

Implementation multi-repräsentationaler Lernaufgaben in die Studieneingangsphase

Vor dem Hintergrund zahlreicher studentischer Schwierigkeiten bei der Anwendung vektorieller Feldkonzepte in der Physik wurden multi-repräsentationale (MR) Lernaufgaben entwickelt, die einen visuellen Zugang anhand von Vektorfelddiagrammen adressieren und unterstützende Zeichenaktivitäten sowie ein digitalgestütztes Visualisierungswerkzeug integrieren. Zur Wirksamkeitsanalyse wurden die Lernaufgaben in die begleitenden Übungen einer Elektromagnetismus-Vorlesung im zweiten Studiensemester an der Universität Göttingen implementiert. Im Vergleich mit einer Kontrollgruppe, die traditionelle, rechenbasierte Aufgaben bearbeitete, zeigten die Studierenden, die mit MR Lernaufgaben lernten, einen signifikant höheren Lernzuwachs bzgl. ihres konzeptuellen Wissens sowie ihrer Repräsentationskompetenzen im Umgang mit Vektorfeldern und Vektorfelddiagrammen.

Theoretischer Hintergrund

Studien ergaben, dass Studierende mathematische Berechnungen im Zusammenhang mit Vektorfeldern meist gut bewältigen können. Die visuelle Beurteilung von Vektorfelddiagrammen sowie der Erwerb eines konzeptuellen Verständnisses der Vektoranalysis bereitet ihnen allerdings Probleme – beides ist jedoch entscheidend für physikalische Anwendungen (z. B. Bollen et al., 2015; Singh & Maries, 2013). Angesichts dieser Befunde betonen Fachdidaktiker:innen den Einsatz (digitalgestützter) visueller Repräsentationen, um das Lernen in der Vektoranalysis zu unterstützen (z. B. Bollen et al., 2016; Klein et al., 2018; Singh & Maries, 2013). In diesem Zuge erwiesen sich multi-repräsentationale Lehr-Lern-Materialien mit Vektorfelddiagrammen als sehr lernwirksam (z. B. Klein et al., 2018, 2019).

Bei der Beurteilung von Vektorfelddiagrammen spielt die Informationsentnahme eine zentrale Rolle – konkret: Es bedarf entsprechender Repräsentationskompetenzen, wie Informationen dargestellt werden und wie diese zu interpretieren sind (Rau, 2017). Eine effektive Vorgehensweise besteht hierbei in einer Zerlegung einzelner Vektoren in ihre Komponenten und der Beurteilung der Veränderung dieser Komponenten entlang der Koordinatenrichtungen (Hahn, 2024). Lehr-Lern-Materialien mit visuellen Hilfen im Diagramm und repräsentationsspezifischen Zeichenaktivitäten, die die Ausführung dieser Strategie unterstützen, erwiesen sich daher als besonders effektiv. In Laborstudien konnten sie sowohl die visuelle Beurteilung von Vektorfelddiagrammen als auch das Konzeptwissen zur Vektoranalysis fördern (Hahn & Klein, 2023a; Klein et al., 2019).

Multi-repräsentationale (MR) Lernaufgaben zur Vektoranalysis

Mit Blick auf den dargestellten Forschungsstand wurden vier MR Lernaufgaben zur Vektoranalysis entwickelt („Divergenz“, „Satz von Gauß“, „Rotation“, „Satz von Stokes“). Diese adressieren ein visuell-konzeptuelles Verständnis der Vektoranalysis anhand von Vektorfelddiagrammen und involvieren repräsentationsspezifische Zeichenaktivitäten sowie ein digitalgestütztes Vektorfeld-Visualisierungswerkzeug (Hahn et al., 2024; Aufgabenentwicklung siehe Hahn & Klein, 2022; Hahn, 2024).

Forschungsfrage

Die Wirksamkeitsanalyse der MR Lernaufgaben adressiert folgende Forschungsfrage: Wie unterscheiden sich Studierende, die mit MR Lernaufgaben instruiert wurden, und solche, die mit traditionellen, rechenbasierten Aufgaben instruiert wurden, bezüglich der visuellen Beurteilung von Vektorfelddiagrammen und dem Konzeptwissen zur Vektoranalyse?

Wirksamkeitsanalyse

Die MR Lernaufgaben wurden in drei aufeinanderfolgenden Jahren (2022 bis 2024) in die begleitenden Übungen einer Elektromagnetismus-Vorlesung (2. Semester) an der Universität Göttingen implementiert. Die Studierenden erarbeiteten die Aufgaben im Selbststudium, anschließend wurden sie in den Übungen diskutiert. Die Wirksamkeitsanalyse erfolgte durch den Vergleich einer Interventionsgruppe (IG), die mit den MR Lernaufgaben instruiert wurde, und einer Kontrollgruppe (KG), die traditionelle, rechenbasierte Aufgaben bearbeitete. Neben der Beantwortung eines Prä- und Posttests zur Vektoranalyse vor und nach der vierwöchigen Intervention wurde die kognitive Belastung der Lernenden im Zuge der wöchentlichen Aufgabebearbeitung erfasst (siehe Hahn & Klein, 2023b, für eine Beschreibung der Studie (Präregistrierung) und Hahn, 2024, für alle Materialien und Testinstrumente).

Zur Kontrolle der Rahmenbedingungen erfolgt die Wirksamkeitsanalyse anhand einer Kernstichprobe von 81 Studierenden ($N_{IG} = 51$, $N_{KG} = 30$), die sowohl am Prä- und Posttest teilgenommen als auch die vier Lernaufgaben bearbeitet haben (Abb. 1; 29% der Prätest-Stichprobe). Die Gruppen weisen keine signifikanten Unterschiede hinsichtlich ihres Vorwissens (Abb. 2) sowie verschiedener soziodemographischer Variablen auf. Die nachfolgende statistische Analyse erfolgt exemplarisch anhand zweier Items zur Rotation von Vektorfeldern. Das erste Item adressiert dabei die visuelle Beurteilung der Rotation, bei der vor allem spezifische Repräsentationskompetenzen erforderlich sind (Bollen et al., 2015), und das zweite Item erfasst das Konzeptwissen zur Rotation von Vektorfeldern (z. B. Beurteilung der Aussage „Die Rotation gibt an, ob Feldvektoren gekrümmt sind“; Items nach Bailly et al., 2015; Bollen et al., 2018; Klein et al., 2018, 2019).

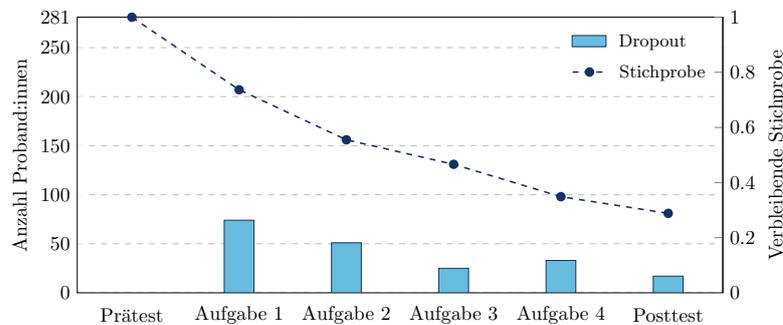


Abb. 1: Stichprobengröße (dunkelblau) und Dropout (hellblau) der Studie zu den Erhebungszeitpunkten (Prätest, Aufgabe 1 bis 4, Posttest). Auf der linken y-Achse ist die totale Anzahl Proband:innen aufgetragen, auf der rechten y-Achse die verbleibende Stichprobe.

Ergebnisse

Die Antwortkorrektheit bzgl. der visuellen Beurteilung der Rotation eines Vektorfelddiagrammes sowie dem Konzeptwissen zur Rotation von Vektorfeldern konnte durch die Intervention signifikant gesteigert werden ($t(76) = -4.99$, $p < 0.001$, Abb. 2a; $t(79) = -4.14$, $p < 0.001$, Abb. 2b). Für beide Items sind diese Effekte vor allem auf den

Lernzuwachs in der IG zurückzuführen. So konnten sich die Studierenden der IG bei der visuellen Beurteilung der Rotation zwischen Prä- und Posttest von $MW_{Prä} = 0.28$ auf $MW_{Post} = 0.63$ steigern (Abb. 2a). Dies entspricht einem mittleren normalisierten Hake-Index von $g_{H,IG} = 0.49$ (Hake, 1998); die KG erzielte im Vergleich einen Hake-Index von $g_{H,KG} = 0.07$. Damit unterscheidet sich der Score von IG und KG für dieses Item nach der Intervention signifikant ($t(79) = 2.14$, $p = 0.04$) mit kleiner Effektstärke (Cohen, 1988).

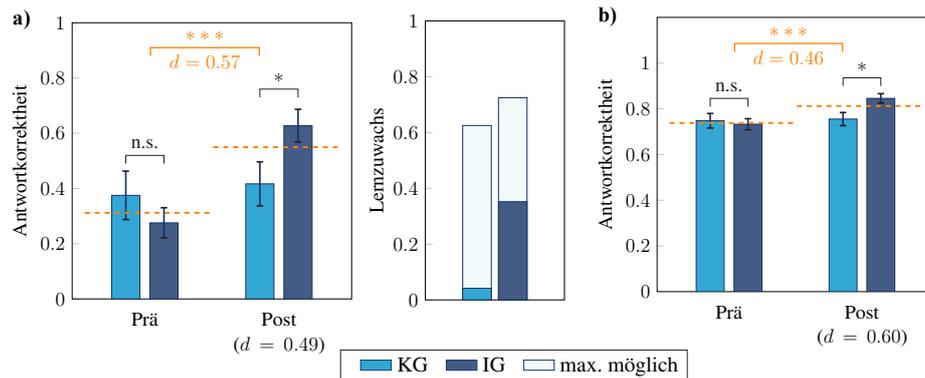


Abb. 2: Performanz bei (a) visueller Beurteilung der Rotation eines Vektorfelddiagramms und (b) Konzeptwissen zur Rotation im Vergleich von IG und KG. Der Prä-Post-Vergleich ist in orange dargestellt (1 SEM; n.s. nicht signifikant; *signifikant $p < 0.05$, Effektstärke Cohens d).

Beim Konzeptwissen zur Rotation von Vektorfeldern zeigten sich ähnliche Ergebnisse (Abb. 2b). So unterscheiden sich IG und KG nach der Intervention signifikant ($t(79) = 2.61$, $p = 0.01$) mit mittlerer Effektstärke (Cohen, 1988). Zudem erzielte die IG einen nach Hake (1998) als mittel zu klassifizierenden normalisierten Hake-Index ($g_{H,IG} = 0.42$; $g_{H,KG} = 0.03$).

Diskussion

Multi-repräsentationale Lernaufgaben zur Vektoranalysis, die Zeichenaktivitäten sowie digitalgestützte Visualisierungen involvieren, erzeugten im Rahmen einer Interventionsstudie positive Lerneffekte bei Physikstudierenden der Studieneingangsphase. Am Beispiel der Rotation von Vektorfeldern zeigte sich, dass die Lernaufgaben sowohl Repräsentationskompetenzen als auch Konzeptwissen zur Vektoranalysis fördern konnten. Dies steht im Einklang mit bisherigen Studien zum multi-repräsentationalen, zeichenbasierten und digitalgestützten Lernen (z. B. Kohnle, Ainsworth & Passante, 2020). Der normalisierte Hake-Index der IG entspricht dabei dem innovativer Lernumgebungen in vorangegangenen Studien (Coletta & Phillips, 2007; Hake, 1998).

Diese Ergebnisse bestätigen die dargelegten theoretischen Prämissen und stützen insbesondere die Befunde vorangegangener Laborstudien zum multi-repräsentationalen Lernen in der Vektoranalysis (Hahn & Klein, 2023a; Hahn, 2024; Klein et al., 2018, 2019), indem sie die Wirksamkeit eines multi-repräsentationalen Lehr-Lern-Ansatzes zur Vektoranalysis im universitären Lehralltag zeigen. Die Bildung einer Kernstichprobe erhöht hierbei die interne Validität der Ergebnisse, jedoch auf Kosten einer Minimierung der Stichprobengröße. Im Hinblick auf die vorliegende Studie wird zum Zweck einer umfassenden Wirksamkeitsanalyse im nächsten Schritt die Performanz, d. h. Antwortkorrektheit und -sicherheit, für den gesamten Vektoranalysis-Test sowie die kognitive Belastung der Studierenden im Zuge der Aufgabenbearbeitung zwischen den Gruppen verglichen.

Literatur

- Baily, C., Bollen, L., Pattie, A., van Kampen, P., & De Cock, M. (2015). Student thinking about the divergence and curl in mathematics and physics contexts. *PERC Proceedings*, 51-54.
- Bollen, L., van Kampen, P., & De Cock, M. (2015). Students' difficulties with vector calculus in electrodynamics. *Physical Review Special Topics – Physics Education Research*, 11(2), 020129.
- Bollen, L., van Kampen, P., Baily, C., & De Cock, M. (2016). Qualitative investigation into students' use of divergence and curl in electromagnetism. *Physical Review Physics Education Research*, 12(2), 020134.
- Bollen, L., van Kampen, P., & De Cock, M. (2018). Development, implementation, and assessment of a guided-inquiry teaching-learning sequence on vector calculus in electrodynamics. *Physical Review Physics Education Research*, 14(2), 020115.
- Cohen, J. (1988). *Statistical power analysis for the behavioral sciences*. Hillsdale, New Jersey: Lawrence Erlbaum Associates.
- Coletta, V. P., Phillips, J. A., & Steinert, J. J. (2007). Interpreting force concept inventory scores: Normalized gain and SAT scores. *Physical Review Special Topics – Physics Education Research*, 3(1), 010106.
- Hahn, L., & Klein, P. (2022). Vektorielle Feldkonzepte verstehen durch Zeichnen? Erste Wirksamkeitsuntersuchungen. In H. Grötzebauch & S. Heinicke (Hrsg.), *PhyDid B, Didaktik der Physik, Beiträge zur DPG-Frühjahrstagung 2022* (S. 119-126).
- Hahn, L., & Klein, P. (2023a). Analysis of eye movements to study drawing in the context of vector fields. *Frontiers in Education*, 8, 1162281.
- Hahn, L., & Klein, P. (2023b). The impact of multiple representations on students' understanding of vector field concepts: Implementation of simulations and sketching activities into lecture-based recitations in undergraduate physics. *Frontiers in Psychology*, 13, 1012787.
- Hahn, L., Blaue, S. A., & Klein, P. (2024). A research-informed graphical tool to visually approach Gauss' and Stokes' theorems in vector calculus. *European Journal of Physics*, 45(2), 025706.
- Hahn, L. (2024). *Vektorfeldkonzepte in der Studieneingangsphase Physik. Über die Wirkung multi-repräsentationaler Lehr-Lern-Materialien und die Rolle der visuellen Aufmerksamkeit*. [Dissertation, Universität Göttingen].
- Hake, R. R. (1998). Interactive-engagement versus traditional methods: a sixthousand-student survey of mechanics test data for introductory physics courses. *American Journal of Physics*, 66, 64-74.
- 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.
- Klein, P., Viiri, J., & Kuhn, J. (2019). Visual cues improve students' understanding of divergence and curl: Evidence from eye movements during reading and problem solving. *Physical Review Physics Education Research*, 15(1), 010126.
- Kohnle, A., Ainsworth, S. E., & Passante, G. (2020). Sketching to support visual learning with interactive tutorials. *Physical Review Physics Education Research*, 16(2), 020139.
- Rau, M. A. (2017). Conditions for the effectiveness of multiple visual representations in enhancing STEM learning. *Educational Psychology Review*, 29(4), 717-761.
- Singh, C., & Maries, A. (2013). Core graduate courses: A missed learning opportunity? *AIP Conference Proceedings*, 1513, 382-385.