

Komplexe Systeme erfassen – Systemisches Denken von Chemiestudierenden im BNE-Kontext

Globale Herausforderungen wie Umweltverschmutzung, Rohstoffknappheit und Klimawandel erfordern eine nachhaltige Entwicklung, um adäquat bewältigt werden zu können (Richardson et al., 2023). Diese Herausforderungen lassen sich als *Socioscientific Issues* charakterisieren, da sie offen, komplex und multidimensional sind und somit differenzierter Herangehensweisen bedürfen (Sadler & Zeidler, 2005). Solche Socioscientific Issues umfassen Dimensionen der Nachhaltigkeit und der Chemie. Diese sind jedoch nicht voneinander unabhängig; vielmehr stehen sie in wechselseitiger Beziehung, beeinflussen sich gegenseitig und bilden so ein komplexes System (Mahaffy et al., 2019a). Für eine Bildung für nachhaltige Entwicklung (BNE) ist es daher essenziell, Lernende mit Fähigkeiten auszustatten, die es ihnen ermöglichen, komplexe Systeme zu verstehen und zu analysieren (Mahaffy et al., 2019a). Systems Thinking bietet hierfür einen besonders geeigneten Ansatz (Mahaffy et al., 2019a; Rieckmann, 2018; Rieß, 2013). Während dieser in der Biologie- und Geographiedidaktik bereits gut etabliert ist (Assaraf & Orion, 2005), befindet er sich in der Chemiedidaktik im steten Aufbau (Orgill et al., 2019). Anfangs wurden in der Chemie bereits komplexe Systeme – beispielsweise Reaktionsmechanismen – untersucht (Talanquer, 2019), aktuell eröffnet Systems Thinking darüber hinaus die Möglichkeit, chemisches Wissen mit den Dimensionen der Nachhaltigkeit zu verknüpfen und damit Socioscientific Issues für Lernende zugänglicher zu machen (Mahaffy et al., 2019b; Orgill et al., 2019; Talanquer, 2019).

Unser Forschungsschwerpunkt richtet sich auf zwei zentrale Aspekte des Systems Thinking in der Chemiedidaktik, die kritisch reflektiert und weiterentwickelt werden sollen: Erstens zeigt sich, dass bisher weder in der allgemeinen Systemforschung noch in der Chemiedidaktik ein einheitliches Verständnis von Systems Thinking vorliegt (Arnold & Wade, 2015; Orgill et al., 2019). In Reaktion darauf entwickelten Arnold und Wade (2015) auf der Basis einer systematischen Literaturrecherche eine Definition, die Systems Thinking als eine Bündelung von Fähigkeiten beschreibt, welche Lernende befähigen, Systeme und deren Verhalten zu verstehen, zu analysieren und zu beeinflussen. Auch in der Geographiedidaktik wurden entsprechende Fähigkeitslisten entwickelt, u.a. das hierarchische Modell von Assaraf und Orion (2005), das acht empirisch identifizierte Teilkompetenzen umfasst. Vergleichbare Fähigkeitslisten finden sich der Chemiedidaktik (Gill & McCollum, 2024; Reynders et al., 2023; York & Orgill, 2020). York und Orgill (2020) identifizierten beispielsweise zentrale Fähigkeiten wie die Analyse von Beziehungen zwischen Systemelementen und die Berücksichtigung von Wechselwirkungen über verschiedene Systemebenen hinweg. Diese Fähigkeitslisten sind überwiegend Output-orientiert. Zwar beschreiben sie, welche Fähigkeiten Systems Thinking umfasst, lassen jedoch offen, wie diese im Lernprozess gezielt entwickelt und gefördert werden können.

Zweitens ist Systems Thinking keine beiläufig entstehende Fähigkeit, sondern muss explizit vermittelt werden. Lehrkräfte spielen daher eine entscheidende Rolle bei ihrer Umsetzung im

Unterricht (Ossimitz, 2000). Wie jedoch eine aktuelle Studie zeigt, stellt fehlendes fachdidaktisches Wissen eine zentrale Hürde für die Implementierung des Ansatzes dar (Szozda et al., 2022).

Vor diesem Hintergrund adressiert die vorliegende Studie Lehramtsstudierende. Ziel ist es, ihre Anwendung von Systems Thinking auf komplexe Systeme zu erfassen. Aus einer prozessorientierten Perspektive wird untersucht, wie sie sich mit Systemen auseinandersetzen, die sowohl Nachhaltigkeits- als auch Chemiedimensionen integrieren.

Forschungsfragen

Ausgehend von unserem Forschungsschwerpunkt untersucht die vorliegende Studie, wie Lehramtsstudierende Zusammenhänge zwischen Konzepten innerhalb eines komplexen Systems wahrnehmen, mit dem Ziel, ihren Umgang mit einem komplexen System aus prozessorientierter Perspektive zu analysieren.

Zur Strukturierung dieser Untersuchung werden zwei Forschungsfragen formuliert: Wie gehen Lehramtsstudierende während (1) der Organisation von Informationen und (2) der Bewältigung der erlebten Komplexität in einem komplexen System vor?

Methode

Zur Beantwortung der Forschungsfragen wurde eine qualitative Interviewstudie mit Chemie-Lehramtsstudierenden der Technischen Universität Darmstadt durchgeführt ($N = 25$). Die Datenerhebung erfolgte im Think-Aloud-Format, während die Teilnehmenden drei aufeinander aufbauende Aufgaben zum System der Lithiumproduktion bearbeiteten. Grundlage bildete eine von der Autorin erstellte *Systems-Oriented Concept Map Extension* (SOCME), die an das Modell von Mahaffy et al. (2019b) sowie an das Systemverständnis nach Meadows (2011) angelehnt ist. In Aufgabe 1 beschrieben die Teilnehmenden das Gesamtsystem und erläuterten Beziehungen zwischen den einzelnen Systemkomponenten. In Aufgabe 2 beantworteten sie Was-wäre-wenn-Fragen, um die Auswirkungen von Veränderungen einzelner Systemkomponenten auf das Gesamtsystem zu erklären. In Aufgabe 3 reflektierten sie ihre bisherigen Erklärungen nach dem Lesen eines kurzen Textes zur Systemtheorie und konnten diese gegebenenfalls überarbeiten. Alle Interviews wurden audioaufgezeichnet, vollständig transkribiert und durch Videomaterial ergänzt, um die Interaktion mit der Visualisierung nachvollziehbar zu machen. Die Auswertung erfolgte in zwei Analyseschritten. Bezogen auf Forschungsfrage (1) wurden auf Grundlage individueller SOCMEs die argumentativen Wege der Teilnehmenden rekonstruiert und strukturell-netzwerkanalytisch erfasst. Bezogen auf Forschungsfrage (2) wurde anschließend mittels qualitativer Inhaltsanalyse nach Mayring (2022) mit MAXQDA untersucht, welche Strategien die Teilnehmenden zur Bewältigung der erfahrenen Systemkomplexität genutzt haben.

Ausgewählte Ergebnisse

Die nachfolgend dargestellten Ergebnisse beziehen sich ausschließlich auf die zweite Aufgabe, in der folgende Was-wäre-wenn-Frage gestellt wurde: *Was wäre, wenn es in der Atacama-Salzwüste mehr als gewöhnlich regnen würde? Welche Auswirkungen hätte dies auf das System?*

Im Hinblick auf die erste Forschungsfrage zeigte die strukturelle Netzwerkanalyse vier unterschiedliche Muster, anhand derer die Teilnehmenden Informationen organisierten:

Sonne, Pfad, Baum und Kreis. Diese Muster verdeutlichen verschiedene Herangehensweisen an die Strukturierung von Systeminformationen. Teilnehmende mit dem Sonnenmuster sprangen wiederholt von der Startkomponente des Systems zu unterschiedlichen Systemkomponenten in verschiedenen Subsystemen, jedoch ohne erkennbar logische Abfolge; Schlussfolgerungen wurden dabei häufig direkt gezogen. Beim Pfadmuster wurde hingegen eine zusammenhängende, schrittweise Argumentation entwickelt, die auf eine einzelne Schlussfolgerung zulief. Das Baummuster folgte ebenfalls einer strukturierten Argumentation, verzweigte sich jedoch an mehreren Stellen in unterschiedliche Schlussfolgerungen. Teilnehmende mit dem Kreismuster kehrten während ihrer Erklärung zu bereits zuvor betrachteten Systemkomponenten zurück, wodurch eine geschlossene Schleife in der Informationsorganisation entstand.

Im Hinblick auf die zweite Forschungsfrage zeigte die qualitative Inhaltsanalyse, dass die Teilnehmenden sechs unterschiedliche Strategien einsetzten um mit der erlebten Komplexität des Systems umzugehen. Die identifizierten Strategien sind: Analogiebildung, Abwägung, Narration, Perspektivübernahme, Hinein- und Herauszoomen sowie die Nutzung der Visualisierung.

Diese Strategien verdeutlichen, dass die Teilnehmenden die Komplexität, die mit der Anwendung eines Systems einhergeht, auf vielfältige Weise bewältigen. Einige der Strategien zielen darauf ab, Komplexität aktiv zu reduzieren, um das System handhabbar zu machen. Ein typisches Beispiel hierfür ist die Analogiebildung: Durch die Übertragung des Unbekannten auf vertraute Strukturen schaffen sich die Teilnehmenden eine Orientierung, die das Verständnis erleichtern kann. So begann eine teilnehmende Person ihre Erklärung mit den Worten: „Das ist wie ein Teufelskreis [...]“. Die komplexen Zusammenhänge des Systems werden hierbei zunächst auf ein bekanntes, vermeintlich einfach zu erfassendes Muster zurückgeführt. Andere Strategien hingegen unterstützen ein bewusstes Aushalten der und Einlassen auf Komplexität. Dies zeigt sich etwa beim Herauszoomen, bei dem die Teilnehmenden gezielt mehrere Subsysteme oder sogar das Gesamtsystem in den Blick nehmen, um Wechselwirkungen auf verschiedenen Ebenen zu berücksichtigen.

Insgesamt wird deutlich, dass Studierende nicht nur unterschiedliche Herangehensweisen wählen, sondern auch zwischen Strategien wechseln, um je nach Situation entweder Komplexität abzubauen oder deren Vielfalt konstruktiv in ihre Argumentation einzubeziehen.

Fazit & Ausblick

Die Ergebnisse zeigen deutliche Unterschiede darin, wie die Teilnehmenden Informationen strukturieren und welche Strategien sie zur Bewältigung komplexer Systeme anwenden. Diese Unterschiede lassen sich mithilfe der beschriebenen Analyseverfahren sowohl auf struktureller als auch auf inhaltlicher Ebene differenziert erfassen und beschreiben. In einem nächsten Schritt sollen die verschiedenen Ebenen der Analyse zusammengebracht werden. Die gewonnenen Erkenntnisse sollen zur Entwicklung von Scaffolds beitragen. Diese sollen angehende Chemielehrkräfte dabei unterstützen, komplexen Systemen mit chemischen und nachhaltigkeitsbezogenen Dimensionen zu erfassen und diese zukünftig im Unterricht anzuwenden.

Literatur

- Arnold, R. D., & Wade, J. P. (2015). A Definition of Systems Thinking: A Systems Approach. *Procedia Computer Science*, 44, 669–678. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2015.03.050>
- Assaraf, O. B.-Z., & 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>
- Carley, K. (1993). Coding Choices for Textual Analysis: A Comparison of Content Analysis and Map Analysis. *Sociological Methodology*, 23, 75. <https://doi.org/10.2307/271007>
- Gill, T., & McCollum, B. (2024). Identifying, Rating, and Categorizing Elements of Systems Thinking in Chemistry Education. *Journal of Chemical Education*, 101(8), 2976–2988. <https://doi.org/10.1021/acs.jchemed.3c01070>
- Grotzer, T. A. (2012). *Learning causality in a complex world: Understandings of consequence*. Rowman & Littlefield Education a division of Rowman & Littlefield Publishers Inc.
- Mahaffy, P. G., Matlin, S. A., Holme, T. A., & MacKellar, J. (2019a). Systems thinking for education about the molecular basis of sustainability. *Nature Sustainability*, 2(5), 362–370. <https://doi.org/10.1038/s41893-019-0285-3>
- Mahaffy, P. G., Matlin, S. A., Whalen, J. M., & Holme, T. A. (2019b). Integrating the Molecular Basis of Sustainability into General Chemistry through Systems Thinking. *Journal of Chemical Education*, 96(12), 2730–2741. <https://doi.org/10.1021/acs.jchemed.9b00390>
- Mayring, P. (2022). *Qualitative Inhaltsanalyse: Grundlagen und Techniken*. Beltz.
- Meadows, D. H. (2011). *Thinking in systems: A primer*. Chelsea Green Pub. <http://www.loc.gov/catdir/enhancements/fy0905/2008035211-b.html>
- Orgill, M., York, S., & MacKellar, J. (2019). Introduction to Systems Thinking for the Chemistry Education Community. *Journal of Chemical Education*, 96(12), 2720–2729. <https://doi.org/10.1021/acs.jchemed.9b00169>
- Ossimitz, G. (2000). *Entwicklung systemischen Denkens: Theoretische Konzepte und empirische Untersuchungen*. Zugl.: Klagenfurt, Univ., Habil.-Schr., 2000. Klagenfurter Beiträge zur Didaktik der Mathematik: Vol. 1. Profil.
- Reynders, M., Pilcher, L. A., & Potgieter, M. (2023). Teaching and Assessing Systems Thinking in First-Year Chemistry. *Journal of Chemical Education*, 100(3), 1357–1365. <https://doi.org/10.1021/acs.jchemed.2c00891>
- Richardson, K., Steffen, W., Lucht, W., Bendtsen, J., Cornell, S. E., Donges, J. F., Drüke, M., Fetzer, I., Bala, G., Bloh, W. von, Feulner, G., Fiedler, S., Gerten, D., Gleeson, T., Hofmann, M., Huiskamp, W., Kumm, M., Mohan, C., Nogués-Bravo, D., . . . Rockström, J. (2023). Earth beyond six of nine planetary boundaries. *Science Advances*, 9(37), eadh2458. <https://doi.org/10.1126/sciadv.adh2458>
- Rieckmann, M. (2018). Learning to transform the world: key competencies in Education for Sustainable Development. In L. Alexander (Ed.), *Issues and trends in education for sustainable development*. UNESCO.
- Rieß, W. (2013). Bildung für nachhaltige Entwicklung (BNE) und Förderung des systemischen Denkens. *ANLIEGEN NATUR*, 35, 55–64.
- Sadler, T. D., & Zeidler, D. L. (2005). Patterns of informal reasoning in the context of socioscientific decision making. *Journal of Research in Science Teaching*, 42(1), 112–138. <https://doi.org/10.1002/tea.20042>
- Szozda, A. R., Bruyere, K., Lee, H., Mahaffy, P. G., & Flynn, A. B. (2022). Investigating Educators' Perspectives toward Systems Thinking in Chemistry Education from International Contexts. *Journal of Chemical Education*, 99(7), 2474–2483. <https://doi.org/10.1021/acs.jchemed.2c00138>
- Talanquer, V. (2019). Some Insights into Assessing Chemical Systems Thinking. *Journal of Chemical Education*, 96(12), 2918–2925. <https://doi.org/10.1021/acs.jchemed.9b00218>
- 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.