

Wissen, wie es nicht geht: fehlerhafte Lösungsbeispiele im Fach Chemie

Theoretischer Hintergrund

Im Fach Chemie sind Fehler Teil des Lernprozesses, die durch Alltags- oder Schülervorstellungen geprägt sind. Solche Fehler finden sich bei fachlich-komplexen Konzepten, die eine Verknüpfung der makroskopischen und symbolischen Ebene erfordern und dadurch hohe Anforderungen an die Lernenden stellen. Diese hohen Anforderungen in Verbindung mit der Komplexität der Inhaltsbereiche resultieren in einer hohen Anzahl an Schülervorstellungen. Dies ist insbesondere bei dem Konzept der chemischen Bindung der Fall (Barke, 2021; Hunter et al., 2022). Bezugnehmend zum Lernen aus Fehlern konstatieren Oser et al. (1999) mit ihrer Theorie des negativen Wissens eine Lernförderlichkeit ausgehend von Fehlern, um negatives Wissen zu generieren. Dabei dienen Fehler beim Erwerb des negativen Wissens als Demonstrationsmittel, wie etwas nicht ist oder nicht funktioniert (Oser et al., 1999; Oser et al., 2012). Durch die Demonstration des Falschen wird das Richtige gefestigt und das Falsche verhindert, ohne diese Fehler selbst zu produzieren, da aus Fehlern anderer gelernt wird (Oser et al., 1999; Oser et al., 2012).

Ein möglicher Ansatz aus der Instruktionspsychologie zur Berücksichtigung von Fehlern im Lernmaterial ist die Verwendung von Lösungsbeispielen. Lösungsbeispiele sind eine Lernmethode, welche auf der Cognitive Load Theory (siehe Sweller et al., 2019) basieren, und zeichnen sich durch eine schrittweise Darstellung einer Problem- oder Aufgabenlösung aus (Ayres, 2012; Renkl, 2014). Das schrittweise Lernen mit Lösungsbeispielen sorgt für eine geringere kognitive Belastung, wodurch Lösungsbeispiele besonders für Novizen vorteilhaft sind. Im Gegensatz zu ausschließlich richtigen Lösungsbeispielen enthalten fehlerhafte Lösungsbeispiele Hinweise auf fehlerhafte Aufgaben- oder Lösungsschritte. Fehlerhafte Lösungsbeispiele wurden u.a. in der Mathematik oder der Medizin eingesetzt und erwiesen sich dort als lernförderlich (Renkl, 2014; Schworm & Renkl, 2007; van Gog & Rummel, 2010). Uneindeutig bleibt jedoch, unter welchen Bedingungen fehlerhafte Lösungsbeispiele erfolgreich eingesetzt werden, wenn Schülervorstellungen während der Instruktion antizipiert werden.

Ein eigenes systematisches Literaturreview konnte bei 25 von den insgesamt 36 inkludierten Studien zeigen, dass die Implementierung von fehlerhaften Lösungsbeispielen in Instruktionmaterialien lernförderlich ist. Dabei wird deutlich, dass zum einen fehlerhafte Lösungsbeispiele alleine (Adams et al., 2014; Chang et al., 2002; Durkin & Rittle-Johnson, 2012), aber auch die Kombination von richtigen und fehlerhaften Lösungsbeispielen (Booth et al., 2013; Corral & Carpenter, 2020; Loibl & Leuders, 2018, 2019) lernförderlich sind. Faktoren wie Vorwissen und kognitive Belastung beeinflussen dabei die Lernförderlichkeit. Hierbei sind allerdings starke Abhängigkeiten von dem zu erlernenden, domänenspezifischen Lerngegenstand in Verbindung mit der Fehlerinstruktion im Lernmaterial vorzufinden. Sowohl für das Vorwissen als auch für die kognitive Belastung liegen in der Literatur uneindeutige Ergebnisse vor. Bezüglich des Vorwissens kann hohes als auch niedriges Vorwissen beim Lernen mit fehlerhaften Lösungsbeispielen lernförderlich sein (z.B. Barbieri

& Booth, 2020; Heemsoth & Heinze, 2014). Ähnliches gilt auch für die kognitive Belastung: Erhöhung als auch Erniedrigung sind in der Literatur vorzufinden (z.B. Kopp et al., 2009; Stark et al., 2009). Des Weiteren wurde gezeigt, dass die Lernförderlichkeit stark von der Fehlerinstruktion und somit vom Instruktionsmaterial und dessen Aufgaben abhängt. Obwohl der Instruktionsansatz der fehlerhaften Lösungsbeispiele im Vergleich zu klassischen, korrekten Lösungsbeispielen vielversprechend erscheint, liegen für die komplexe Domäne der Chemie bisher keine systematischen empirischen Untersuchungen vor.

Zielsetzung

Die Zielsetzung der Studie ist es, den Einfluss einer Instruktion auf Basis von richtigen (CorrEx), fehlerhaften (ErrEx), und einer Kombination beider Lösungsbeispiele (CorrEx+ErrEx) auf den Lernzuwachs und die kognitive Belastung am Beispiel der chemischen Bindung zu untersuchen. Zudem sollen die Lernvoraussetzungen (niedriges vs. hohes Vorwissen) und die kognitiven Aufgabenformate (Reproduktion vs. Transfer) in Bezug zur Lernförderlichkeit erforscht werden. Die Studie folgt den folgenden vier Forschungsfragen:

FF1: Welche Bedingung zeigt den größten Effekt auf den Lernzuwachs?

FF2: Wie unterscheiden sich die unterschiedlichen Bedingungen in der kognitiven Belastung?

FF3: Inwiefern beeinflusst Vorwissen den Lernzuwachs in den Bedingungen?

FF4: Welche kognitiven Aufgabenformate werden durch die Bedingungen gefördert?

Methode

Die Studie wurde an drei unterschiedlichen Schulen im Ruhrgebiet mit insgesamt $N = 233$ Schüler*innen ($M_{\text{Alter}} = 14.17$ Jahre) durchgeführt. In einem klassenweise randomisierten Prä-/Post-Interventionsdesign wurden drei Bedingungen entwickelt, die entweder richtige, fehlerhafte und eine Kombination beider Lösungsbeispiele in Erklärvideos zeigten. Jede Bedingung erhielt drei Erklärvideos innerhalb von drei Interventionsstunden. Die aufeinanderfolgenden Erklärvideos folgten denselben Gestaltungsprinzipien, unterschieden sich allerdings in den jeweiligen Lerngegenständen in Bezug zum Inhaltsbereich der chemischen Bindung. Alle Bedingungen bearbeiteten den identischen Prä- und Post-Test und das identische Instruktionsmaterial. Nach der Betrachtung des Erklärvideos wurde die kognitive Belastung gemessen (Kriegelstein et al., 2023). Im Anschluss erfolgte die Bearbeitung von drei Aufgaben, welche die Erinnerungsleistung, das unmittelbare Verständnis (Reproduktion) und die Transferleistung in offenem Aufgabenformat testeten. Die eingesetzten Testinstrumente wiesen hohe Reliabilitäten auf ($\alpha(\text{Prätest}) = .81$, $\alpha(\text{Posttest}) = .89$, $\alpha_m(\text{ECL/ICL/GCL}) = .68 - .89$). Aufgrund der Datenstruktur (Schüler*innen genestet in Klassen) wurde ein mehrebenenanalytischer Ansatz bei der Analyse der Lernzuwächse verfolgt, um den Anteil der Varianz, die auf die Klasse zurückfällt, zu reduzieren. Im Falle der kognitiven Belastung wurden ANOVAs mit anschließenden Paarvergleichen und Bonferroni-Korrektur berechnet.

Ergebnisse

Die Auswertung zeigt, dass Lösungsbeispiele grundsätzlich für alle Bedingungen lernförderlich sind, da signifikante Zuwächse im Fachwissen über alle Bedingungen vorliegen ($t = 9.84$, 95 % CI [.07, .11]). Zwischen CorrEx und ErrEx ($t = -0.86$, 95 % CI [-.21, .09]) als auch der Kombination CorrEx+ErrEx ($t = 1.84$, 95 % CI [-.02, .27]) lagen jedoch keine signifikanten Unterschiede im Lernzuwachs vor. Eine Analyse der Intraklassenkorrelation

weist darauf hin, dass 34 % der Gesamtvarianz auf Schwankungen des Vorwissens zwischen Schulklassen zurückzuführen ist, weswegen die Generalisierung der Ergebnisse aufgrund der Randomisierung der Treatments auf Klassenebene limitiert werden.

Die Analysen zur kognitiven Belastung verdeutlichen signifikante Unterschiede der drei Typen der kognitiven Belastung zwischen den Bedingungen, ECL: $F(2, 221) = 9.41, p < .001$, ICL: $F(2, 221) = 24.72, p < .001$, GCL: $F(2, 221) = 6.23, p < .01$.

In Bezug auf ECL zeigen Paarvergleiche keine signifikanten Unterschiede zwischen CorrEx ($M = 3.24$) und ErrEx ($M = 3.22$), $p = 1.0$, aber zwischen CorrEx und CorrEx+ErrEx ($M = 2.6$) mit $p > .001$ und zwischen ErrEx und CorrEx+ErrEx mit $p < .001$, sodass Lernende der CorrEx+ErrEx die niedrigste extrinsische kognitive Belastung aufwiesen.

Die Kombibedingung hat ebenfalls im Vergleich zu den anderen Bedingungen die geringste intrinsische kognitive Belastung. Paarvergleiche zeigen keine signifikanten Unterschiede zwischen CorrEx ($M = 3.68$) und ErrEx ($M = 3.69$), $p = 1.0$, aber zwischen CorrEx und CorrEx+ErrEx ($M = 2.79$) mit $p < .001$ und zwischen ErrEx und CorrEx+ErrEx mit je $p < .001$.

Im Vergleich zu den anderen Bedingungen hat die Kombibedingung den höchsten Germane Cognitive Load. Paarvergleiche zeigen keine signifikanten Unterschiede zwischen CorrEx ($M = 3.88$) und ErrEx ($M = 4.01$), $p = 1.0$, aber zwischen CorrEx und CorrEx+ErrEx ($M = 4.32$) mit $p > .001$ und zwischen ErrEx und CorrEx+ErrEx mit $p > .01$.

Ausblick und Diskussion

Insgesamt profitierten Schüler*innen von Lernvideos mit Lösungsbeispielen zum Thema chemische Bindung, jedoch ohne Unterschiede zwischen den Bedingungen. Der Lernzuwachs bei richtigen Lösungsbeispielen steht im Einklang mit bisherigen Befunden aus diesem Bereich (Renkl, 2014). Die fehlerhaften Lösungsbeispiele führen möglicherweise zu einer Vorwissensaktivierung und Reflexion des Fehlers, die zur richtigen Erklärung führt. Die Reduktion der kognitiven Belastung (ECL/ICL) und Steigerung der lernbezogenen Belastung (GCL) in der Kombinationsbedingung CorrEx+ErrEx kann auf die explizite Gegenüberstellung von positivem und negativem Wissen zurückzuführen sein, da Informationen so expliziter verfügbar gemacht wurden als in den beiden anderen Bedingungen.

Anhand der Ergebnisse der Studie kann geschlussfolgert werden, dass Optimierungsbedarf der Methode besteht. Um die hohe Streuung von Vorwissen zwischen Bedingungen zu vermeiden, sollte eine Randomisierung innerhalb statt zwischen Klassen erfolgen. Zudem sollten die Lernmaterialien aus der Instruktion mehr bedingungsspezifische Aufgaben enthalten und in den einzelnen Anschlussaufgaben nach dem Video mehr fehlerspezifische Aufgaben (z.B. Fehler erklären und korrigieren) enthalten. Bezugnehmend auf die Überarbeitung der Lernmaterialien sollen bei der Bedingung ErrEx und der Kombibedingung CorrEx+ErrEx die Fehler in Form von literaturbasierten Schülervorstellungen als auch aus dieser Studie generierten Fehler in die Aufgaben integriert werden. Dadurch soll eine Auseinandersetzung mit Fehlern über die Erklärvideos hinaus und folglich während der gesamten Intervention erfolgen. Für die Bedingung CorrEx soll eine andere Aufgabenstellung im Sinne einer Kontrollgruppe, die nicht explizit auf Fehler Bezug nimmt, eingesetzt werden. Der Optimierungsansatz soll dazu führen, die lernförderlichen Effekte der drei Bedingungen differenzierter darzustellen. Des Weiteren steht die Auswertung der FF3 und FF4 und der offenen Aufgaben noch aus, sodass zukünftig untersucht wird, ob eher Schüler*innen mit viel oder wenig Vorwissen von der Instruktion mit fehlerhaften Lösungsbeispielen profitieren.

Literatur

- Adams, D. M., McLaren, B. M., Durkin, K., Mayer, R. E., Rittle-Johnson, B., Isotani, S. & van Velsen, M. (2014). Using erroneous examples to improve mathematics learning with a web-based tutoring system. *Computers in Human Behavior*, 36, 401–411. <https://doi.org/10.1016/j.chb.2014.03.053>
- Ayres, P. (2012). Worked Example Effect. In N. M. Seel (Hrsg.), *Encyclopedia of the Sciences of Learning* (Bd. 95, S. 3467–3471). Springer US. https://doi.org/10.1007/978-1-4419-1428-6_20
- Barbieri, C. A. & Booth, J. L. (2020). Mistakes on display: Incorrect examples refine equation solving and algebraic feature knowledge. *Applied Cognitive Psychology*, 34(4), 862–878. <https://doi.org/10.1002/acp.3663>
- Barke, H.-D. (2021). Binding and electron pair – two binding models for chemistry lessons. *CHEMKON*, 28(8), 336–340. <https://doi.org/10.1002/ckon.202000018>
- Booth, J. L., Lange, K. E., Koedinger, K. R. & Newton, K. J. (2013). Using example problems to improve student learning in algebra: Differentiating between correct and incorrect examples. *Learning and Instruction*, 25, 24–34. <https://doi.org/10.1016/j.learninstruc.2012.11.002>
- Chang, K.-E., Sung, Y.-T. & Chen, I.-D. (2002). The Effect of Concept Mapping to Enhance Text Comprehension and Summarization. *The Journal of Experimental Education*, 71(1), 5–23. <https://doi.org/10.1080/00220970209602054>
- Corral, D. & Carpenter, S. K. (2020). Facilitating transfer through incorrect examples and explanatory feedback. *Quarterly journal of experimental psychology (2006)*, 73(9), 1340–1359. <https://doi.org/10.1177/1747021820909454>
- Durkin, K. & Rittle-Johnson, B. (2012). The effectiveness of using incorrect examples to support learning about decimal magnitude. *Learning and Instruction*, 22(3), 206–214. <https://doi.org/10.1016/j.learninstruc.2011.11.001>
- Heemsoth, T. & Heinze, A. (2014). The impact of incorrect examples on learning fractions: A field experiment with 6th grade students. *Instructional Science*, 42(4), 639–657. <https://doi.org/10.1007/s11251-013-9302-5>
- Hunter, K. H., Rodriguez, J.-M. G. & Becker, N. M. (2022). A Review of Research on the Teaching and Learning of Chemical Bonding. *Journal of Chemical Education*, 99(7), 2451–2464. <https://doi.org/10.1021/acs.jchemed.2c00034>
- Kopp, V., Stark, R., Kühne-Eversmann, L. & Fischer, M. R. (2009). Do worked examples foster medical students' diagnostic knowledge of hyperthyroidism? *Medical education*, 43(12), 1210–1217. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2923.2009.03531.x>
- Loibl, K. & Leuders, T. (2018). Errors During Exploration and Consolidation—The Effectiveness of Productive Failure as Sequentially Guided Discovery Learning. *Journal für Mathematik-Didaktik*, 39(1), 69–96. <https://doi.org/10.1007/s13138-018-0130-7>
- Loibl, K. & Leuders, T. (2019). How to make failure productive: Fostering learning from errors through elaboration prompts. *Learning and Instruction*, 62, 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.learninstruc.2019.03.002>
- Oser, F., Hascher, T. & Spychiger, M. (1999). Lernen aus Fehlern Zur Psychologie des „negativen“ Wissens. In Wolfgang Althof (Hrsg.), *Fehlerwelten: Vom Fehlermachen und Lernen aus Fehlern. Beiträge und Nachträge zu einem interdisziplinären Symposium aus Anlaß des 60. Geburtstags von Fritz Oser*. (S. 11–41). VS Verlag für Sozialwissenschaften, Wiesbaden. https://doi.org/10.1007/978-3-663-07878-4_1
- Oser, F. K., Näpflin, C., Hofer, C. & Aerni, P. (2012). Towards a Theory of Negative Knowledge (NK): Almost-Mistakes as Drivers of Episodic Memory Amplification. In J. Bauer & C. Harteis (Hrsg.), *Professional and practice based learning 6. Human fallibility: the ambiguity of errors for work and learning* (S. 53–70). Springer.
- Renkl, A. (2014). Toward an instructionally oriented theory of example-based learning. *Cognitive science*, 38(1), 1–37. <https://doi.org/10.1111/cogs.12086>
- Schworm, S. & Renkl, A. (2007). Learning argumentation skills through the use of prompts for self-explaining examples. *Journal of Educational Psychology*, 99(2), 285–296. <https://doi.org/10.1037/0022-0663.99.2.285>
- Stark, R., Kopp, V. & Fischer, M. R. (2009). Förderung der Diagnosekompetenz bei Studierenden der Medizin durch situierendes, fallbasiertes Lernen mit Lösungsbeispielen: der Einfluss von Fehlern und Feedback. *Psychologie in Erziehung und Unterricht*, 56(2), 137–149.
- Sweller, J., van Merriënboer, J. J. G. & Paas, F. (2019). Cognitive Architecture and Instructional Design: 20 Years Later. *Educational Psychology Review*, 31(2), 261–292. <https://doi.org/10.1007/s10648-019-09465-5>
- van Gog, T. & Rummel, N. (2010). Example-Based Learning: Integrating Cognitive and Social-Cognitive Research Perspectives. *Educational Psychology Review*, 22(2), 155–174. <https://doi.org/10.1007/s10648-010-9134-7>