium, Varimax-Rotation). Der Vergleich der Belastungsskalen von Interventions- und Kontrollgruppe erfolgte mithilfe ungepaarter t-Tests.

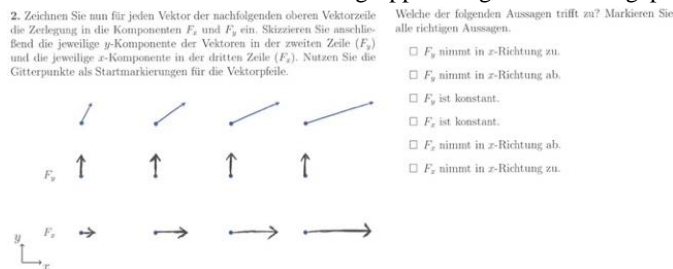
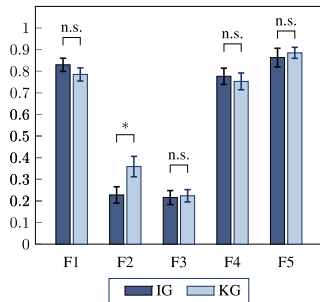


Abb. 1: Lehr-Lern-Materialien (LLM) zur Komponentenzersetzung mit Zeichenaktivitäten. Die Kontrollgruppe bearbeitete die gleiche Aufgabe ohne Zeichenaktivitäten.

Ergebnisse

Die drei Arten kognitiver Belastung (Leppink et al., 2013) unterscheiden sich nicht signifikant zwischen Interventions- und Kontrollgruppe. Beide Gruppen nehmen eine geringe intrinsische sowie extrinsische Belastung wahr (Mittelwerte < 0.25); die lernbezogene Belastung wird als hoch empfunden (0.75 ± 0.21). Darüber hinaus ergibt die explorative Faktorenanalyse (Bartlett-Test $X^2(210) = 756.79, p < 0.001; KMO = 0.74$) fünf Faktoren, die sich auf Basis einer Durchmischung der Items von Leppink et al. (2013) und LLM-spezifischen Items bilden und durch semantische Analyse inhaltlich gut interpretierbar sind ($\alpha = 0.85 - 0.91$). Abb. 2

(links) stellt die Faktoren für beide Gruppen gegenüber. Es zeigen sich gruppenunabhängige Deckeneffekte bei den Faktoren, die sich auf die (sprachliche) Qualität des LLM (F1 bzw. F5) sowie die wahrgenommene Verständnisverbesserung beziehen (F4). Zudem wird deutlich, dass die Interventions- gegenüber der Kontrollgruppe von einer signifikant geringeren mentalen Belastung durch die Ausführung der erlernten Strategie berichtet (F2; $t(66) = 2.33$, $p = 0.02$, $d = 0.57$). Die Analyse von F2 auf Itemebene (Abb. 2 rechts) ergibt Effektstärken des Gruppenunterschieds von 0.41 – 0.62 (kleine bis mittlere Effekte nach Cohen, 1988).



Items des Faktors F2:

- Item 1:** Die Anwendung der Strategie zur Beurteilung Der Divergenz war für mich sehr anstrengend.
- Item 2:** Ich fand es schwierig, mich bei zweidimensionalen Feldern auf eine Feldkomponente einzuschränken.
- Item 3:** Ich fand es anstrengend, mich auf eine Reihe bzw. Spalte zu konzentrieren, um die partielle Ableitung zu evaluieren.
- Item 4:** Ich fand es schwierig, die Veränderung von Vektorfeldkomponenten zu beurteilen.

Abb. 2: Vergleich der Faktoren wahrgenommener mentaler Belastung (links) zwischen IG und KG. F1 - Qualität des LLM; F2 - Kognitive Belastung der Strategie; F3 - Komplexität der Thematik; F4 - Verständnisverbesserung; F5 - Sprachliche Qualität des LLM (1 SEM; n.s. nicht signifikant; * signifikant $p < 0.05$). Items von F2 zur Belastung durch die Anwendung der Strategie (rechts).

Diskussion und Ausblick

Die klassischen Faktoren kognitiver Belastung nach Leppink et al. (2013) ergeben keinen signifikanten Gruppenunterschied; dieser zeigt sich erst bei Einbeziehung der LLM-spezifischen Items, wo Studierende der Interventionsgruppe, die mit Zeichenaktivitäten arbeiteten, von einer signifikant geringeren kognitiven Belastung durch spezifische Aufgabenanforderungen berichten als Studierende der Kontrollgruppe (keine Zeichenaktivitäten). Dies steht im Einklang mit bisherigen Studien zum Einsatz von Zeichenaktivitäten in (multi-)repräsentationalen Lernumgebungen, die von einem positiven Effekt des Zeichnens beim Lernen berichten (z.B. Kohnle, Ainsworth & Passante, 2020). Außerdem unterstützt dieses Ergebnis die dargelegten theoretischen Prämissen, dass das Skizzieren als Externalisierung visuell-räumlicher Informationen – in diesem Fall das Zeichnen der Komponenten eines Vektorfelddiagramms zur Beurteilung ihrer Veränderung – zur Entlastung des Arbeitsgedächtnisses im Lern- und Problemlöseprozess beitragen kann (z.B. Bilda & Gero, 2005). Mit Blick auf einzelne Items empfinden dabei Studierende der Interventions- gegenüber der Kontrollgruppe die Konzentration auf eine Spalte oder Zeile und die Beurteilung der (Längen-)Änderung als weniger anstrengend. Dies zeigt den Mehrwert des Skizzierens bei der Evaluation der Kovariation von Komponenten und Koordinaten.

Insgesamt unterstützt der gefundene Gruppenunterschied in der kognitiven Belastung den Einsatz von Zeichenaktivitäten beim Lernen mit Vektorfelddiagrammen und legt eine Anwendung bei ähnlichen vektoranalytischen Konzepten, z.B. der Rotation, nahe. Außerdem zeigt sich Potential zur Entwicklung zeichenbasierter LLM zum Kovariationsprinzip sowohl im Kontext von Vektorfeldern als auch für andere visuelle Repräsentationen in der Physik (z.B. Diagramme der Kinematik). Im Hinblick auf die vorliegende Studie werden im nächsten Schritt verschiedene Performanzkriterien (Antwortkorrektheit und -sicherheit) sowie die Verbaldaten aus den Interviews zwischen den Gruppen verglichen und untereinander trianguliert, um einen tieferen Einblick in den Einfluss der Zeichenaktivitäten zu gewinnen.

Literatur

- Ainsworth, S.E. & Scheiter, K. (2021). Learning by drawing visual representations: Potential, purposes, and practical implications. *Current Directions in Psychological Science*, 30 (1), 61–67
- Baddeley, A.D. (1986). *Working Memory*. Oxford, UK: Oxford University Press
- Bilda, Z. & Gero, J.S. (2005). Does sketching off-load visuo-spatial working memory? In J.S. Gero & N. Bonnardel (Eds.), *Studying Designers '05*. Sydney: Key Centre of Design Computing and Cognition, 145–159
- Bollen, L., Van Kampen, P., Baily, C., Kelly, M., & De Cock, M. (2017). Student difficulties regarding symbolic and graphical representations of vector fields. *Physical Review Physics Education Research*, 13 (2), 020109
- Cohen, J. (1988). *Statistical power analysis for the behavioral sciences*. Hillsdale, New Jersey: Lawrence Erlbaum Associates
- Hahn, L. & Klein, P. (2021). Multiple Repräsentationen als fachdidaktischer Zugang zum Satz von Gauß - Qualitative Zugänge zur Interpretation der Divergenz von Vektorfeldern. In J. Grebe-Ellis & H. Grötzebauch (Eds.), *PhyDid B - Didaktik der Physik - Beiträge zur DPG-Frühjahrstagung*. Fachverband Didaktik der Physik, Virtuelle DPG-Frühjahrstagung 2021, 95–100
- Klein, P., Viiri, J., Mozaffari, S., Dengel, A., & Kuhn, J. (2018). Instruction-based clinical eye-tracking study on the visual interpretation of divergence: How do students look at vector field plots? *Physical Review Physics Education Research*, 14 (1), 010116
- Kohnle, A., Ainsworth, S.E. & Passante, G. (2020). Sketching to support visual learning with interactive tutorials. *Physical Review Physics Education Research*, 16 (2), 020139
- Leopold, C. & Leutner, D. (2012). Science text comprehension: Drawing, main idea selection, and summarizing as learning strategies. *Learning and Instruction*, 22 (1), 16–26
- Leppink, J., Paas, F., Van der Vleuten, C.P., Van Gog, T., & Van Merriënboer, J.J. (2013). Development of an instrument for measuring different types of cognitive load. *Behavior Research Methods*, 45 (4), 1058–1072
- Logie, R.H. (1995). *Visuo-Spatial Working Memory*. Hove, UK: Lawrence Erlbaum
- Mayer, R.E. (2005). Cognitive theory of multimedia learning. In R.E. Mayer (Eds.), *The cambridge handbook of multimedia learning*. Cambridge: University Press, 31–48
- Schnotz, W. & Bannert, M. (2003). Construction and interference in learning from multiple representation. *Learning and Instruction*, 13 (2), 141–156
- Singh, C. & Maries, A. (2013). Core graduate courses: A missed learning opportunity? In P.V. Engelhardt, A.D. Churukian & N.S. Rebello (Eds.), *AIP Conference Proceedings, 2012 Physics Education Research Conference* (Bd. 1513, S. 382–385). Philadelphia, PA: AIP
- Sweller, J. (2010). Element interactivity and intrinsic, extraneous, and germane cognitive load. *Educational Psychology Review*, 22 (2), 123–138
- Wu, S.P. & Rau, M.A. (2018). Effectiveness and efficiency of adding drawing prompts to an interactive educational technology when learning with visual representations. *Learning and Instruction*, 55, 93–104