

Learning About Chemical Reactions in Digital Learning Environments

Conceptual Understanding, Cognitive Demands,
and Perspectives on Design to Inform Individualized
Learning and Feedback

DISSSERTATION
submitted to the Faculty of Mathematics and Natural Sciences
of Kiel University
in partial fulfillment of the requirements
for the degree of
Doctor rerum naturalium

by Jannik Lossjew
Department of Chemistry Education
Leibniz Institute for Science and Mathematics Education

July 2025

First reviewer and academic supervisor: PD Dr. Sascha Bernholt

Second reviewer: Prof. Dr. Dr. h.c. Ilka Parchmann

Date of the defense: October 16, 2025

Date of acceptance for press: October 16, 2025

This research was supported by the Leibniz Association under the grant
K365/2020.

Summary

Science learning – particularly in chemistry – remains challenging for many students. The subject matter and concepts to be learned, such as the increasingly complex understanding of chemical reactions, are demanding and require deep conceptual understanding. Building such understanding in complex domains requires learning opportunities that are systematically structured and build cumulatively over time. Along this path, it is essential to continuously assess whether and how students are following the intended progression or where difficulties arise that should be addressed before moving on to more advanced content.

This dissertation investigates the development, implementation, and evaluation of a digital learning environment based on the ECD4LPA framework, designed to specifically support the development of competence in the core concept of *chemical reaction* in upper secondary education. The learning environment was embedded in a larger research project and designed to provide a variety of authentic assessments and digital learning formats based on principles of multimedia learning and subject-specific didactic models. Both the design and practical implementation aimed to generate data that would allow for the reconstruction of learning trajectories and the identification of learning difficulties – thereby creating a foundation for targeted, data-driven feedback processes in the future. Instructional potentials of digital media and tools were systematically integrated as well.

Empirical analyses based on a broad and diverse dataset showed that substantial learning gains are possible in such digital environments, and that the environment was well suited – based on the ECD4LPA framework – to generate appropriate data for tracking individual learning processes. From a competence development perspective, the findings underscore the central role of prior knowledge in conceptual learning. Open-ended response formats proved particularly effective in capturing complex patterns of reasoning and explanation that often go undetected in traditional assessments. With regard to the many representations that shape learning about chemical reactions, the thesis offered important insights into both supportive and obstructive task and person characteristics that can inform the design of feedback. Moreover, the work demonstrated how the evaluation of numerous open-ended tasks can be used to reconstruct individual knowledge networks, making visible the (non-)integration of difficult concepts and the interconnections among them. These reconstructions allow for fine-grained diagnostics of individual learning processes and prospectively provide teachers with actionable information for targeted instructional support.

At the same time, central challenges became apparent – such as issues of implementation fidelity, the high number of assessments, heterogeneous digital infrastructures, and the need for appropriate professional development to enable teachers to effectively use, adapt, and co-develop such environments. The doctoral thesis emphasizes the need to align digital innovations with curricular demands and school realities, and advocates for collaborative approaches in instructional development and educational research.

In sum, this dissertation provides fundamental insights and practice-oriented implications for integrating digital, data-driven learning environments into chemistry (or overall science) instruction. It highlights both the opportunities and limitations of such systems in fostering understanding of complex scientific concepts and identifies key areas for future research –

particularly with regard to the design, implementation, and evaluation of data-based feedback mechanisms, teacher support, and the development of sustainable and scalable digital solutions.

Zusammenfassung

Lernen in den naturwissenschaftlichen Fächern, insbesondere in der Chemie, bleibt für viele Lernende herausfordernd. Die zu erlernenden Inhalte und Konzepte – wie etwa die zunehmend komplexere Betrachtung chemischer Reaktionen – sind anspruchsvoll und erfordern ein tiefes Verständnis. Der Aufbau eines solchen Verständnisses in komplexen Domänen setzt systematisch strukturierte und kumulativ aufeinander aufbauende Lerngelegenheiten voraus; dabei muss kontinuierlich überprüft werden, inwieweit Lernende diesem angestrebten Lernpfad folgen können oder an welchen Stellen Schwierigkeiten auftreten, die vor dem Weiterlernen bearbeitet werden sollten.

Diese Dissertation untersucht die Entwicklung, Implementierung und Evaluation einer ECD4LPA-basierten digitalen Lernumgebung, die darauf abzielt, die Kompetenzentwicklung im Basiskonzept *Chemische Reaktion* im Chemieunterricht der Sekundarstufe II gezielt zu fördern. Die Lernumgebung war in ein größeres Forschungsprojekt eingebettet und wurde so gestaltet, dass sie vielfältige, authentische Assessments sowie digitale Lernformate nach Prinzipien des multimedialen Lernens und fachdidaktischen Modellen bereitstellt. Sowohl das Design als auch die praktische Umsetzung verfolgten das Ziel, Daten zu generieren, die eine Rekonstruktion von Lernverläufen und die Identifikation von Lernschwierigkeiten ermöglichen – und damit eine Grundlage für gezielte, datenbasierte Feedbackprozesse schaffen. Darüber hinaus wurden auch instruktionale Potenziale digitaler Medien systematisch integriert.

Empirische Analysen auf Basis eines breit angelegten, vielfältigen Datensatzes zeigten, dass in solchen digitalen Lernumgebungen substantielle Lernzuwächse möglich sind und dass die Umgebung aus ECD4LPA-Perspektive geeignet ist, passendes Datenmaterial zur Lernverlaufserfassung zu generieren. Die Ergebnisse unterstreichen zudem – aus Perspektive der Kompetenzentwicklung – die zentrale Bedeutung des Vorwissens für konzeptuelle Lernprozesse. Besonders offene Antwortformate erwiesen sich als geeignet, komplexe Denk- und Begründungsmuster zu erfassen, die in traditionellen Tests oft unentdeckt bleiben. Mit Blick auf vielfältige Repräsentationen, die das Lernen über chemische Reaktionen prägen, liefert die Arbeit wichtige Erkenntnisse zu förderlichen und hinderlichen Aufgaben- und Personenmerkmalen, die die Feedback-Gestaltung informieren. Darüber hinaus zeigt die Arbeit, wie die Auswertung zahlreicher offener Aufgaben genutzt werden kann, um individuelle Wissensnetzwerke darzustellen, die das (Nicht)-Einbringen schwieriger Konzepte und die Integration und Vernetzung von Konzepten sichtbar machen. Diese erlauben eine fein-granulare Diagnostik individueller Lernprozesse und liefern Lehrkräften prospektiv handlungsrelevante Informationen zur gezielten Lernunterstützung.

Gleichzeitig treten auch zentrale Herausforderungen zutage – etwa im Hinblick auf die Implementationstreue, die hohe Anzahl an Assessments, heterogene digitale Infrastrukturen sowie den Bedarf an geeigneter Professionalisierung, damit Lehrkräfte solche Lernumgebungen wirksam nutzen, adaptieren und mitgestalten können. Die Arbeit betont die Notwendigkeit, digitale Innovationen an curriculare Anforderungen und schulische Realitäten anzupassen, und spricht sich für kooperative Ansätze in Unterrichtsentwicklung und Bildungsforschung aus.

Zusammenfassend liefert diese Dissertation grundlegende Erkenntnisse sowie praxisnahe Implikationen für die Integration digitaler, datenbasierter Lernumgebungen im Chemieunterricht. Sie beleuchtet Chancen und Limitationen solcher Systeme bei der Verständnisförderung komplexer

naturwissenschaftlicher Konzepte und benennt zentrale Entwicklungsfelder für künftige Forschung – insbesondere im Hinblick auf die Konzeption, Umsetzung und Evaluation datenbasierter Feedbackmechanismen, die Unterstützung von Lehrkräften sowie die Gestaltung nachhaltiger und skalierbarer digitaler Lösungen.