

SMOKEChem: Naturwissenschaftliches argumentieren durch Förderansätze der Selbstregulation mit KI

Ein zentrales Bildungsziel besteht darin, dass Lernende die Fähigkeit entwickeln, an zentralen gesellschaftlichen Diskursen teilzunehmen, deren Grundlagen wissenschaftliche Erkenntnisse sind (Kultusministerkonferenz, 2020). Schüler:innen müssen daher frühzeitig lernen, wissenschaftlich zu kommunizieren und Wissen anwendungsorientiert in gesellschaftliche Diskurse einfließen zu lassen. Nur so können sie kritisch und reflektiert Medienberichte begegnen, welche oft wichtige wissenschaftliche Nuancen weglassen, Befunde überinterpretieren und so Fehlinformationen erzeugen (Yu et al., 2025). In diesem Kontext erlangt die naturwissenschaftliche Argumentationskompetenz „scientific argumentation“ eine zunehmende Relevanz. Diese umfasst die Konstruktion, Unterstützung und Kritik von Erklärungen zu naturwissenschaftlichen Themenbereichen innerhalb einer wissenschaftlichen Gemeinschaft nach objektiven Kriterien (Ford, 2012, 2015). Obwohl die Bildungsstandards diese Kompetenz explizit vorschreiben (Kultusministerkonferenz, 2020), scheitert deren Umsetzung in der Unterrichtspraxis häufig an Herausforderungen wie mangelnden sprachlichen, fachinhaltlichen und metakognitiven Kompetenzen der Lernenden sowie an methodischen und zeitlichen Ressourcenproblemen der Lehrpersonen (Ariely et al., 2024; Jin & Kim, 2021). Eine mögliche Lösung bietet der Einsatz von Künstlicher Intelligenz (KI), welche Lernenden adaptives, individuelles Feedback zum Argumentationsprozess geben kann und zugleich deren metakognitive Fähigkeiten in den Bereichen Planung, Selbstbeobachtung, Reflexion und adaptive Anpassung gezielt fördert.

Synergien von Metakognition, KI-basiertem und kollaborativem Feedback

Für eine erfolgreiche Argumentation ist die Fähigkeit der Lernenden zur metakognitiven Steuerung ihres Denkens unerlässlich (Jin & Kim, 2021). Dies umfasst das Planen eigener Argumente, das kritische Prüfen von Belegen, das Einbeziehen von Gegenargumenten sowie die Reflexion der eigenen Aussagen. Metakognition verbessert zudem den gezielten Einsatz von Evidenzen und die Qualität von Argumenten (Kuhn et al., 2013). Gleichzeitig fördert die Reflexion im Argumentationsprozess nicht nur das eigene Denken, sondern auch die epistemische Entwicklung der Lernenden (Iordanou, 2022; Jin & Kim, 2021). Somit ist Metakognitionskompetenz sowohl eine Voraussetzung für gelingendes Argumentieren als auch ein Förderfaktor, der durch Argumentationsprozesse selbst gestärkt werden kann.

Trotz dieser wechselseitigen Beziehung besteht in der schulischen Praxis ein erheblicher Handlungsbedarf, um beide Schlüsselkompetenzen systematisch zu fördern. Schüler:innen fehlt häufig eine gezielte Rückmeldung, welche für die Entwicklung metakognitiver Steuerung und argumentativer Qualität entscheidend wäre. Direktes, adaptives Feedback zur Struktur, Plausibilität und fachlichen Korrektheit zu den Argumenten der Schüler:innen erweist sich für Lehrende bei einer Kursgröße von bis zu 25 Schüler:innen als nicht skalierbar und kaum leistbar (Wambsgans et al., 2025; Wilson et al., 2023).

Eine vielversprechende Lösung liegt dabei im Einsatz von KI als adaptive Lernbegleitung, die gezielt metakognitive Steuerungs- und Argumentationsprozesse unterstützt. KI-Systeme könnten Lernende u.a. beim Planen, Überprüfen und Reflektieren ihrer Argumente begleiten,

indem sie Denkprozesse sichtbar machen und durch individuelle metakognitive Leitfragen Selbstständigkeit sowie kritisches Denken fördern (Glick et al., 2024; Wirzberger & Schwarz, 2021). Gleichzeitig könnten sie Lehrpersonen entlasten, da Feedbackprozesse automatisiert, skalierbar und in Echtzeit bereitgestellt werden können. Damit kann KI eine adaptive Förderung wissenschaftlicher Argumentationskompetenz durch automatisierte Analysen, gezielte Reflexionsimpulse und individuelles Feedback ermöglichen (Wilson et al., 2023). Metakognition besitzt dabei eine Doppelfunktion: Zum einen ist sie Voraussetzung, damit Lernende überhaupt KI-Feedback kritisch einordnen und sinnvoll nutzen können. Zum anderen kann KI selbst durch gezielte Impulse Metakognition fördern – etwa über virtuelle Coaching-Elemente, formative Rückmeldungen oder gezielte Reflexionsphasen, von denen insbesondere Lernende mit gering ausgeprägten selbstregulativen Kompetenzen profitieren (Haudek & Zhai, 2024; Lin & Chang, 2023). Diese reziproke Beziehung zwischen Metakognition und KI-gestütztem Feedback entfaltet somit ein hohes Synergiepotenzial. Gleichzeitig erfordert der Einsatz von KI einen reflektierten und verantwortungsvollen Umgang. Sprachmodelle können falsche, verzerrte oder halluzinierte Inhalte erzeugen, weswegen ein kritischer Umgang zentral ist (Lee et al., 2024; Perković et al., 2024). Zudem darf KI-Feedback nicht als Ersatz für menschliches oder Peer-Feedback verstanden werden. Entscheidend für Lernwirksamkeit ist daher das didaktische Design, nicht die Technologie selbst (Holstein et al., 2019). Vor diesem Hintergrund wird in unserem Ansatz ein hybrides Feedbackmodell umgesetzt, das menschliche und künstliche Rückmeldungen verzahnt. Nach der KI-gestützten Analyse folgt ein kollaborativer Argumentationsprozess. Hier überprüfen Peers und Lehrende die KI-Rückmeldungen kritisch. Sie formulieren selbst Feedback zu den Argumenten, denn kollaboratives, kritisch-konstruktives Diskutieren ist ein Schlüsselfaktor zur Förderung wissenschaftlicher Argumentationsfähigkeit (Osborne, 2010). Peer-Feedback erweitert Perspektiven, stärkt soziale Reflexionsprozesse und kann zu konzeptueller Umstrukturierung und vertieftem Fachverständnis führen (Cortázar et al., 2021; Osborne, 2010). Zudem fördert die Integration widersprüchlicher Positionen, durch das Peer-Feedback, den Aufbau evidenzbasierter, wissenschaftlich fundierter Argumente (Matos, 2021; Sampson & Clark, 2009) und bereitet gezielt auf Diskurse vor. Die Verbindung von KI-gestütztem Feedback und kollaborativem Argumentieren vereint die Vorzüge beider Ansätze – die Skalierbarkeit und Adaptivität von KI mit der sozialen, kritischen und reflexiven Tiefe menschlicher Interaktion.

Forschungsfokus:

Während KI-basierte Systeme in ersten Studien bereits ihr Potenzial zur Analyse und Förderung argumentativer Leistungen gezeigt haben, fehlt bislang ein integrierter Ansatz, der KI-gestütztes Feedback zu Argumenten, explizite Metakognitionsförderung und kollaboratives Argumentieren systematisch miteinander kombiniert. Bestehende Forschung konzentriert sich häufig auf einzelne Komponenten, ohne deren interaktive Wirkung auf die Entwicklung metakognitiver und argumentativer Kompetenzen im Unterricht ganzheitlich zu untersuchen. Die vorliegende Studie adressiert diese Forschungslücke durch den Einsatz der webbasierten Lernumgebung SMOKEChem, die als Proof of Concept ein hybrides Feedbacksystem implementiert. SMOKEChem integriert adaptives KI-Feedback, explizite metakognitive Strategien sowie kollaborative Argumentationsprozesse und ermöglicht damit die Untersuchung der wechselseitigen Effekte dieser Komponenten auf Lernprozesse und Kompetenzentwicklung.

SMOKEChem – Design einer KI-gestützten, kollaborativen Lernumgebung

SMOKEChem ist eine webbasierte Lernumgebung zur Förderung naturwissenschaftlicher Argumentations- und Metakognitionskompetenzen. Sie führt Schüler:innen schrittweise durch eine argumentationsbasierte Bewertungsaufgabe zu aktuellen, variablen Socioscientific issues (SSI) (z. B. „Vapes – eine nachhaltige Alternative zu Zigaretten?“; „Mobilität – welcher Antrieb wird sich durchsetzen?“ etc.). Die Plattform ist browserbasiert, datenschutzkonform und nutzt ein speziell didaktisch gepromptetes Sprachmodell (OpenAI, API), das ausschließlich auf die von Schüler:innen eingegebenen Texte reagiert. Die Rückmeldungen sind altersgerecht, konstruktiv und individuell gestaltet, und Lehrkräfte können den Lernfortschritt einsehen und bei Bedarf gezielt intervenieren.

Die Struktur der Lernumgebung ist am WAAGE^R-Modell orientiert (Langlet, 2022) (siehe Abb. 1). Nach einer theoretischen Einführung in Argumentations- und Metakognitionsstrategien bearbeiten die Schüler:innen in SMOKEChem ein SSI, entwickeln kollaborativ Bewertungskriterien und sammeln in einer Experimentierphase evidenzbasierte Fakten als Grundlage für ihre Argumentation. Ein integrierter KI-Chatbot analysiert die erstellten Argumente auf Basis des Toulmin-Modells (Toulmin, 2003), gibt adaptives Feedback zu Struktur, Plausibilität und fachlicher Korrektheit. Zusätzlich bietet der Chatbot Verbesserungsvorschläge sowie metakognitive Leitfragen, die zur Reflexion des eigenen Denkens „think provoking“ (Kramarski et al., 2002) anregen. Dieses adaptive Echtzeitfeedback ermöglicht den Lernenden iterative Überarbeitungen, wodurch Argumentationsprozesse vertieft und reflektiert werden. Im anschließenden kollaborativen Argumentieren vertiefen die Lernenden ihre Argumente durch Peer- und Lehrkräfte-Feedback, hierarchisieren Argumente individuell und reflektieren diese abschließend in einer moderierten Diskussion. SMOKEChem verbindet so die metakognitionsfördernde Adaptivität KI-gestützten Feedbacks mit der sozialen, reflexiven und kritischen Tiefe kollaborativen Argumentierens. Durch die gezielte Verzahnung beider Ansätze schafft die Lernumgebung optimale Bedingungen für die Entwicklung wissenschaftlicher Argumentations- und Metakognitionskompetenzen.



Abbildung 1: Inhalte des Argumentationssettings in der Webapp Smokechem

Ausblick:

Nach Abschluss der Pilotierungsphase der Webapp findet der Einsatz von SMOKEChem im Kontext einer kontrollierten Interventionsstudie statt, die die Wirksamkeit der Lernumgebung zur Förderung wissenschaftlicher Argumentations- und Metakognitionskompetenzen in der Sekundarstufe II untersucht.

Literatur

- Ariely, M., Nazaretsky, T. & Alexandron, G. (2024). Causal-mechanical explanations in biology. *J. Res. Sci. Teach.*, 61(8), 1858-1889.
- Cortázar, C., Nussbaum, M., Harcha, J., Alvares, D., López, F., Goñi, J. & Cabezas, V. (2021). Promoting critical thinking in an online, project-based course. *Comput. Hum. Behav.*, 119, 106705.
- Ford, M. J. (2012). A dialogic account of sense-making in scientific argumentation and reasoning. *Cogn. Instr.*, 30(3), 207-245.
- Ford, M. J. (2015). Educational implications of choosing “practice” to describe science in the next generation science standards. *Sci. Educ.*, 99(6), 1041-1048.
- Glick, D., Miedijensky, S. & Zhang, H. (2024). Examining the effect of AI-powered virtual-human training on STEM majors’ self-regulated learning behavior. *Front. Educ.*, 9.
- Haudek, K. C. & Zhai, X. (2024). Examining the effect of assessment construct characteristics on machine learning scoring of scientific argumentation. *Int. J. Artif. Intell. Educ.*, 34(4), 1482-1509.
- Iordanou, K. (2022). Supporting strategic and meta-strategic development of argument skill: The role of reflection. *Metacognition and Learning*, 17(2), 399-425.
- Jin, Q. & Kim, M. (2021). Supporting elementary students’ scientific argumentation with argument-focused metacognitive scaffolds (AMS). *International Journal of Science Education*, 43(12), 1984-2006.
- Kramarski, B., Mevarech, Z. & Arami, M. (2002). The effects of metacognitive instruction on solving mathematical authentic tasks. *Educational Studies in Mathematics*, 49, 225-250.
- Kuhn, D., Nicole, Z., Amanda, C. & and Zavala, J. (2013). Developing norms of argumentation. *Cogn. Instr.*, 31(4), 456-496.
- Kultusministerkonferenz. (2020). *Bildungsstandards im Fach Chemie für die Allgemeine Hochschulreife*. Beschluss vom 18.06.2020 (Vol. 1).
- Langlet, J. E., I., Gemballa, S., Heckmann, G., Kunz, A., Lübeck, M., Meistert, A., Menthe, J., Ratzek, J., Wlotzka, P., Wodzinski, R. (2022). Bewertungskompetenz in den Naturwissenschaften.
- Lee, J., Hicke, Y., Yu, R., Brooks, C. & Kizilcec, R. F. (2024). The life cycle of large language models in education: A framework for understanding sources of bias. *Br. J. Educ. Technol.*, 55(5), 1982-2002.
- Lin, M. P.-C. & Chang, D. (2023). CHAT-ACTS: A pedagogical framework for personalized chatbot to enhance active learning and self-regulated learning. *Computers and Education: Artificial Intelligence*, 5, 100167.
- Matos, F. (2021). Collaborative writing as a bridge from peer discourse to individual argumentative writing. *Reading and Writing*, 34(5), 1321-1342.
- Osborne, J. (2010). Arguing to learn in science: The role of collaborative, critical discourse. *Science*, 328(5977), 463-466.
- Perković, G., Drobnjak, A. & Botički, I. (2024). Hallucinations in LLMs. 2024 47th MIPRO ICT and Electronics Convention (MIPRO).
- Sampson, V. & Clark, D. (2009). The impact of collaboration on the outcomes of scientific argumentation. *Science Education*, 93(3), 448-484.
- Toulmin, S. E. (2003). *The uses of argument*. Cambridge University Press.
- Wambsganss, T., Janson, A., Söllner, M., Koedinger, K. & Leimeister, J. M. (2025). Improving students’ argumentation skills using dynamic machine-learning-based modeling. *Inf. Sys. Res.*, 36(1), 474-507.
- Wilson, C., Haudek, K., Osborne, J., Zoë, Cheuk, T., Donovan, B., Stuhlsatz, M., Santiago, M. & Zhai, X. (2023). Using automated analysis to assess middle school students’ competence with scientific argumentation. *J. Res. Sci. Teach.*
- Wirzberger, M., & Schwarz, M. (2021). Förderung selbstregulierten Lernens durch ein KI-gestütztes Training. *Bildung und Erziehung*, 74, 280-295.
- Yu, J., Yeung, C. & Soman, D. (2025). Are media reports of published research an accurate representation of the research? *Behavioural Public Policy*, 1-21.