

Wie verknüpfen Schüler:innen Reaktion, Energie und Struktur?

Energie als Schlüsselkonzept der Fachwissenschaft Chemie

Der Nobelpreis Chemie wurde im Jahr 2021 an Benjamin List und David MacMillan für die Erforschung der asymmetrischen Organokatalyse verliehen (List 2007). Sie zeigten, dass relativ einfach organische Moleküle als Katalysatoren genutzt werden können, um gezielt bestimmte Enantiomere zu synthetisieren. Aber wie kann es sein, dass das eine Spiegelbild eines Moleküls schneller reagiert als das andere? Aus einer Metaperspektive versucht chemische Forschung diese Reaktivität auf strukturelle Eigenschaften der Moleküle zurückzuführen. Ein solche Eigenschaft kann z.B. sein, dass der chirale Katalysator mit dem aromatischen System eines der Enantiomere besonders starke attraktive Wechselwirkungen ausbilden kann und somit diese Reaktion deutlich beschleunigt wird (Pöloth, Sibi & Zipse 2021). Allerdings ist ein solcher Rückbezug auf chemische Strukturen nur die indirekte Antwort auf die Frage nach der Reaktivität (Goodwin 2007). Die unmittelbare Ursache für solche Reaktivitätsunterschiede ist vielmehr die (Gibbs-)Energie der im Verlauf der Reaktion durchlaufenen Strukturen. Quantenchemische Rechnungen erlauben es heutzutage diese Unterschiede zu quantifizieren und damit Reaktivitätsunterschiede direkt zu erklären (Grimme & Schreiner 2018). Abb. 1 fasst ein solches Wissenschaftsverständnis moderner (organischer) Chemie zusammen. Aus einer theoretisch-chemischen Perspektive kann Jensen (2007) Chemie weiterführend folgendermaßen beschreiben:

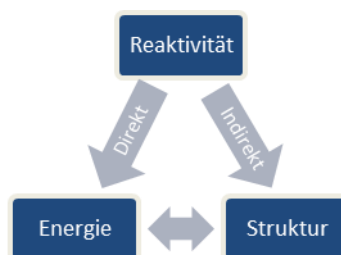


Abb. 1: Schematische Darstellung des Wissenschaftsverständnisses der modernen Chemie

„Chemistry is knowing the energy as a function of nuclear coordinates.“

In diesem Sinne lassen sich zentrale chemische Konzepte auf energetische Eigenschaften zurückführen (Nahum, Mamlok-Naaman, Hofstein & Krajcik 2007):

- Chemische Verbindungen sind die räumlichen Anordnungen von Atomen, die einer minimalen Energie entsprechen
- Chemische Reaktionen sind Umordnungen von Atomen zur Energieminimierung
- Reaktionsmechanismen beschreiben die Reaktionswege, in denen minimale Energiebarrieren überschritten werden müssen

Empirische Ergebnisse zum Konzeptverständnis Energie

Aufgrund dieser herausragenden Rolle der Energie für die Chemie ist es folgerichtig, dass sie als eines der Basiskonzepte für die allgemeine Hochschulreife im Fach Chemie (Kultusministerkonferenz 2020) definiert wurde. Bernholt, Höft & Parchmann (2020) untersuchten kürzlich, wie sich die Kompetenzen von Schüler:innen bezüglich der fachlichen Basiskonzepte entwickeln. Dabei zeigte sich, dass vor allem die Kompetenz im Umgang mit dem Energiekonzept generell schwach ausgeprägt ist, während der Schullaufbahn nur wenig

zunimmt und nicht im Zentrum des Schulunterrichts zu stehen scheint. Energetisches Wissen ist dabei häufig fragmentiert und wenig kohärent (Podschuweit & Bernholt 2020). Nahum, Mamlok-Naaman, Hofstein & Krajcik (2007) berichten, dass viele Lernende energetische Begriffe wie z.B. „stabil“ nutzen, ohne mit diesen Begriffen tatsächliche Ideen zu verknüpfen. Zusammenhänge zwischen Vorgängen auf Stoff- und Teilchenebene scheinen insbesondere im Bereich der Energetik für viele Lernende wenig greifbar zu sein (Macrie-Shuck & Talanquer 2020). Diese Defizite im Konzeptverständnis haben auch Auswirkungen auf andere zentrale Konzepte der Chemie: So ist die Vorstellung eines exothermen Bindungsbruchs eine der häufigsten alternativen Lernendenvorstellungen zu chemischen Bindungen (Hunter, Rodriguez & Becker 2022). In Bezug auf reaktionsmechanistische Argumentationsweisen zeigt sich, dass energetische Aspekte von Studierenden sogar dann vernachlässigt werden, wenn sie kurz vorher in Tutorials explizit hervorgehoben wurden (Eckhard, Rodemer, Bernholt & Graulich 2022). Reaktionskoordinatendiagramme als zentrale Darstellung der Zusammenhänge von Energie, Reaktion und Struktur werden von vielen Studierenden wenig produktiv verwendet (Popova & Bretz 2018).

Andrea diSessa bietet mit „Knowledge in Pieces“ (diSessa 2014) einen Rahmen für einen produktiven Umgang mit den Vorstellungen von Lernenden. Die Annahme ist dabei, dass Lernendenvorstellungen nicht in sich abgeschlossene (Fehl-)Konzepte sind, sondern es sich um ein lockeres Netzwerk diverser kognitiver „Ressourcen“ handelt, die je nach Kontext aktiviert werden (Hammer, Elby, Scherr & Redish 2005). Diese Aktivierung entscheidet, inwiefern Wissen produktiv zur Lösung eines spezifischen Problems genutzt werden kann. Zur Gestaltung von Lernprozessen ist es deshalb zielführend, durch empirische Studien produktive Anknüpfungspunkte im Vorwissen zu identifizieren und Lernprozesse in Mikrostudien zu untersuchen (diSessa 2014).

Ziel der Arbeit und Forschungsfragen

Daher sollen in einem aktuellen Projekt die kognitiven Ressourcen mit Bezug zum Energiekonzept identifiziert werden, die Schüler:innen zur Lösung einer chemischen Fragestellung aktivieren. Diese Anknüpfungspunkte sollen anschließend genutzt werden, um mit Hilfe eines Design-Based Research Ansatzes zu untersuchen, wie kohärentes Konzeptwissen durch die Erschließung computerchemischer Experimente für Schüler:innen gefördert werden kann. Im Folgenden wird als erste Stufe des Gesamtprojekts die Methodik für die empirische Untersuchung des Konzeptverständnisses beschrieben. Dabei sollen die folgenden Forschungsfragen beantwortet werden:

- Mit welchen **energetischen** Vorstellungen erklären Schüler:innen *kinetische* (Aktivierung) und *thermodynamische* (Wärmeentwicklung, Triebkraft) Eigenschaften einer chemischen **Reaktion**?
- Inwiefern argumentieren Schüler:innen mit potentieller **Energie** als abhängiger Größe der chemischen **Struktur** (im Sinne der Anordnung von Atomen)?
- Wie nutzen und interpretieren Schüler:innen *Reaktionskoordinatendiagramme* zur Erklärung der Zusammenhänge von **Energie, Struktur und Reaktion**?

Entwicklung des Interviewleitfadens

Die Entwicklung des Interviewleitfadens orientierte sich an den folgenden Prinzipien: In der empirischen Hochschuldidaktik wurden bereits einige qualitative Studien zu verschiedenen

Aspekten des Konzeptverständnisses der Energie durchgeführt. Es ist jedoch unklar, inwiefern sich diese Ergebnisse auf Oberstufenschüler:innen in deutschen Schulsystemen übertragen lassen. Deshalb orientiert sich der Interviewleitfaden zum Teil an erprobten Fragestellungen der Hochschulforschung (Becker & Cooper 2014; z.B. Macrie-Shuck & Talanquer 2020). Zweitens soll sich das Interview an energetischen Aspekten einer spezifischen Reaktion orientieren, um die Produktivität der aktivierten kognitiven Ressourcen zur Problemlösung untersuchen zu können. Diese Reaktion sollte exotherm sein und experimentell zu einer gut beobachtbaren Veränderung führen, um Argumentationslinien zur Verknüpfung von Stoff- und Teilchenebene untersuchen zu können. Außerdem sollten möglichst wenige Atome an der Reaktion beteiligt sein, um für das Folgeprojekt eine einfache computerchemische Untersuchung zu ermöglichen. Aufgrund dieser Kriterien wurde für das Interview die Reaktion von elementarem Wasserstoff- und Chlorgas als Kontext gewählt. Die Reaktion wurde gefilmt und zur Problemstellung präsentiert. Als dritte Leitlinie orientieren sich die Fragen an Prinzipien der physikalischen Chemie: Für den Bereich der Kinetik wurde die Leitfrage „Weshalb braucht es den Funken am Anfang der Reaktion?“ gewählt, für den Bereich der Thermodynamik die Fragen „Weshalb wird die Reaktionsmischung warm?“ und zur Triebkraft die Frage „Warum läuft überhaupt eine Reaktion ab?“. Für alle Teilfragen wird eine tiefgehende Analyse durch ein System von gestuften Nachfragen vorstrukturiert. Zusätzlich werden die Schüler:innen aufgefordert grafische Elemente zu nutzen, um Reaktionskoordinatendiagramme in die Analyse aufnehmen zu können.

In der ersten Pilotierungsphase wurden die Interviews als Einzelinterviews geführt. Dabei zeigte sich, dass die Interviewenden eine sehr starke inhaltliche Führung übernahmen und ungewünschte Prüfungssituationen auftraten. Um dies zu vermeiden, wurde das Vorgehen so abgeändert, dass die Proband:innen den Arbeitsauftrag bekamen, die vorliegende Reaktion einem Nachhilfeschüler aus der zehnten Klasse zu erklären, der die oben genannten Leitfragen stellt. Nach einer Vorbereitungszeit konnten die Proband:innen die Rolle der Nachhilfelehrkraft übernehmen. Durch diese Änderung wurde es möglich in einem weniger gelenkten Setting zu analysieren, welche kognitiven Ressourcen durch das Problem aktiviert wurden. Während der erneuten Pilotierung des geänderten Vorgehens zeigte sich, dass die Interviewsituation nach wie vor sehr asymmetrisch wirkte, während die un gelenkte Vorbereitungszeit nicht für die Analyse genutzt werden konnte. In einem weiteren Überarbeitungsschritt wurde deshalb ein Fokusgruppen-Setting gewählt, so dass auch die Kommunikation der Schüler:innen miteinander vor und während des Interviews ausgewertet werden konnte.

Durchführung der Studie

Für die Studie wurden qualitative Interviews mit 38 Schüler:innen in 16 Gruppen aus fünf verschiedenen Schulkursen geführt. Die Interviews fanden im Rahmen eines Schülerlaborbesuchs statt, die Teilnahme war freiwillig und nur mit schriftlicher Einverständniserklärung von Schüler:innen und ggf. Eltern möglich. Alle Schüler:innen belegten das Leistungsfach Chemie eines Gymnasiums oder eines beruflichen Gymnasiums und besuchten die 11. – 13. Klasse. Über einen Fragebogen wurden deskriptive Daten, Chemienoten und das Fachinteresse Chemie sowie das Fähigkeitsselbstkonzept Chemie mit literaturbekanntem, reliablen Skalen erfasst.

Ausblick

Die Interviews werden derzeit im Rahmen einer qualitativen Inhaltsanalyse nach Kuckartz (2016) ausgewertet, um die Ressourcen der Schüler:innen im Bereich der Energetik zu identifizieren. Auf dieser Basis soll ein Netzwerk der produktiven Ressourcen für energetische Fragestellungen entwickelt werden. Daran anknüpfend soll exploriert werden, inwiefern das Konzeptverständnis von Schüler:innen durch die Durchführung computerchemischer Experimente gefördert werden kann.

Literatur

- Becker, N.M. & Cooper, M.M. (2014). College chemistry students' understanding of potential energy in the context of atomic-molecular interactions. *Journal of Research in Science Teaching*, 51(6), 789–808.
- Bernholt, S., Höft, L. & Parchmann, I. (2020). Die Entwicklung fachlicher Basiskonzepte im Chemieunterricht – Findet ein kumulativer Aufbau im Kompetenzbereich Fachwissen statt? *Unterrichtswissenschaft*, 48(1), 35–59.
- diSessa, A.A. (2014). A History of Conceptual Change Research. In Sawyer, R.K. (Hrsg.), *The Cambridge Handbook of the Learning Sciences* (S. 88–108). Cambridge: Cambridge University Press.
- Eckhard, J., Rodemer, M., Bernholt, S. & Graulich, N. (2022). What Do University Students Truly Learn When Watching Tutorial Videos in Organic Chemistry? An Exploratory Study Focusing on Mechanistic Reasoning. *Journal of Chemical Education*, 99(6), 2231–2244.
- Goodwin, W. (2007). Scientific Understanding after the Ingold Revolution in Organic Chemistry. *Philosophy of Science*, 74(3), 386–408.
- Grimme, S. & Schreiner, P.R. (2018). Computational Chemistry: The Fate of Current Methods and Future Challenges. *Angewandte Chemie International Edition*, 57(16), 4170–4176.
- Hammer, D., Elby, A., Scherr, R.E. & Redish, E.F. (2005). Resources, framing, and transfer. In Mestre, J. (Hrsg.), *Transfer of Learning from a Modern Multidisciplinary Perspective* (S. 89–120). Greenwich, CT: Information Age Publishing.
- Hunter, K.H., Rodriguez, J.-M.G. & Becker, N.M. (2022). A Review of Research on the Teaching and Learning of Chemical Bonding. *Journal of Chemical Education*, 99(7), 2451–2464.
- Jensen, F. (2007). *Introduction to computational chemistry*, Chichester England, Hoboken NJ: John Wiley & Sons.
- Kuckartz, U. (2016). *Qualitative Inhaltsanalyse. Methoden, Praxis, Computerunterstützung*, Weinheim: Beltz.
- Kultusministerkonferenz (2020). *Bildungsstandards im Fach Chemie für die Allgemeine Hochschulreife*.
- List, B. (2007). Introduction: Organocatalysis. *Chemical Reviews*, 107(12), 5413–5415.
- Macrie-Shuck, M. & Talanquer, V. (2020). Exploring Students' Explanations of Energy Transfer and Transformation. *Journal of Chemical Education*, 97(12), 4225–4234.
- Nahum, T.L., Mamlok-Naaman, R., Hofstein, A. & Krajcik, J. (2007). Developing a new teaching approach for the chemical bonding concept aligned with current scientific and pedagogical knowledge. *Science Education*, 91(4), 579–603.
- Podschuweit, S. & Bernholt, S. (2020). Investigating Network Coherence to Assess Students' Conceptual Understanding of Energy. *Education Sciences*, 10(4), 103.
- Pölloth, B., Sibi, M.P. & Zipse, H. (2021). The Size-Accelerated Kinetic Resolution of Secondary Alcohols. *Angewandte Chemie International Edition*, 60(2), 774–778.
- Popova, M. & Bretz, S.L. (2018). Organic chemistry students' challenges with coherence formation between reactions and reaction coordinate diagrams. *Chemistry Education Research and Practice*, 19(3), 732–745.