

doi.org/10.1002/ckon.202200007

Die Zeichnung im Blick – Nutzung von Eye-Tracking zur Analyse der zeichnerischen Erschließung von Mesomerie-Aufgaben

Irina Braun und Nicole Graulich*^[a]

Zusammenfassung: Das Zeichnen von Strukturformeln ist in der Organischen Chemie von großer Bedeutung, da Strukturdarstellungen ein wichtiges Kommunikationsmittel und Werkzeug im Problemlöseprozess darstellen. Anhand der Konstruktion mesomerer Grenzformeln ist es beispielsweise möglich, Reaktivitäten und Struktureigenschaften von Verbindungen abzuleiten. Obwohl in der fachdidaktischen Forschung herausgestellt wurde, dass Lernenden das Mesomerie-Konzept Schwierigkeiten bereitet, wurde der Zeichenprozess von mesomeren Grenzformeln bisher nicht betrachtet. Dabei hilft der Einsatz von Eye-Tracking, das Zeichnen prozessbezogen und detailliert zu beleuchten. Der vorliegende Beitrag präsentiert daher exemplarisch anhand von Ausschnitten einer Studie zur Untersuchung der Zeichenprozesse von Studierenden zu mesomeren Grenzformeln, welche Möglichkeiten die Nutzung von Eye-Tracking zur Analyse von Zeichenprozessen bietet.

Stichworte: Zeichenprozesse in der Organischen Chemie · Eye-Tracking · Mesomerie · Hochschulfachdidaktik

Keeping an eye on the drawing – Using eye-tracking to analyze the drawing process of resonance tasks

Abstract: Drawing structural formulas is of great importance in organic chemistry. As such, they serve as an important communication and problem-solving tool. By constructing resonance structures, it is possible, for example, to derive reactivities and structural properties of compounds. Although chemistry education research has emphasized the difficulties that learners encounter concerning the resonance concept, the drawing process of resonance structures has not been examined yet. In this regard, the use of eye-tracking can help to shed light on the drawing process in a process-oriented and detailed manner. Therefore, this paper presents excerpts of a study investigating the drawing process of resonance structures as an example to show the possibilities that the use of eye-tracking offers for analyzing construction processes.

Keywords: drawing processes in organic chemistry · eye-tracking · resonance · higher education

1. Einleitung

Zahlreiche Forschungsarbeiten betonen die Effektivität von Zeichenaktivitäten für das Lernen in den Naturwissenschaften. So regt das Zeichnen eine aktive und nachhaltige Auseinandersetzung mit naturwissenschaftlichen Inhalten an, ermöglicht einen interaktiven Austausch und fungiert als Diagnoseinstrument, um Vorstellungen von Lernenden zu erfassen [1–4]. In der Chemie nehmen Zeichnungen jedoch nicht nur eine lernunterstützende Funktion ein, sondern stellen ein essenzielles Denk- und Kommunikationsmittel dar [5,6]. In der Organischen Chemie kann etwa das Zeichnen von Strukturformeln erforderlich sein, um mithilfe der enkodierten Informationen Reaktionsprozesse zu visualisieren, Struktureigenschaften von Molekülen darzustellen oder Hypothesen über Reaktionsverläufe abzuleiten. Folglich sind diese Repräsentationen ein grundlegendes Werkzeug im organisch-chemischen Problemlöseprozess [5]. Allerdings ist zu deren Entstehungsprozess beim Zeichnen nur sehr wenig bekannt.

Das Mesomerie-Konzept, als fundamentales Konzept in der Organischen Chemie [7], ist eng mit dem zeichnerischen Prozess verbunden. Durch das Konstruieren von mesomeren Grenzformeln ist es möglich, die Strukturen (z. B. Bindungslängen) und chemischen Eigenschaften (z. B. Säurestärke) von Verbindungen zu erklären, die sich nicht adäquat durch eine einzige Lewisformel darstellen lassen. Ebenso kann dieses Konzept helfen, eine Vielzahl an Reaktionen vorherzusagen (z. B. Diels-Alder- und Additionsreaktionen) [8].

Ogleich die fachdidaktische Forschung betont, dass das Mesomerie-Konzept Studierenden Schwierigkeiten bereitet und es Hinweise darauf gibt, dass sie beim Zeichnen häufig unreflektiert und intuitiv vorgehen [9–13], wurde der Zeichenprozess von mesomeren Grenzformeln bisher nicht näher untersucht. Zur Charakterisierung des Zeichenprozesses von Strukturformeln aus der Lernendenperspektive bietet sich die Nutzung von Eye-Tracking an. Durch das Aufzeichnen von Blickbewegungen wird quantitativ die visuelle Verarbeitung von Stimuli erfasst, wodurch Rückschlüsse hinsichtlich der zugrunde liegenden kognitiven Prozesse sowie der strategischen Herangehensweisen von Lernenden beim Zeichnen gezogen werden können [14]. Ausgehend davon lassen sich der Zeichenprozess charakterisieren und etwaige Hürden aufdecken. Die Nutzung von Eye-Tracking ermöglicht eine Erweiterung der Perspektive im Vergleich zu Methoden des Lauten Denkens. In dieser hier exemplarisch vorgestellten Studie lassen sich damit beispielsweise folgende Forschungsfragen untersuchen:

1. Wie nutzen und verknüpfen Lernende Informationen bei der Erstellung von mesomeren Grenzformeln?

[a] I. Braun, Prof. Dr. N. Graulich
Justus-Liebig-Universität Gießen
Henrich-Buff-Ring 17
35392 Gießen

* E-Mail: Nicole.Graulich@didaktik.chemie.uni-giessen.de

© 2022 The Authors. CHEMKON published by Wiley-VCH GmbH. This is an open access article under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial NoDerivs License, which permits use and distribution in any medium, provided the original work is properly cited, the use is non-commercial and no modifications or adaptations are made.

2. Wie unterscheiden sich die Blickbewegungen von erfolgreichen und erfolglosen Lernenden bei der Konstruktion von mesomeren Grenzformeln?

Aus diesem Grund verfolgt der vorliegende Beitrag das Ziel, anhand einer Studie zum Zeichenprozess mesomerer Grenzformeln exemplarisch aufzuzeigen, welchen Mehrwert die Nutzung von Eye-Tracking zur Analyse von Zeichenprozessen liefern kann. Hierzu sollen die Methode des Eye-Trackings dargestellt und beispielhaft Analysemöglichkeiten zur Nutzung dieser Methode bezüglich der Untersuchung von Zeichenprozessen aufgezeigt werden.

2. Fachdidaktischer Forschungsstand zum Mesomerie-Konzept

Die sichere Beherrschung des Mesomerie-Konzepts bildet einen wichtigen Baustein für den Lernerfolg in der Organischen Chemie, wohlgleich es aufgrund seiner Abstraktheit und Komplexität ein anspruchsvolles Konzept darstellt [9,10]. Dies schlägt sich in konzept- und anwendungsbezogenen Lernschwierigkeiten nieder, welche für den Hochschulbereich untersucht und beschrieben wurden. Oftmals weisen Studierende auf konzeptueller Ebene unzureichende oder naive Präkonzepte auf, beispielsweise, dass mesomere Grenzformeln distinkte, sich im Gleichgewicht befindende Entitäten seien [12,15]. Dies hängt häufig mit einem fragmentierten Wissen in Bezug auf Mesomerie zusammen. So beschreiben Studierende zum Beispiel, wie bei der Konstruktion von mesomeren Grenzformeln vorzugehen sei, ohne auf konzeptuelle Aspekte (z. B. Hybridisierungen) einzugehen oder sie sind nur teilweise in der Lage, Mesomerie adäquat mit Konzepten wie Stabilität oder Reaktivität zu verknüpfen [11,12]. Die Ursachen hierfür sind unter anderem in der universitären Instruktion zu verorten. So existiert eine zeitliche Diskrepanz zwischen der Einführung des Konzepts und der problemorientierten Anwendung von Mesomerie. Letzteres beschränkt sich zudem häufig nur auf einzelne Themengebiete (z. B. Säurestärken, elektrophile aromatische Substitution) [13].

Ein unzureichendes Verständnis des Konzepts führt schließlich dazu, dass Lernende nicht in der Lage sind, Mesomerie erfolgreich in Problemaufgaben anzuwenden. Hierzu konnte kürzlich am Kontext von Säure-Base- und Additionsreaktionen aufgezeigt werden, dass Studierende Mesomerie im Vergleich zu anderen Konzepten (z. B. Sterik und Hyperkonjugation) nur selten zur Bestimmung von Reaktionswegen heranziehen [16,17]. Zudem haben sie Probleme, Mesomerie korrekt auf die gegebenen Reaktionen anzuwenden, entweder, weil sie keinen Anfangspunkt zum Zeichnen finden oder weil sie Mesomerie auf eine falsche, für den Reaktionsverlauf irrelevante, Struktur anwenden [16,17]. Auch ein genauere Blick auf die Zeichenprodukte zeigt, dass Studierende selbst nach zwei Semestern Lehre in Organischer Chemie fehlerhafte mesomere Grenzformeln zeichnen, welche beispielsweise die Oktettregel verletzen oder durch willkürliches Zeichnen (z. B. Vernachlässigung der Atomhybridisierung) entstehen [10]. Obwohl hierdurch deutlich wird, dass Studierenden das Zeichnen schwerfällt, bleibt weiterhin offen, welche Hürden und Handlungen im Zeichenprozess diesen Problemen zugrunde liegen. Der Einbezug von Eye-Tracking kann dabei helfen, diese Aspekte zu untersuchen.

3. Einsatz von Eye-Tracking als Forschungsmethode

Während Eye-Tracking zunächst in der Psychologie und der Leseforschung intensiv genutzt wurde, hat es in den letzten Jahren auch Einzug in die Chemiedidaktik erhalten [14]. Bei-

spielsweise wird Eye-Tracking zum Vergleich von Blickbewegungsmustern von Experten und Novizen [18], zur Identifikation von Problemlösestrategien [19,20] oder zum Testen von Instruktionsdesigns [21] herangezogen. Durch das Aufzeichnen von Blickbewegungen mithilfe eines Eye-Trackers lassen sich Einblicke in die Aufmerksamkeitsverteilung und die zugrunde liegenden kognitiven Prozesse während der Verarbeitung von Stimuli gewinnen, die beispielsweise die prozessbezogene Untersuchung des (un-)bewussten Zeichnens ermöglichen [14].

Die Verknüpfung von Blickpunkten mit kognitiven Prozessen beruht dabei auf zwei Annahmen, die zumindest bei komplexeren Prozessen (z. B. Lesen) gelten [22,23]:

- Unmittelbarkeithypothese (immediacy assumption) [22]: Die kognitiven Auswertungsprozesse setzen unmittelbar bei der visuellen Aufnahme des Stimulus ein.
- Auge-Geist-Hypothese (eye-mind assumption) [22]: Solange der Stimulus betrachtet wird, wird er vom Geist verarbeitet.

Visuelle Prozesse basieren auf der Abfolge von Fixationen (Verweilen der Augen auf Stimuli) und Sakkaden (Sprünge zwischen aufeinanderfolgenden Fixationen) [23]. Diese Blickbewegungen können in einer Vielzahl von Metriken zur Analyse von Blickbewegungen in definierten Bereichen des visuellen Stimulus (Area of Interest, AOI) angewendet werden. Lai et al. [24] unterscheiden drei Arten von Metriken. Während die Zeit-Metriken die zeitliche Dimension von Blickbewegungen erfassen (z. B. Fixationsdauer einer AOI), bilden die räumlichen Metriken die Lokalisierung und die räumliche Beziehung zwischen Blickpunkten ab (z. B. Fixationssequenz). Die Zähl-Metriken zentrieren auf die Blickbewegungsfrequenz (z. B. Fixationsanzahl) [24].

Obwohl Eye-Tracking die Blickrichtung und -dauer einer Person anzeigt, wird durch diese Methode nicht deutlich, warum eine Person auf etwas schaut, sodass die Daten stets mit weiteren quantitativen oder qualitativen Methoden trianguliert werden müssen (z. B. Interviews). Es gibt ferner keine standardisierte Interpretationsmöglichkeit der Daten, da diese häufig kontextabhängig ist (z. B. kann eine längere Fixation für Interesse oder eine kognitive Überforderung stehen) [14]. Dennoch bietet Eye-Tracking gerade für die Untersuchung von Zeichenprozessen Vorteile. Gegenüber anderen Metho-



Irina Braun studierte Chemie und Französisch für das Lehramt an Gymnasien an der Justus-Liebig-Universität Gießen. Seit Oktober 2020 arbeitet sie als wissenschaftliche Mitarbeiterin am Institut für Didaktik der Chemie an der Justus-Liebig-Universität Gießen an ihrer Promotion zum Thema Zeichnerische Problemlöseprozesse von Studierenden in der Organischen Chemie.



Nicole Graulich studierte Chemie und Französisch für das Gymnasiallehramt und legte 2012 das Zweite Staatsexamen am Studien-seminar Gießen ab. Nach einem Post-Doc-Aufenthalt in Clemson, South Carolina ist sie seit Oktober 2014 geschäftsführende Direktorin des Instituts für Didaktik der Chemie an der Justus-Liebig-Universität Gießen. Sie ist Mitglied der AG Digitalisierung der Fachgruppe Chemieunterricht der GDCh.

den wie beispielsweise dem Lauten Denken, bei welchem Lernende ihre bewusst erinnerten Denkvorgänge während der Aufgabenverarbeitung verbalisieren und so einen Einblick in kognitive Prozesse (z.B. Handlungsstrategien) ermöglichen [25], bietet Eye-Tracking den Mehrwert, ohne in die Aufgabenbearbeitung einzugreifen, das schrittweise Fortschreiten der Problemlösung anhand der Blickbewegungen zu erfassen. Eine Triangulation der erfassten Blickbewegungen mit einer anschließenden Retrospektive ermöglicht ein differenzierteres Bild des tatsächlichen Problemlöseprozesses der Lernenden [26]. Auf diese Weise werden problemlösebezogene Handlungen wie längere Verweildauern, Suchprozesse oder (unbewusste) Bedeutungszuschreibungen während des Zeichnens evident, die sonst unentdeckt bleiben. Hieraus ergeben sich wiederum neue, prozessbezogene Analyseperspektiven auf den Zeichenprozess. Diese Möglichkeiten sollen im Folgenden illustriert werden.

4. Eye-Tracking-Studie im Zusammenhang mit organisch-chemischen Problemlöseaufgaben im Kontext Mesomerie

Die beschriebene Untersuchung des Entstehungsprozesses von mesomeren Grenzformeln ist Teil einer Studie zur Untersuchung der Nutzung von Zeichnungen in organisch-chemischen Problemlöseaufgaben. Hierzu wurde an einer deutschen Universität im Sommersemester 2021 eine qualitative Studie mit 21 Studierenden durchgeführt. Die neun männlichen und zwölf weiblichen Teilnehmenden waren zwischen 19 und 34 Jahre alt (durchschnittliches Alter: 24 Jahre), befanden sich zwischen dem zweiten und zehnten Fachsemester und studierten Chemie im Hauptfach (Chemie B.Sc., Lebensmittelchemie B.Sc., gymnasiales Lehramt Chemie). Alle Teilnehmenden haben entweder im Sommersemester 2021 oder in einem vorherigen Semester die Veranstaltung „Organische Chemie 1“ belegt und verfügten somit über grundlegende Kenntnisse in der Organischen Chemie. Damit einher geht, dass die Teilnehmenden mit dem Zeichnen von mesomeren Grenzformeln vertraut waren. Diese wurden in der ersten Vorlesungswoche eingeführt und in der Veranstaltung nachfolgend wiederkehrend in unterschiedlichen Themengebieten (z.B. Aromatenchemie) verwendet. Eine Probandin wurde von der Analyse aufgrund technischer Probleme im Zusammenhang mit dem Eye-Tracker ausgeschlossen.

Die Erhebung umfasste semistrukturierte Einzelinterviews, in welchen zunächst das Vorwissen zum Mesomerie-Konzept erfasst wurde. Danach bearbeiteten die Teilnehmenden drei Aufgaben, auf die jeweils eine Retrospektive zu ihrem Zeichen- und Problemlöseprozess folgte. Abschließend wurden in einer Reflexionsphase allgemeine Schwierigkeiten bezüglich der Aufgabenbearbeitung thematisiert. Die Aufgaben umfassen drei kontextuell unterschiedliche Fallvergleichsaufgaben [27], welche die Anwendung des Mesomerie-Konzepts erfordern. Während die erste Aufgabe die elektrophile aromatische Zweitsubstitution und die zweite den ersten Schritt einer Verseifung thematisieren, fokussiert die dritte den ersten Schritt einer Substitutionsreaktion (Abb. 1).

Zur besseren Erfassung der Blickbewegungen lösten die Studierenden die Aufgaben im DIN A2-Format auf einem angewinkelten Zeichentisch (Abb. 2). Dabei kam eine mobile Eye-Tracking-Brille (Tobii Pro Glasses 3, 60 Hz) zum Einsatz.

3) Begründen Sie zeichnerisch, welche Verbindung das stabilere Carbenium-Ion bildet.

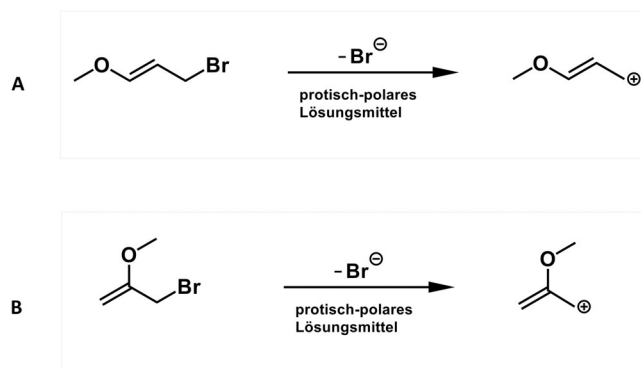


Abb. 1: Verwendete Fallvergleichsaufgabe für den Dissoziationschritt einer S_N1 -Reaktion.

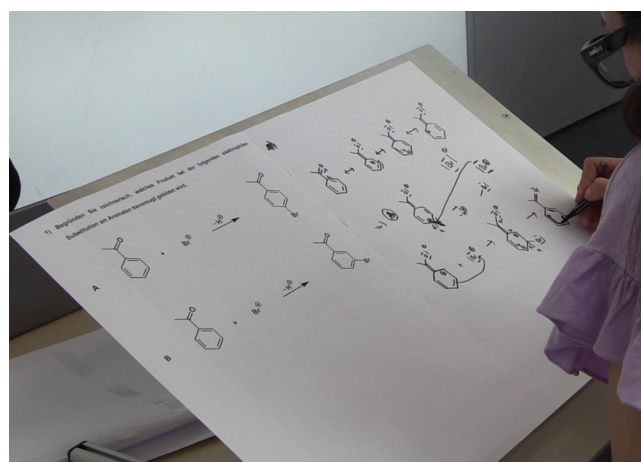


Abb. 2: Beispiel für das Erhebungssetting, bei dem eine Probandin eine Aufgabe im DIN A2-Format auf einem angewinkelten Zeichentisch bearbeitet und eine Eye-Tracking-Brille trägt.

5. Welche zusätzlichen Einblicke liefern die Eye-Tracking-Daten bei der Betrachtung des Zeichenprozesses?

Visuelle Prozesse, wie das Dekodieren und Erstellen von Strukturen, prägen das Zeichnen in der Chemie. Durch die direkte Verfolgung der Blickbewegungen während des Zeichnens kann Eye-Tracking auf unterschiedliche Weise gewinnbringend zur Charakterisierung des Zeichenprozesses mesomere Grenzformeln beitragen, wie nachfolgende exemplarische Analysemöglichkeiten anhand einzelner Erhebungsdaten der Studienteilnehmenden illustrieren.

5.1 Komplementierung der Interviewdaten

So können die erfassten Blickbewegungen im Zusammenhang mit den Interviews genutzt werden, um im begleitenden Gespräch auffällige Blickbewegungen weiterführend zu thematisieren, den Gedankengang der Studierenden zu untermauern bzw. zu ergänzen oder auch Inkongruenzen zum Gesagten aufzuzeigen [19,26]. Zur Illustration kann Leons Erläuterung im Zuge der dritten Aufgabe betrachtet werden, welche auf die Konstruktion der orange hinterlegten mesomeren Grenzformel in Reaktion B (Abb. 3) abzielt: „Und hier habe ich lange überlegt, ob ich es überhaupt hinzeichnen soll oder ob es mir überhaupt weiterhilft. Aber ich würde sagen, nein, es hilft mir nicht weiter.“ Obwohl diese Äußerung nur verdeutlicht, dass

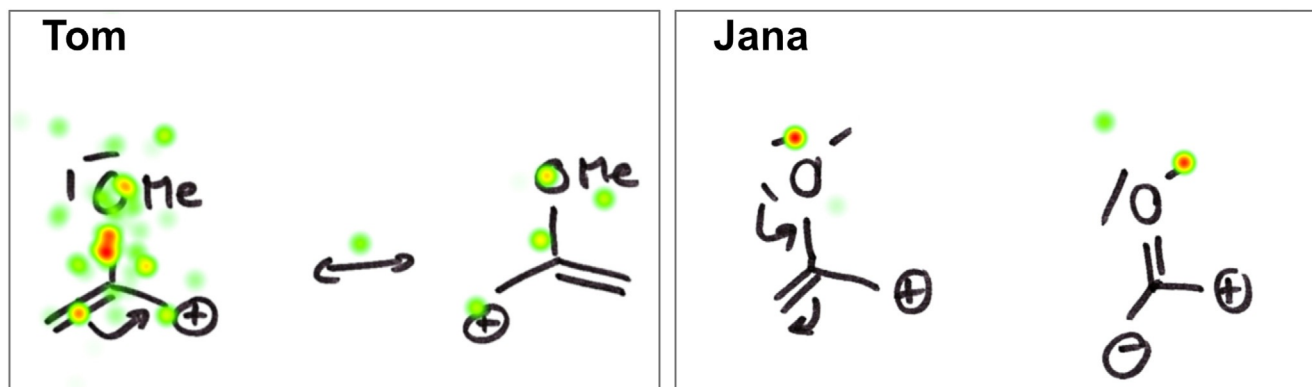


Abb. 4: Heat Maps zu Toms und Janas Konstruktionsprozess einer mesomeren Grenzformel in Aufgabe 3.

dauer entsprechender Stellen indiziert [28]. Trotz gleicher Ausgangsstruktur zeigen die Lage der Blickpunkte und die Intensität der Verweildauer in den beiden Heat Maps, dass Tom während des Zeichnens Merkmale der gesamten Strukturformel fixiert hat, was in einer korrekten Strukturformel resultierte. Janas falsche Strukturformel ergab sich hingegen aus einer längeren, ausschließlichen Betrachtung der Methoxygruppe. Folglich ist es unter Einbezug der Blickbewegungen ebenso möglich, zu untersuchen, ob das Zeichnen falscher bzw. korrekter mesomere Grenzformeln mit bestimmten Mustern der Aufmerksamkeitsverteilung auf einzelne Stimuli der Strukturen zusammenhängt.

5.4 Limitationen in der Erhebung und Auswertung von Zeichenprozessen mit Eye-Tracking

Der Einbezug von Eye-Tracking ermöglicht unterschiedliche Möglichkeiten zur Charakterisierung von Zeichenprozessen in der Organischen Chemie, jedoch ist die Erhebung und Auswertung der Daten nicht unproblematisch. Zur Erfassung von Zeichenprozessen durch Lernende eignen sich mobile Eye-Tracker. Diese weisen allerdings technische Messungenauigkeiten auf, die unter anderem durch das variable Sichtfeld und die sich dadurch ändernden Lichtverhältnisse, die Bewegung des Kopfes und das Verrutschen der Brille infolge eines längeren Messzeitraums bedingt sind. Aus diesem Grund sollten Maßnahmen zur Reduzierung der Messungenauigkeiten ergriffen werden. Während der Erhebung sollte beispielsweise auf das Anfertigen ausreichend großer Zeichnungen durch die Lernenden geachtet werden, damit die Fixierungen im Molekül genauer erfasst werden können. Ebenso sollte während der Erhebung immer wieder kalibriert bzw. die Messgenauigkeit validiert werden. Die Messungenauigkeiten wirken sich ferner auf die Auswertung aus. Während in unseren Beispielen zur Illustration ideale Heat Maps verwendet wurden, kommt es oftmals zur systematischen Verschiebung der Blickpunkte ober- oder unterhalb der Strukturen, wodurch Visualisierungen wie Heat Maps mit Vorsicht interpretiert werden sollten. Zur Korrektur der systematischen Fehler sollte bei der Auswertung unter Hinzunahme von Metriken darauf geachtet werden, die AOI möglichst groß zu setzen und gegebenenfalls manuell zu verschieben. Schließlich stellt die Analyse der Blickmuster nur einen Teilaspekt der Diagnose von zeichenbezogenen Schwierigkeiten dar, welche Aufschluss über die Fragen, was bzw. wie etwas genutzt worden ist, gibt. Die Blickpunkte geben an sich keine Auskunft über die konzeptuellen Schwierigkeiten, die jedoch ebenfalls einen bedeutenden Einfluss auf Zeichenhürden im Zusammenhang mit mesomeren Grenzformeln haben können. Aus diesem Grund sollten diese stets mit untersucht werden.

6. Ausblick

Ziel des vorliegenden Beitrags war es, am Beispiel einer Studie zum Zeichenprozess mesomere Grenzformeln zu veranschaulichen, welchen Mehrwert Eye-Tracking hinsichtlich der Untersuchung von Konstruktionsprozessen bieten kann. Hierbei konnte herausgestellt werden, dass das Aufzeichnen von Blickbewegungen zum einen genutzt werden kann, um Interviewdaten zu komplementieren und folglich den Problemlöseprozess umfassender abzubilden. Zum anderen stellt Eye-Tracking ein wertvolles Analysetool dar, mit dessen Hilfe die prozessbezogenen zeichnerischen Herangehensweisen der Lernenden untereinander verglichen und die Konstruktion einzelner Strukturformeln beleuchtet werden können. Dies kann angesichts der herausgestellten Schwierigkeiten, die die Studierenden in Bezug auf das Zeichnen von mesomeren Grenzformeln aufweisen, unterstützend für die Diagnose der Zeichenhürden sein. Anhand der Vergleiche der verschiedenen Lösungsprozesse können etwa Unterschiede in der Aufmerksamkeitsverteilung und der Verknüpfung von Informationen gezeigt werden, die mit dem Zeichenprozess zusammenhängen. Auf diese Weise kann herausgestellt werden, ob neben dem konzeptuellen Wissen auch die zeichnerische Herangehensweise für das erfolgreiche Zeichnen entscheidend ist, d. h., ob erfolgreichere Studierende bestimmte Informationen bzw. Strukturmerkmale stärker einbeziehen als erfolglosere Studierende. Konkret werden in der laufenden Studienauswertung die vorgestellten Analysemöglichkeiten genutzt, um mithilfe unterschiedlicher Metriken (z. B. Fixationsdauer, Übergänge zwischen einzelnen Strukturformeln bzw. Strukturelementen) sowie der Triangulation mit den erhobenen Interviewdaten Muster im Blickverhalten der Studierenden zu identifizieren und die Konstruktion (un-)produktiver Zeichnungen zu charakterisieren. Aufbauend auf dieser Analyse wird in einem weiteren Schritt eine Förderintervention entwickelt werden, die den Zeichenprozess mesomere Grenzformeln unterstützen soll. Dabei könnten die Charakteristika und Blickmuster der erfolgreicheren Studierenden als Grundlage fungieren.

Danksagung

Wir danken der Posterjury der FGCU-Tagung 2021 für die Auszeichnung des Posters mit dem Titel „Die Zeichnung im Blick – Nutzung von Eye-Tracking zur Analyse der zeichnerischen Erschließung von Mesomerie-Aufgaben“ mit dem Posterpreis der FGCU Tagung 2021 und damit für die Möglichkeit, uns am Tagungsband zu beteiligen. Open Access Veröffentlichung ermöglicht und organisiert durch Projekt DEAL.

Literatur

- [1] Ainsworth, S., Prain, V., Tytler, R. (2011). Drawing to learn in science. *Science* 333/6046, 1096–1097.
- [2] Nyachwaya, J. M., Mohamed, A.-R., Roehrig, G. H., Wood, N. B., Kern, A. L., Schneider, J. L. (2011). The development of an open-ended drawing tool: An alternative diagnostic tool for assessing students' understanding of the particulate nature of matter. *Chem. Educ. Res. Pract.* 12/2, 121–132.
- [3] Quillin, K., Thomas, S. (2015). Drawing-to-learn: A framework for using drawings to promote model-based reasoning in biology. *CBE—Life Sci. Educ.* 14/1, 1–16.
- [4] Scheiter, K., Schleinschok, K., Ainsworth, S. (2017). Why sketching may aid learning from science texts: Contrasting sketching with written explanations. *Top. Cogn. Sci.* 9/4, 866–882.
- [5] Cooper, M. M., Stieff, M., DeSutter, D. (2017). Sketching the invisible to predict the visible: From drawing to modeling in chemistry. *Top. Cogn. Sci.* 9/4, 902–920.
- [6] Wu, S. P. W., Rau, M. A. (2019). How students learn content in Science, Technology, Engineering, and Mathematics (STEM) through drawing activities. *Educ. Psychol. Rev.* 31/1, 87–120.
- [7] Duis, J. M. (2011). Organic chemistry educators' perspectives on fundamental concepts and misconceptions: An exploratory study. *J. Chem. Educ.* 88/3, 346–350.
- [8] Richardson, W. (1986). Teaching the concept of resonance with transparent overlays. *J. Chem. Educ.* 63/6, 518–519.
- [9] Karonen, M., Murtonen, M., Södervik, I., Manninen, M., Salomäki, M. (2021). Heuristics hindering the development of understanding of molecular structures in university level chemistry education: The Lewis structure as an example. *Educ. Sci.* 11/6, 258.
- [10] Betancourt-Pérez, R., Olivera, L. J., Rodríguez, J. E. (2010). Assessment of organic chemistry students' knowledge of resonance-related structures. *J. Chem. Educ.* 87/5, 547–551.
- [11] Brandfonbrener, P. B., Watts, F. M., Shultz, G. V. (2021). Organic chemistry students' written descriptions and explanations of resonance and its influence on reactivity. *J. Chem. Educ.* 98/11, 3431–3441.
- [12] Xue, D., Stains, M. (2020). Exploring students' understanding of resonance and its relationship to instruction. *J. Chem. Educ.* 97/4, 894–902.
- [13] Carle, M. S., Flynn, A. B. (2020). Essential learning outcomes for delocalization (resonance) concepts: How are they taught, practiced, and assessed in organic chemistry? *Chem. Educ. Res. Pract.* 21/2, 622–637.
- [14] Cullipher, S., Hansen, S. J., VandenPlas, J. R. (2018). Eye tracking as a research tool: An introduction. In: *Eye Tracking for the Chemistry Education Researcher*. VandenPlas, J. R., Hansen, S. J. R., Cullipher, S. (Hrsg.). ACS Publications, Washington DC, 1–9.
- [15] Taber, K. S. (2002). Compounding quanta: Probing the frontiers of student understanding of molecular orbitals. *Chem. Educ. Res. Pract.* 3/2, 159–173.
- [16] Finkenstaedt-Quinn, S. A., Watts, F. M., Petterson, M. N., Archer, S. R., Snyder-White, E. P., Shultz, G. V. (2020). Exploring student thinking about addition reactions. *J. Chem. Educ.* 97/7, 1852–1862.
- [17] Petterson, M. N., Watts, F. M., Snyder-White, E. P., Archer, S. R., Shultz, G. V., Finkenstaedt-Quinn, S. A. (2020). Eliciting student thinking about acid–base reactions via app and paper–pencil based problem solving. *Chem. Educ. Res. Pract.* 21/3, 878–892.
- [18] Rodemer, M., Eckhard, J., Graulich, N., Bernholt, S. (2020). Decoding case comparisons in organic chemistry: Eye-tracking students' visual behavior. *J. Chem. Educ.* 97/10, 3530–3539.
- [19] Stieff, M., Hegarty, M., Deslongchamps, G. (2011). Identifying representational competence with multi-representational displays. *Cogn. Instr.* 29/1, 123–145.
- [20] Baluyut, J. Y., Holme, T. A. (2019). Eye tracking student strategies for solving stoichiometry problems involving particulate nature of matter diagrams. *CTI* 1/1, 1–13.
- [21] Herrington, D. G., Sweeder, R. D., VandenPlas, J. R. (2017). Students' independent use of screencasts and simulations to construct understanding of solubility concepts. *J. Sci. Educ. Technol.* 26/4, 359–371.
- [22] Just, M. A., Carpenter, P. A. (1980). A theory of reading: From eye fixations to comprehension. *Psychol. Rev.* 87/4, 329–354.
- [23] Rayner, K. (1998). Eye movements in reading and information processing: 20 years of research. *Psychol. Bull.* 124/3, 372–422.
- [24] Lai, M.-L., Tsai, M.-J., Yang, F.-Y., Hsu, C.-Y., Liu, T.-C., Lee, S. W.-Y., Lee, M.-H., Chiou, G.-L., Liang, J.-C., Tsai, C.-C. (2013). A review of using eye-tracking technology in exploring learning from 2000 to 2012. *Educ. Res. Rev.* 10, 90–115.
- [25] Konrad, K. (2020). Lautes Denken. In: *Handbuch Qualitative Forschung in der Psychologie*. Mey, G., Mruck, K. (Hrsg.). Springer, Wiesbaden, 1–21.
- [26] Scheiter, K., Eitel, A. (2017). The use of eye tracking as a research and instructional tool in multimedia learning. In: *Eye-tracking technology applications in educational research*. Was, C., Sansosti, F., Morris, B. (Hrsg.). IGI Global, Hershey, 143–164.
- [27] Graulich, N., Schween, M. (2018). Concept-oriented task design: Making purposeful case comparisons in organic chemistry. *J. Chem. Educ.* 95/3, 376–383.
- [28] Holmqvist, K., Nyström, M., Andersson, R., Dewhurst, R., Jarodzka, H., Van de Weijer, J. (2011). *Eye tracking: A comprehensive guide to methods and measures*. OUP, Oxford.

Eingegangen am 12. Januar 2022

Angenommen am 13. März 2022