

System Maps zur Messung von systemischem Denken in Chemie

Theoretischer Hintergrund und aktueller Forschungsstand

Das Zeitalter des Anthropozäns ist vom Eingriff des Menschen in natürliche Systeme geprägt, wodurch für das gesamte Erdsystem bedrohliche Folgen entstehen (Rieß, 2013). Bildung für nachhaltige Entwicklung (BNE) betrachtet Phänomene und Prozesse des Anthropozäns aus Nachhaltigkeitsperspektive, um nachfolgende Generationen zu zukunftsorientiertem Handeln zu befähigen (UNESCO, 2017). Chemie spielt bei der Lösung von Nachhaltigkeitsproblemen, insbesondere bei chemisch-ökologischen Problemen, eine zentrale Rolle (Wissinger et al., 2021). Daher wurde für den Chemieunterricht ein Ansatz gefordert, der klassische chemische Themen mit Nachhaltigkeitszielen verknüpft (Whalen et al., 2022). Systemisches Denken ist ein solcher Ansatz, der als Schlüsselkompetenz für BNE identifiziert wurde (UNESCO, 2017). Systemisches Denken wird als eine Reihe von Fähigkeiten verstanden, die es ermöglichen komplexe Systeme zu erkennen und zu verstehen, ihr Verhalten vorherzusagen und sie so zu verändern, dass sie die gewünschte Effekte erzielen (Arnold & Wade, 2015). Zur Modellierung dieser Fähigkeiten gibt es Ansätze aus den Naturwissenschaften, wie zum Beispiel das hierarchische Modell systemischen Denkens (Ben-Zvi Assaraf & Orion, 2005) oder Ansätze naturwissenschaftsaffiner Fächer wie Geografie (Rempfler & Uphues, 2012). Spezifisch für das Fach Chemie gibt es ebenfalls Ansätze, wie die ChEMIST-Tabelle (York & Orgill, 2020). Allerdings fehlt ein Kompetenzmodell, welches Fähigkeiten systemischen Denkens in der Sekundarstufe II für das Fach Chemie abbildet (Sun et al., 2025). Die wenigen Arbeiten im Schulkontext fokussieren die Implementierung von systemischem Denken in der Praxis (Budak & Ceyhan, 2024). Erste empirische Untersuchungen lassen vermuten, dass Fähigkeiten des systemischen Denkens bereits in der Schule erworben werden und dass Fachwissen und kognitive Fähigkeiten Prädiktoren für den Erwerb dieser Fähigkeiten sind (Ben-Zvi Assaraf & Orion, 2005; Mambrey et al., 2020). Zur Überprüfung dieser Vermutungen fehlt für die Sekundarstufe II aktuell ein Testinstrument, obwohl gerade dort komplexe Problemlösefähigkeiten, Nachhaltigkeitsbewusstsein und soziale Verantwortung entwickelt werden sollen, die durch systemisches Denken gefördert werden (Sun et al., 2025).

Ziel und Forschungsfragen

Vor dem beschriebenen Hintergrund adressiert das Vorhaben die Messung der Kompetenzen von Schüler:innen der Sekundarstufe II, komplexe Systeme zu erkennen und in ihnen zu handeln. Es werden die folgenden Forschungsfragen untersucht:

FF1: Inwieweit verfügen Schüler:innen der Sekundarstufe II über chemiebezogene Kompetenzen im Sinne von systemischem Denken im Fach Chemie?

FF2: Inwiefern sind chemisches Fachwissen und kognitive Fähigkeiten Prädiktoren für die Ausprägung von Fähigkeiten systemischen Denkens im Fach Chemie?

Zur Beantwortung der Forschungsfragen wurden zunächst Testaufgaben entwickelt, mit denen die Fähigkeiten systemischen Denkens von Schüler:innen der Sekundarstufe II im Fach Chemie gemessen werden sollen. Diese wurden in einer Pilotstudie mit dem Ziel eingesetzt, verschiedene Aufgabentypen für das Testinstrument zu evaluieren.

Entwicklung des Testinstruments

Die Entwicklung des Testinstruments ist in vier Teilschritte gegliedert: Im ersten Schritt wurde literaturbasiert ein Kompetenzmodell entwickelt, um festzulegen, welche Kompetenzen vom Testinstrument erfasst werden sollen. Zentrale Vorarbeiten, auf denen aufgebaut wird, sind der Modellierungsansatz aus der Geographie (Rempfler & Uphues, 2011) und die ChEMIST-Tabelle für das Fach Chemie (York & Orgill, 2020). Im Ergebnis wurde ein Kompetenzmodell mit der Struktur des Modells aus der Geographie (drei Kompetenzlevel, die sich hauptsächlich in der Strukturkomplexität der betrachteten Systeme unterscheiden und zwei Dimensionen *Systemorganisation* und *Systemverhalten*) und mit Inhalten des Modells aus der Chemie entwickelt. Im zweiten Schritt wurde das Design des Testinstruments literaturbasiert (u. a. Mambrey et al., 2020) festgelegt. Bereits existierende Instrumente zur Messung systemischen Denkens nutzen drei Erhebungsverfahren: Concept-Mapping, mündliche Befragungen und schriftliche Tests. Um ein möglichst effizientes und objektives Testinstrument zu entwickeln, wurde für dieses Vorhaben festgelegt, ein schriftliches Testinstrument mit Aufgaben im Multiple-Choice-Stil basierend auf System Maps in Anlehnung an Mambrey et al. (2020) zu entwickeln. In Anlehnung an Fanta et al. (2017) werden die Aufgaben zusätzlich mit einem Informationstext als Basis versehen. Im dritten Schritt wurden die System Maps für die Testitems entwickelt. Die System Maps stellen als Kombination aus Concept Maps und Wirkungsgraphen Systeme mit Bezug zum Fach Chemie dar. Als Kontext dienen vier Themenbereiche rund um Wasser und Wasserstoff: Versauerung der Meere, Wasserstoffproduktion, Trinkwasserverschmutzung und Trinkwasseraufbereitung. Für jeden Themenbereich wurden drei System Maps unterschiedlicher Komplexität konstruiert. Die Maps wurden in einem Expertenrating mit Expert:innen aus der Wasserchemie auf inhaltliche Vollständigkeit und Richtigkeit geprüft. Im letzten Schritt wurden die Items für das Testinstrument auf Grundlage der konstruierten System Maps entwickelt, wobei die Aufgabenformate *Zuordnungsaufgabe (Zo)*, *klassische Multiple-Choice-Aufgabe (kMC)* und *gestufte Multiple-Choice-Aufgabe (gMC)* unterschieden wurden. Jeweils 24 Items wurden nach einem der drei Aufgabenformate entwickelt und gleichmäßig auf die Dimensionen, Kompetenzlevel und Themenbereiche des Kompetenzmodells verteilt. Alle Testitems sind nach dem gleichen Schema aufgebaut:

- Aufgabenstellung abhängig vom Aufgabenformat
- Material zur Aufgabe in Form von Informationstexten (bei Zo), System Maps (bei gMC) oder der Kombination aus beidem (bei kMC)
- Antwortoptionen, bei denen jeweils eine richtig ist

Die entwickelten Testitems wurden nach Themenbereich und angestrebtem Kompetenzlevel gruppiert, sodass insgesamt 12 Itemgruppen unterschieden werden können. Die Itemgruppen wurden anschließend nach dem Youden-Square-Design auf 12 Testhefte mit je vier Positionen für die Durchführung der Pilotstudie verteilt.

Design der Pilotstudie

Die Pilotstudie wurde am Ende des Schuljahres 2024/25 mit $N = 152$ Schüler:innen aus Chemiekursen der Einführungsphase ($n = 132$) und Qualifikationsphase 1 ($n = 9$; 11 Schüler:innen ohne Angabe) aus NRW durchgeführt. Dabei stammten $n = 129$ von Gymnasien und $n = 23$ von Gesamtschulen. Dazu wurden die entwickelten Testitems und die genutzten Tests zur Erhebung der Kontrollvariablen *Leseverstehen* und *kognitive Fähigkeiten* in digitale Umfrage-

tools implementiert, sodass die Pilotstudie digital durchgeführt werden konnte. Die Durchführung der Pilotstudie wurde auf zwei Unterrichtsstunden à 90 Minuten aufgeteilt. In der ersten Unterrichtsstunde wurden die Kontrollvariablen erhoben. Für das Leseverstehen wurde der LGVT 6-12 von Schneider et al. (2007) genutzt, für die Messung von kognitiven Fähigkeiten wurden die Skalen N1 und V2 des KFT von Heller und Perleth (2000) verwendet. Die zweite Unterrichtsstunde diente anschließend der Messung von Fähigkeiten des systemischen Denkens mit den zuvor entwickelten Testaufgaben.

Erste Ergebnisse der Pilotstudie

Die Auswertung der Daten zu den Kontrollvariablen zeigt, dass die Schüler:innen ein geringes bis mittleres Leseverstehen haben ($M = 10,51$, $SD = 7,93$) und über ein mittleres Niveau an kognitiven Fähigkeiten ($M = 24,96$, $SD = 8,25$) verfügen. Zur Evaluation der Testaufgaben wurden zunächst vier eindimensionale (generelles systemisches Denken) und vier zweidimensionale (systemisches Denken in den Dimensionen des Kompetenzmodells) Rasch-Modelle berechnet und anhand BIC und Likelihood-Ratio-Test verglichen. Das eindimensionale Modell mit 46 Items erwies sich statistisch als das am besten passende Modell. Um den Fit der Testaufgaben zu dem Modell zu prüfen, wurden die infit MNSQ-Werte der Items sowie die t-Werte geprüft. Die Werte der Items im Format *Zo* und *kMC* liegen im Akzeptanzbereich von 0,70-1,30 für Multiple-Choice-Items (vgl. Boone (2016)). Die infit MNSQ-Werte der Items im Format *gMC* lagen außerhalb des Akzeptanzbereichs, weshalb diese für das Modell ausgeschlossen wurden. Die mittlere Itemschwierigkeit liegt für die Items der Formate *Zo* und *kMC* bei $M = 0,256$ Logits. Die Items sind damit im Mittel für die gewählte Stichprobe tendenziell zu schwierig, da das Modell für die Personenfähigkeiten auf 0 gemittelt wurde. Dies ist jedoch erwartbar, da die Stichprobe der Pilotstudie ein Schuljahr vor der angestrebten Stichprobe für die Hauptstudie ist. Es ist davon auszugehen, dass die Personenfähigkeit in der Hauptstudie besser zur Itemschwierigkeit passen wird. Zur Prüfung, ob die Testaufgaben die angestrebten Kompetenzlevel abbilden, wurden lineare Regressionen durchgeführt. Dabei zeigt die F-Statistik zu den Kompetenzleveln einen signifikanten Effekt; $F(1, 44) = 4,18$; $p < 0,05$; $R^2 = 0,087$. Die Testitems eignen sich somit, um zwischen den angestrebten Kompetenzleveln von systemischem Denken statistisch zu differenzieren, die getroffenen Annahmen des Kompetenzmodells zum Testmodell werden somit erfüllt. Um zu überprüfen, ob kognitive Fähigkeiten und Lesefähigkeiten Prädiktoren für Fähigkeiten des systemischen Denkens sind, wurde eine multiple lineare Regressionsanalyse durchgeführt. Die F-Statistik zeigt mit $F(2, 116) = 17,6$, $p < 0,001$ einen hinreichenden Erklärungsbeitrag des Regressionsmodells mit einer Modellgüte von $R^2 = 0,233$ (adjustiertes $R^2 = 0,220$). Kognitive Fähigkeiten zeigen sich als Prädiktor für Fähigkeiten des systemischen Denkens mit $b = 0,034$, $p < 0,001$. Die Lesefähigkeit zeigt sich mit $b = 0,012$, $p > 0,05$ hingegen nicht als Prädiktor.

Ausblick

Um weitere Einflüsse auf die Itemschwierigkeit zu prüfen, werden als Nächstes weitere Regressionen berechnet. Anschließend werden die Testaufgaben überarbeitet. Es wird ein endgültiger Aufgabenpool von etwa 30 Testaufgaben angestrebt, der in der Hauptstudie eingesetzt werden soll. Diese wird im zweiten Halbjahr des Schuljahres 2025/26 stattfinden. Ziel der Hauptstudie ist es, die Fähigkeiten systemischen Denkens von Schüler:innen in Chemiekursen der Qualifikationsphase 1 zu messen und zu klären, inwieweit der Erwerb dieser Fähigkeiten im Fach Chemie mit dem Fachwissen und den kognitiven Fähigkeiten zusammenhängt.

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>
- Boone, W. J. (2016). Rasch analysis for instrument development: Why, when, and how? *CBE life sciences education*, 15(4). <https://doi.org/10.1187/cbe.16-04-0148>
- 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>
- Heller, K. A. & Perleth, C. (2000). *KFT 4-12+ R kognitiver Fähigkeitstest für 4. bis 12. Klassen, Revision*. Beltz Test.
- 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>
- Rempfler, A. & Uphues, R. (2011). Systemkompetenz im Geographieunterricht-Die Entwicklung eines Kompetenzmodells. *Geographische Bildung. Kompetenzen in didaktischer Forschung und Schulpraxis*, 36–48.
- Rempfler, A. & Uphues, R. (2012). System competence in geography education - Development of competence models, diagnosing pupils' achievement. *European Journal of Geography*, 3(1).
- Rieß, W. (2013). Bildung für nachhaltige Entwicklung (BNE) und Förderung des systemischen Denkens. *Anliegen Natur*, 35(1), 55–64.
- Schneider, W., Schlagmüller, M. & Ennemoser, M. (2007). *LGVT 6-12: Lesegeschwindigkeits-und-verständnistest für die Klassen 6-12*. Hogrefe Göttingen.
- Sun, X. F., Liu, L., Ren, W. J., Xu, J. J., Gao, M. S. & Liu, Y. N. (2025). Identifying chemical systems thinking conceptual framework for high school students. *Journal of Chemical Education*, 102(7), 2763–2776. <https://doi.org/10.1021/acs.jchemed.4c01549>
- UNESCO. (2017). *Education for sustainable development goals: Learning objectives*. UNESCO.
- 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>
- Wissinger, J. E., Visa, A., Saha, B. B., Matlin, S. A., Mahaffy, P. G., Kümmerer, K. & Cornell, S. (2021). Integrating sustainability into learning in chemistry. *Journal of Chemical Education*, 98(4), 1061–1063. <https://doi.org/10.1021/acs.jchemed.1c00284>
- 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>