

Systemkompetenz in der Chemie: Kompetenzmodellierung und Testentwicklung

Das Anthropozän wird davon geprägt, dass Menschen in natürliche komplexe Systeme eingreifen und so für das gesamte Erdsystem bedrohliche Folgen produzieren (Rieß, 2013). Chemie spielt dabei eine zentrale Rolle, da durch sie sowohl Ursachen der Probleme des Anthropozäns geklärt, aber auch Lösungen für diese Probleme entwickelt werden können (Whalen et al., 2022). Einen frühen Beitrag zur Entwicklung solcher Lösungen kann die Bildung für nachhaltige Entwicklung (BNE) im Rahmen von Chemieunterricht leisten, indem sie Lernende dazu befähigt im Rahmen der Herausforderungen des Anthropozäns zukunftsorientiert zu denken und zu handeln (MSB NRW, 2019; UNESCO, 2017). Die dabei zugrundeliegenden Lernprozesse von BNE beruhen auf einer systemischen Denkweise, die notwendig ist, um die auftretenden Probleme und Prozesse in natürlichen komplexen Systemen zu verstehen (MSB NRW, 2019). Daher wird unter anderem Systemkompetenz als eine zentrale Kompetenz im Rahmen von BNE ausgewiesen (UNESCO, 2017). Fähigkeiten der Systemkompetenz sollten daher auch im Chemieunterricht gefördert werden (Fanta et al., 2017). Dazu bedarf es einer exakten Modellierung dieser Kompetenz für den Schulkontext und Befunde zum Erwerb von Systemkompetenz im Rahmen von Chemieunterricht (Budak & Ceyhan, 2024).

Systeme und Systemkompetenz

Unter einem komplexen System wird ein Konstrukt verstanden, das aus Systemkomponenten, deren Interaktionen und einer Struktur, geformt aus den Systemkomponenten und Interaktionen, besteht und durch das Zusammenspiel dieser Bestandteile seine Eigenschaften erhält. Diese Eigenschaften werden ausschließlich dem Gesamtsystem und nicht den einzelnen Systembestandteilen zugeschrieben (Ben-Zvi Assaraf & Orion, 2005).

Systemkompetenz beschreibt eine Reihe von Fähigkeiten, um komplexe Systeme zu erkennen und zu verstehen, ihr Verhalten vorherzusagen und sie so zu verändern, dass sie die gewünschten Effekte erzielen (Arnold & Wade, 2015). Als Antwort auf die Frage, welche Fähigkeiten zur Systemkompetenz gehören, wird häufig das hierarchische System Thinking-Modell (STH-Modell) herangezogen (Ben-Zvi Assaraf & Orion, (2005). Darin werden acht Fähigkeiten - unterteilt in die drei Kategorien Analyse, Synthese und Implementation von Systemkomponenten - unterschieden. Das STH-Modell ist kein klassisches Kompetenzmodell, kann jedoch eine Basis für ein solches Modell bieten.

Forschung zu Systemkompetenz im Fach Chemie

In den letzten Jahren wurde die Forschung zu Systemkompetenz in den Naturwissenschaften intensiviert (Bielik et al., 2023). Als Ergebnis wurden unter anderem ein Rahmenmodell für Systemkompetenz in Geographie, das verschiedene Kompetenzniveaus und Dimensionen von Systemkompetenz sowie den Komplexitätsgrad eines Systems berücksichtigt, und ein Testinstrument zur Messung von Systemkompetenz in den Fächern Geographie und Biologie entwickelt (Mambrey et al., 2020; Mehren et al., 2016; Rempfler & Uphues, 2011). Für das

Fach Chemie entstand im Zuge dessen, basierend auf dem STH-Modell, eine Beschreibung von fachspezifischen Fähigkeiten von Systemkompetenz mit dem Fokus auf deren Umsetzbarkeit im Chemieunterricht (York & Orgill, 2020). Die Messung dieser Fähigkeiten erfolgte bisher mit Chemiestudierenden (Budak & Ceyhan, 2024).

Ziel und Forschungsfragen

Aktuell fehlen Forschungsbefunde inwieweit chemiespezifische Fähigkeiten der Systemkompetenz bereits in der Schule von Schüler:innen erworben werden. Die Forschung lässt allerdings vermuten, dass Fähigkeiten der Systemkompetenz bereits im Schulunterricht erworben werden und dass Fachwissen und kognitive Fähigkeiten mögliche Prädiktoren für den Erwerb dieser Fähigkeiten sind (Ben-Zvi Assaraf & Orion, 2005; Budak & Ceyhan, 2024). Daher ist das Ziel dieses Vorhabens die Kompetenzmessung des Erkennens von und Handelns in komplexen chemischen Systemen mit Hilfe eines schriftlichen Testinstruments bei Lernenden der Sekundarstufe II. Folgende Forschungsfragen werden untersucht:

FF1: Inwieweit erwerben Lernende der Sekundarstufe II Fähigkeiten der Systemkompetenz auf Grundlage der fachspezifischen Kompetenzen von Systemkompetenz im Fach Chemie?

FF2: Inwieweit sind Fachwissen und kognitive Fähigkeiten Prädiktoren für den Erwerb von Fähigkeiten der Systemkompetenz im Chemieunterricht?

Methode

Zur Beantwortung der Forschungsfragen ist das Projekt in drei Meilensteine gegliedert (Abb. 1).

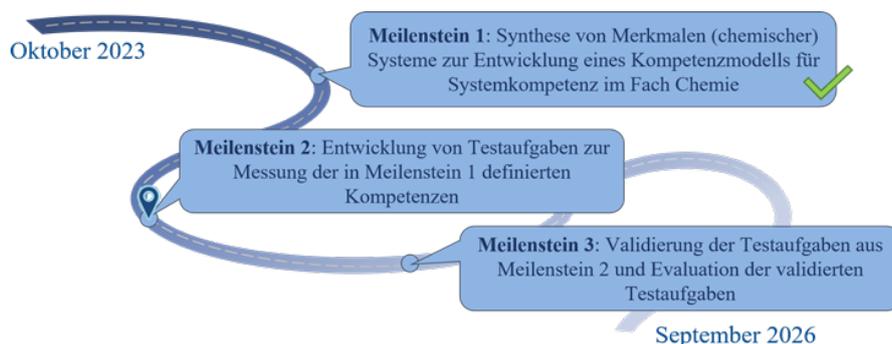


Abb. 1: Roadmap des Projekts.

Ziel des ersten Meilensteins ist die Synthese von Merkmalen chemischer Systeme und anschließende Entwicklung eines Kompetenzmodells von Systemkompetenz für das Fach Chemie. Zur Synthese der Merkmale wurde Literatur zur Systemtheorie und zu Definitionen von Systemen genutzt und mit Beispielen für chemische Systeme verglichen. Da für das Fach Chemie bisher nicht exakt definiert wurde, welche Merkmale ein chemisches System charakterisieren, aber sämtliche MINT-Fächer ein naturwissenschaftliches Systemverständnis nach Ludwig von Bertalanffy (1950) teilen, musste auf Literatur aus dem gesamten MINT-Bereich zurückgegriffen werden (Bier et al., 2023). Zusätzlich zu den auf diese Weise synthetisierten Merkmalen von chemischen Systemen werden für die Konstruktion des Kompetenzmodells das Rahmenmodell von Systemkompetenz von Rempfler und Uphues (2011) und die fachspezifischen Fähigkeiten von Systemkompetenz von York und Orgill (2020) als Basis genutzt.

Im zweiten Meilenstein werden zunächst chemische Systeme konzipiert, die anschließend für die Entwicklung von Testaufgaben zur Messung der Kompetenzen aus dem in Meilenstein 1 entwickelten Kompetenzmodell genutzt werden. Die Systeme werden in Anlehnung an sozialwissenschaftliche Systemmodelle in Form von *System Maps* konzipiert, die einzelne Systemelemente und deren Zusammenhänge visualisieren. Die *System Maps* werden anschließend durch ein Expertenrating auf Konstrukt- und Inhaltsvalidität geprüft. Für die Testaufgaben wird ein Multiple-Choice-Format basierend auf *System Maps* in Anlehnung an Mambrey et al. (2020) gewählt.

Im dritten Meilenstein werden die entwickelten Testaufgaben zunächst durch unabhängige Reviewer auf Passung zum Kompetenzmodell geprüft, um so die Inhaltsvalidität zu gewährleisten. Anschließend werden die Testaufgaben genutzt, um die Fähigkeiten von Systemkompetenz von Lernenden der Sekundarstufe II zu untersuchen. Dabei wird eine Gesamtstichprobe von $N = 500$ bis 600 Lernende angestrebt, da so eine ausreichende Anzahl von Antworten pro Testaufgabe im Sinne der probabilistischen Testtheorie sichergestellt werden kann.

Erste Ergebnisse und Ausblick

Der erste Meilenstein des Projekts ist bereits abgeschlossen, sodass zu diesem bereits erste Ergebnisse vorliegen. Es konnten zunächst 16 verschiedene Merkmale von chemischen Systemen, wie z.B. vorhandene Subsysteme, Emergenz oder Dynamik, unterschieden werden. Mit Hilfe dieser Merkmale wurde ein Flussdiagramm entwickelt, mit dem basierend auf 16 Ja/ Nein-Fragen (z.B. Emergenz: Wirken sich Änderungen in bzw. Wechselwirkungen zwischen Subsystemen auf das Gesamtsystem aus? Wenn ja, dann besitzt das System emergente Eigenschaften.) existierende Systeme analysiert oder neue Systeme konstruiert werden können. Das Flussdiagramm wird nun dazu verwendet, die *System Maps* für die Entwicklung der Testaufgaben in Meilenstein 2 zu konstruieren.

Das entwickelte Kompetenzmodell unterscheidet zwischen zwei Dimensionen von Systemkompetenz: *Systemorganisation* und *Systemverhalten*. Für beide Dimensionen werden, basierend auf der Anzahl der Systemelemente, der Art ihrer Verbindungen und der daraus resultierenden Strukturkomplexität, drei Kompetenzstufe unterschieden. Um geeignete Kompetenzen für das Modell zu formulieren, wurden die Kompetenzen und die chemiespezifischen Fähigkeiten aus den Arbeiten von Rempfler und Uphues (2011) und York und Orgill (2020) kombiniert. Die Kompetenzen der Dimension *Systemorganisation* konzentrieren sich auf die Beschreibung eines gegebenen Systems, z.B. durch die Identifizierung der Systemkomponenten oder verschiedener Organisationsebenen in einem System. Die Kompetenzen der Dimension *Systemverhalten* befassen sich hingegen mit der Beschreibung und Analyse der Beziehungen in einem gegebenen System und dem Verhalten des Systems. Dabei werden verschiedene Arten von Beziehungen unterschieden, wie z.B. zeitabhängiges Verhalten, Stock- & Flow- Beziehungen oder Rückkopplungsschleifen.

Geplant ist im nächsten Schritt die Konstruktion der Testaufgaben, für die bereits alle *System Maps* konzipiert wurden. Die Validierung der *System Maps* steht aktuell noch aus. Nach der Konzeption der Testaufgaben und deren Validierung durch ein Expertenrating werden die Aufgaben zunächst pilotiert.

Literatur

- Arnold, R. D. & Wade, J. P. (2015). A Definition of Systems Thinking: A Systems Approach. *Procedia Computer Science*, 44(1), 669–678. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2015.03.050>
- Ben-Zvi Assaraf, O. & Orion, N. (2005). Development of system thinking skills in the context of earth system education. *Journal of Research in Science Teaching*, 42(5), 518–560. <https://doi.org/10.1002/tea.20061>
- Bielik, T., Delen, I., Krell, M. & Assaraf, O. B. Z. (2023). Characterising the Literature on the Teaching and Learning of System Thinking and Complexity in STEM Education: a Bibliometric Analysis and Research Synthesis. *Journal for STEM Education Research*, 6(2), 199–231. <https://doi.org/10.1007/s41979-023-00087-9>
- Bier, T., Sauer, M., Felzmann, D., Kauertz, A., Risch, B. & Nitz, S. (2023). SystemThink - Systemdenken in den naturwissenschaftlichen Fächern. In *Frühe naturwissenschaftliche Bildung. Gesellschaft für Didaktik der Chemie und Physik. Jahrestagung 2023* (Bd. 44, S. 1022–1025). (Erstveröffentlichung 2023)
- Budak, U. S. & Ceyhan, G. D. (2024). Research trends on systems thinking approach in science education. *International Journal of Science Education*, 46(5), 485–502. <https://doi.org/10.1080/09500693.2023.2245106>
- Fanta, D., Bräutigam, J., Greiff, S. & Rieß, W. (2017). Entwicklung und Validierung eines Messinstrumentes zur Erfassung von systemischem Denken bei Lehramtsstudierenden in ökologischen Kontexten. *Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften*, 23(1), 241–259. <https://doi.org/10.1007/s40573-017-0067-2>
- Mambrey, S., Timm, J., Landskron, J. J. & Schmiemann, P. (2020). The impact of system specifics on systems thinking. *Journal of Research in Science Teaching*, 57(10), 1632–1651. <https://doi.org/10.1002/tea.21649>
- Mehren, R., Rempfler, A., Ullrich-Riedhammer, E.-M., Buchholz, J. & Hartig, J. (2016). Systemkompetenz im Geographieunterricht. *Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften*, 22(1), 147–163. <https://doi.org/10.1007/s40573-016-0047-y>
- MSB NRW. (2019). *Leitlinie Bildung für nachhaltige Entwicklung* (Nr. 9052).
- Rempfler, A. & Uphues, R. (2011). Systemkompetenz im Geographieunterricht-Die Entwicklung eines Kompetenzmodells. *Geographische Bildung. Kompetenzen in didaktischer Forschung und Schulpraxis*, 36–48.
- Rieß, W. (2013). Bildung für nachhaltige Entwicklung (BNE) und Förderung des systemischen Denkens. *Anliegen Natur*, 35(1), 55–64.
- UNESCO. (2017). *Education for sustainable development goals: Learning objectives*. UNESCO.
- von Bertalanffy, L. (1950). An Outline of General System Theory. *The British Journal for the Philosophy of Science*, 1(2), 134–165. <http://www.jstor.org/stable/685808>
- Whalen, J. M., Matlin, S. A., Holme, T. A., Stewart, J. J. & Mahaffy, P. G. (2022). A Systems Approach to Chemistry Is Required to Achieve Sustainable Transformation of Matter: The Case of Ammonia and Reactive Nitrogen. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 10(39), 12933–12947. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.2c03159>
- York, S. & Orgill, M. (2020). ChEMIST Table: A Tool for Designing or Modifying Instruction for a Systems Thinking Approach in Chemistry Education. *Journal of Chemical Education*, 97(8), 2114–2129. <https://doi.org/10.1021/acs.jchemed.0c00382>