

Ein Bild, ein Blick und tausend Worte - Über das nicht ganz so einfache Verhältnis von Blickbewegungen und Lernprozessen

Die Aufnahme und Analyse von Blickbewegungen gilt häufig als relativ junge Erhebungsmethode, kann aber bereits auf eine über 100jährige Geschichte zurückblicken. Die Anfänge werden häufig mit dem Namen Louis-Émile Javal verknüpft, der erste Beobachtungen über die Rolle der Augenbewegungen beim Lesen im Jahr 1879 publizierte (Javal, 1878). Viele methodische Grundlagen und Erkenntnisse, bspw. Begrifflichkeiten wie Fixationen und Saccaden, Erkenntnisse zur herabgesetzten Sehempfindlichkeit während der Blickbewegung (saccadic suppression) oder zur Wahrnehmungsspanne stammen bereits aus dieser methodischen Gründungszeit und haben überwiegend bis heute Bestand (Huey, 1908). Aufbauend auf die Grundlagen aus dieser Initialphase der Eye-Tracking-Forschung erlebte die Analyse von Blickbewegungen einen weiteren Aufschwung mit dem Aufkommen des Behaviorismus in der experimentellen Psychologie. Der Schwerpunkt dieser Forschung lag dabei in einem stark anwendungsorientierten Bereich, insb. zum Lesen und zur Wahrnehmung von Motiven und Szenen, ohne dabei jedoch auf kognitive Prozesse oder die Steuerung der Blickbewegungen hinauszuwollen. Vielmehr ging es um die Analyse von Blickbewegung per se, um auftretende Muster visueller Fixationen und die Geschwindigkeit, die Reaktionszeit sowie zeitliche Dynamiken der Augenbewegungen, wobei allenfalls Oberflächenmerkmale der Stimuli und Aufgabenstellungen als Einflussfaktoren Berücksichtigung fanden. Unter diesem Paradigma erschöpfte sich jedoch Ende der 1950er Jahre der Innovationsgrad der neu publizierten Erkenntnisse, so dass sich in dem Review von Tinker (1958) die eher pessimistische Feststellung findet, dass fast alles, was man über das Lesen mit Hilfe von Augenbewegungen lernen könne (in Anbetracht des damaligen Stands der Technik) zu diesem Zeitpunkt entdeckt worden sei. Es folgte dann auch eine etwa 20 Jahre andauernde Phase, in der nur wenig Eye-Tracking-basierte Forschung publiziert wurde. Erst mit der kognitiven Revolution in der Psychologie Mitte der 1970er Jahre sowie angetrieben durch technologische Innovationen, insb. in Form von akkurateren und leichter anwendbaren Eye-Tracking-Systemen, erlebte die Analyse von Blickbewegungen erneut starken Zulauf. In dieser Phase wurden dann auch generelle Theorie der Sprachverarbeitung und zu kognitiven Prozesse beim Lesen detailliert entwickelt und untersucht (Rayner, 1993). Seit etwa 2000 zeichnet sich eine vierte Phase der Eye-Tracking-Forschung ab, die sich insbesondere durch eine Flexibilisierung der Systeme (bspw. mobile Eye-Tracker) und damit auch durch eine Flexibilisierung und Erweiterung der Forschungsfragen und Untersuchungsdesigns auszeichnet. Darüber hinaus ermöglichen die stark angestiegenen Rechnerleistungen auch interaktive Anwendungen und die kombinierte Analyse unterschiedlicher Datenquellen (bspw. Körperbewegungen, Gesichtsaufnahmen, physiologische Maße wie Herzraterdaten o.ä.).

In aktuellen Forschungsarbeiten in den Naturwissenschaftsdidaktiken wird Eye-Tracking für die Analyse sehr unterschiedlicher Fragestellungen genutzt. So fassen Hahn und Klein (2022) in ihrem Review die Forschungsperspektiven in den analysierten Publikationen in vier Bereiche zusammen: Leistung, Stimulus, Person, Entwicklung. In leistungsbezogenen

Fragestellungen wird bspw. versucht, die visuelle Aufmerksamkeitsverteilung mit Answererfolg beim Problemlösen oder mit Expertiseunterschieden in Zusammenhang zu bringen. Die Analyse von Expertisedifferenzen spielt auch generell bei Eye-Tracking-Studien häufig eine Rolle, auch um wahrnehmungsbezogene Mechanismen als Teil von Expert:innenleistungen zu untersuchen. Stimulibezogene Fragestellungen betrachten Effekte unterschiedlicher visueller Stimuli auf die visuelle Aufmerksamkeitsverteilung oder die visuelle Verarbeitung unterschiedlicher Aufgabenanforderungen oder Hilfestellungen. Personenbezogene Fragestellungen adressieren vielfach spezifische Unterschiede zwischen bestimmten Personengruppen (bspw. bezogen auf Gender oder auch Fachhintergründe) mit Blick auf die visuelle Verarbeitung bestimmter (Lern)Materialien. Einen letzten Schwerpunkt bilden entwicklungsbezogene Fragestellungen, die Veränderungen in der visuellen Aufmerksamkeitsverteilung oder der visuellen Verarbeitung über die Zeit in den Blick nehmen. Diese Veränderungen können als Folge von gezielten Interventionen oder allgemein mit Blick auf lern- oder entwicklungsbasierte Leistungszuwächse analysiert werden und damit auch Aspekte der drei zuvor genannten Forschungsschwerpunkte umfassen.

Im Folgenden soll exemplarisch die Entwicklung, Umsetzung und Integration von Eye-Tracking-basierten Fragestellungen in Form von zwei Teilstudien des Projekts „Eye movement modeling examples als Instruktionsansatz in der Organischen Chemie“ (EYE-OC) dargestellt werden. Das Projekt wurde gemeinsam mit Nicole Graulich (Justus-Liebig-Universität Gießen) bei der Deutschen Forschungsgemeinschaft eingeworben und von den beiden Promovierenden Julia Eckhard (JLU Gießen) und Marc Rodemer (IPN Kiel) sowie mit Unterstützung der Hilfskräfte Gyde Asmussen (IPN Kiel) und Axel Langner (JLU Gießen) umgesetzt.

Der Blick in ein exemplarisches Projekt: EYE-OC

Chemische Formeln und Reaktionsmechanismen haben in der Chemie eine besondere Relevanz (Taasobshirazi & Glynn, 2009). Chemiker:innen nutzen dieses Symbolsystem um auf Basis ihres konzeptionellen Verständnisses den Ablauf einer chemischen Reaktion zu erklären und zu beschreiben. Studierende haben hingegen große Schwierigkeiten, die zugrunde liegende Bedeutung mechanistischer Repräsentationen zu verstehen (Bhattacharyya, 2014; Graulich, 2015; Grove et al., 2012). Eine Ursache für diese Schwierigkeiten wird häufig darin gesehen, dass die Studierenden nicht in der Lage sind, die Darstellung mit den dahinter liegenden chemischen Konzepten zu verknüpfen (Ainsworth, 2006). Dadurch gelingt es ihnen nicht, die relevanten Teile der Repräsentation zu identifizieren, diese Teile mit den kontextuell relevanten chemischen Konzepten zu verknüpfen und die entsprechenden Erklärungen oder Vorhersagen abzuleiten (Jarodzka et al., 2010).

Angesichts der Vielzahl an Reaktionsmechanismen, mit denen Studierende in der Organischen Chemie konfrontiert werden, neigen viele dazu, sich auf das Auswendiglernen von Mechanismen zu verlassen, was zusätzlich durch gängige Aufgabenformate wie *predict the product* unterstützt wird (Bodé et al., 2019). Im Rahmen des Projekts haben wir daher das Format Fallvergleichsaufgaben gewählt, in dem zwei ähnliche Reaktionen von den Lernenden verglichen und erörtert werden sollten, z. B. mit der Zielstellung, die Reaktivität anhand von Gemeinsamkeiten und Unterschieden zwischen den beiden Fällen zu bestimmen (Graulich & Schween, 2018). Dieses Format sollte die Lernenden darin unterstützen, aktiver explizite strukturelle Unterschiede zwischen den Reaktanten in zwei Reaktionen zu vergleichen und die

impliziten Faktoren, die sich aus diesen strukturellen Unterschieden ergeben, hinsichtlich ihres Einflusses auf den Verlauf der Reaktion abzuwägen (Alfieri et al., 2013; Caspari et al., 2018; Graulich & Schween, 2018).

Auf Basis dieses Aufgabenformats wurde am Beispiel nukleophiler Substitutionsreaktionen eine Eye-Tracking-Studie mit Personen unterschiedlicher Expertise durchgeführt, um durch den Vergleich des Blickverhaltens zu untersuchen, ob es für die Lösung eines domänenspezifischen Problems eine visuell „optimale“ Herangehensweise gibt und inwiefern sich diese zwischen den Gruppen unterscheidet oder einander ähnelt (Gegenfurtner et al., 2011). Die Frage nach Expertiseunterschieden wurde bereits in einigen Domänen untersucht. So zeigte sich bei Fluglots:innen, dass zum einen die Problemlösungen von Expert:innen einander ähnlicher waren als die Lösungen von Berufsanfänger:innen und zum anderen die Problemlösungen von Berufsanfänger:innen wiederum einander ähnlicher waren als die Lösungen von Personen zu Beginn der Ausbildung (basierend auf Sequenzanalysen von AOI-Fixationen, d. h. Fixationen in definierten *areas of interest*, und sog. Levenshtein-Distanzen) (van Meeuwen et al., 2014). Demgegenüber stehen Befunde von Jarodzka et al. (2010), bei denen die Expert:innen weniger ähnliche Problemlösestrategien verfolgten als Anfänger:innen.

An der Eye-Tracking-Studie im Rahmen des Projekts nahmen 46 Proband:innen (Dozierende bzw. Professor:innen sowie Studierende unterschiedlicher Fachsemester) teil (Rodemer et al., 2020). Diese bearbeiteten eine Serie von acht Fallvergleichsaufgaben zum Reaktionsmechanismus der nukleophilen Substitution, wobei die Bearbeitung mit einem Eye-Tracker sowie mittels semistrukturierter Interviews erfasst wurde.

Beim Vergleich der unterschiedlichen Gruppen zeigte sich, dass sich in vielen Fällen das Blickverhalten der Expert:innen von dem der fortgeschrittenen Studierenden und Anfänger:innen unterscheidet. Mit Blick auf die Bearbeitungszeit und auch bei den Fixationsdauern in relevanten AOIs sind die Expert:innen schneller als die Anfänger*innen und die fortgeschrittenen Studierenden, während sich die Studierenden untereinander sehr ähnlich sind und die Aufgaben ähnlich schnell lösen. Um die Ähnlichkeit in der Herangehensweise der einzelnen Proband:innen zu bestimmen, wurde auf die AOI-Sequenz als zweites Blickbewegungsmaß zurückgegriffen, d. h. auf die Reihenfolge, in der die Proband:innen die unterschiedlichen AOIs nacheinander betrachten, aus der die sogenannte Levenshtein-Distanz bestimmt wurde (d.h. die Anzahl an Umsortierungen, Ergänzungen und Löschungen, die notwendig sind, um zwei Sequenzen ineinander zu überführen). Dabei zeigte sich, dass die Konfidenzintervalle der Levenshtein-Distanzen bei den beiden Studierendengruppen sehr klein sind und fast konstante Mittelwerte der relativen Ähnlichkeit der Transitionssequenzen bei allen Aufgaben vorliegen. Bei den Expert:innen gibt es hingegen deutliche Abweichungen bei einzelnen Aufgaben, bei denen niedrige mittlere Levenshtein-Distanzen und insgesamt auch größere Konfidenzintervalle darauf hindeuten, dass die Expert:innen je nach Aufgabe und auch im Vergleich untereinander eher unterschiedlich in der Aufgabebearbeitung vorgehen (Graulich et al., 2022). Unterschiede zwischen Expert:innen und Studierenden zeigen sich auch bei der inhaltlichen Auswertung der in die Erklärungen einbezogenen fachlichen Konzepte. Auf Basis von Netzwerkanalysen ließ sich zeigen, dass Studierende vor allem Struktur-Eigenschafts-Beziehungen aus den Strukturformeln ableiten, während die Expert:innen ihre Erklärungen auf Basis übergreifender chemischer Konzepte und Prinzipien strukturieren (Asmussen et al., 2022).

In einer weiterführenden Analyse wurde das visuelle Dekodierverhalten der Studierenden bei der Bearbeitung der Fallvergleiche nochmals weitergehend untersucht und gezielt die Anfänger:innen und die fortgeschrittenen Studierenden verglichen (Rodemer et al., 2020). Durch die Etablierung eines neuartigen Eye-Tracking-Maßes, des Fixations-Transitionsverhältnisses, konnte ein unterschiedliches Betrachtungsverhalten beobachtet werden. Fortgeschrittene Studierende sind zum einen schneller in ihrer Entscheidungsfindung und wechseln zum anderen häufiger zwischen unterschiedlichen Teilen der Repräsentationen, was auf eine höhere Selektivität für chemisch relevante Entitäten hinweist. Fortgeschrittene Studierende zeigen demnach ein eher vergleichendes Dekodierverhalten, was der Zielstellung von Fallvergleichsaufgaben stärker entspricht als das eher fokussierte Dekodierverhalten (im Sinne von mehr und längeren Fixationen bei weniger Transitionen) bei den Anfänger:innen (Rodemer et al., 2020). Es zeigt sich aber auch, dass die Anzahl der visuellen Merkmale der Repräsentationen wichtiger zu sein scheint als inhaltspezifische Faktoren hinsichtlich der visuellen Aufmerksamkeitsverteilung (Rodemer et al., 2020). Diesbezüglich beobachteten auch andere Studien einen großen Einfluss auf das Dekodierverhalten bei größeren und visuell komplexen Molekülen oder nicht-prototypischen Reaktionen und Aufgaben (Baluyut & Holme, 2019).

Basierend auf den Ergebnissen lässt sich insbesondere festhalten, dass die Proband:innen der Studierendengruppen ein ähnliches Blickverhalten zeigen, das sich jedoch erkennbar von den Expert:innen unterscheidet. Um die Studierenden bei der Verknüpfung von Repräsentationen mit fachlichen Konzepten zu unterstützen, wurde in einer zweiten Projektphase auf den Ansatz der *eye movement modeling examples* (EMME) zurückgegriffen. Dabei handelt es sich um Aufzeichnungen von Blickbewegungen von Expert:innen bei der Bearbeitung von Problemlöseaufgaben (Jarodzka et al., 2013), in diesem Fall von Aufgaben im Kontext von Reaktionsmechanismen. Diese Blickbewegungen sollten die Aufmerksamkeit der Lernenden auf die thematisch relevanten Merkmale der Darstellung lenken (van Gog et al., 2009). Die Modellierung der Blickbewegungen sollte zudem die dynamische und adaptive visuelle, mechanistische Herangehensweise einer Expertin oder eines Experten nachahmen, was es den Lernenden wiederum ermöglichen sollte, diesen Prozess nachzuvollziehen und für sich nutzbar zu machen. Dadurch sollten vor allem Noviz:innen in ihren Wahrnehmungsfähigkeiten angeleitet werden (van Gog et al., 2009).

Die oben dargestellten Auswertungen der Expertise-Vergleichsstudie deutete im Detail jedoch darauf hin, dass die Gruppe der Expert:innen in ihrem visuellen Blickverhalten wenig homogen ist, so dass das Blickverhalten im Vergleich der Expert:innen untereinander, aber auch über den Verlauf der Bearbeitung der einzelnen Aufgaben erkennbar variiert (Graulich et al., 2022). Eine Folgerung aus diesen Ergebnissen war, dass die Auswahl eines Blickmodells nicht ohne weiteres begründet möglich war, da sich die Frage stellte, wie ähnlich oder unähnlich die Blickbewegungen zwischen Expert:innen und Lernenden sein dürfen oder sein sollten, um für die Lernenden als Unterstützung wirksam zu sein. Im Rahmen des Projekts wurde sich (vergleichbar mit weiteren Studien im Bereich EMME, z. B. Jarodzka et al., 2010; Krebs et al., 2019) dazu entschieden, für die weitere Entwicklung der Instruktionsmaterialien eine „Didaktisierung“ der Erklärung und auch des Blickmodells vorzunehmen. Entsprechend wurde zu ausgewählten Fallvergleichsaufgaben eine didaktisch optimierte Erklärung entwickelt (d. h. geskripted), mit Expert:innen sowie mit Lehrbüchern inhaltlich abgestimmt, und auf dieser Grundlage die dynamische Hervorhebung von

relevanten Teilen des dargestellten Mechanismus abgeleitet. Beides wurde dann in der Entwicklung von Erklärvideos als Instruktionsformat zusammengeführt (Bernholt et al., subm.).

Um die Aufmerksamkeit der Studierenden auf die relevanten Teile der abgebildeten Aufgabenstellung zu lenken, wurden verschiedene Hervorhebungen implementiert. Insgesamt wurden zu drei Einflussfaktoren auf den Verlauf von Substitutionsreaktionen (Nukleophilie, Abgangsgruppenqualität, Substrateffekte) jeweils drei Videovarianten erstellt (ohne Hervorhebungen, mit statischen oder dynamischen Hervorhebungen). Auf der Grundlage der Literatur erwarteten wir, dass die zeitliche und räumliche Ausrichtung der dynamischen Hervorhebung einen Mehrwert gegenüber der alleinigen räumlichen Ausrichtung von farblich hervorgehobenen Funktionsgruppen hat (Boucheix & Lowe, 2010; Jarodzka et al., 2013). Beide Hervorhebungstechniken sollten jedoch Vorteile gegenüber der Kontrollbedingung ohne Hervorhebungen aufweisen. Während die verbalen Erklärungen über die drei Varianten identisch waren, variierte die Darstellung bestimmter Hervorhebungen zwischen den Videos. In einer randomisierten Kontrollgruppenstudie wurden die Videos 171 Studierenden der Einführungsvorlesung der Organischen Chemie an den Standorten Kiel und Gießen vorgelegt. Diese quantitative Vergleichsstudie umfasste einen Vor- und Nachtest sowie die Erhebung spezifischer weiterer Variablen (Demografika, wahrgenommene kognitive Belastung, Evaluationsfragen hinsichtlich der Videos) (Rodemer et al., 2021). In einer zusätzlichen Teilstudie wurde die Betrachtung der Videos durch weitere 28 Studierende zudem mit Hilfe eines Eye-Trackers erhoben, um einen Einblick in die Verarbeitung der Videos durch die Studierenden zu gewinnen (Rodemer et al., 2022).

Die Ergebnisse zeigten, dass Studierende, die die Videos mit dynamischen Hervorhebungen (EMME) sahen, in direkten Reproduktionsaufgaben elaboriertere Antworten gaben. Im Lernzuwachs vom Vor- zum Nachtest zeigte sich ein signifikanter Lernzuwachs, der aber nicht im Zusammenhang mit dem implementierten Hervorhebungsformat unterschiedlich ausfiel. Weitergehende Analyseschritte zeigten jedoch auch, dass geringes Vorwissen sowohl durch statische als auch durch dynamische Hervorhebungen z. T. kompensiert wird. Die Ergebnisse sprechen für den Einsatz geeigneter Hervorhebungstechniken in Lehrformaten, um eine stärkere Verbindung zwischen konzeptionellem Wissen und Repräsentationen zu fördern (Rodemer et al., 2021).

In der Eye-Tracking-Teilstudie wurde die Nutzung der Videos durch die Studierenden nochmals genauer mit Hilfe eines Eye-Trackers untersucht, um einen Einblick in die Verarbeitung der Videos durch die Studierenden zu gewinnen. Dabei kamen dieselben Videos zum Einsatz, allerdings wurde die Video-Zuordnung so variiert, dass jede:r Proband:in jede der drei Hervorhebungsvarianten vorgelegt bekam (*within-subjects design*). Die Zusammenstellung der Varianten wurde über ein Latin-Square-Design mit drei Gruppen realisiert, um für Sequenzierungs- und Inhaltseffekte der Lehrvideos zu kontrollieren. Mit Hilfe des Eye-Trackers wurden die Blickbewegungen der Chemie-Studierenden aufgenommen, während sie sich die drei Videos ansahen. Neben dem Vor- und Nachtest sowie den Reproduktionsaufgaben wurde darüber hinaus die wahrgenommene kognitive Belastung erhoben. Die Ergebnisse unterstreichen die o.g. Schlussfolgerungen, dass dynamische Hervorhebungen den Studierenden helfen, ihre Aufmerksamkeit besser auf die relevanten Merkmale der Repräsentationen zu richten, und zwar praktisch über die gesamte Dauer der Videopräsentation. Darüber hinaus erhöhten dynamische Hervorhebungen die

Behaltensleistung der Studierenden, während sie die wahrgenommene kognitive Belastung verringerten. Insgesamt deuten die Ergebnisse darauf hin, dass die Kombination von Hervorhebungstechniken mit dem Prinzip der zeitlichen Kontiguität in Lehrvideos von entscheidender Bedeutung ist, um Studierende zu unterstützen, Informationen aus komplexen Repräsentationen gezielter abzuleiten und ihren Lernerfolg zu verbessern (Rodemer et al., 2022).

Der Blick über den (Projekt-)Tellerrand

Wie auf Basis der beiden Eye-Tracking-bezogenen Teilstudien im Rahmen des Projekts EYE-OC aufgezeigt, lassen sich Blickbewegungen von Proband:innen unter sehr unterschiedlichen Fragestellungen und mit sehr unterschiedlichen Auswertungsschritten und -prozeduren betrachten. Die Bandbreite an Fragestellungen zu systematisieren und die auf Basis dieser Forschungsbemühungen gewonnenen Erkenntnisse zusammenzutragen war immer wieder Ziel von Reviews und Meta-Analysen (wie oben schon genannt bspw. von Tinker, 1958 oder von Hahn & Klein, 2022). In den letzten Jahren sind zahlreiche solcher Ansätze publiziert worden, z.T. allgemein zum Bereich Eye-Tracking (Lai et al., 2013), z.T. auch mit Blick auf bestimmte Forschungsgebiete (Lesen: Rayner, 1998, Mathematik- oder Physikdidaktik: Strohmaier et al., 2020; Hahn & Klein, 2022), Forschungsparadigmen (Expertiseunterschiede: Gegenfurtner et al., 2011), Lernbereiche (Digitale Lernumgebungen: Yang et al., 2018; Multimedia: Alemdag & Cagiltay, 2018), Personengruppen (Lehrkräfte: Beach & McConnel, 2018) oder Methodiken (Pupillometrie: van der Wel & van Steenbergen, 2018) (vgl. Abb. 1).

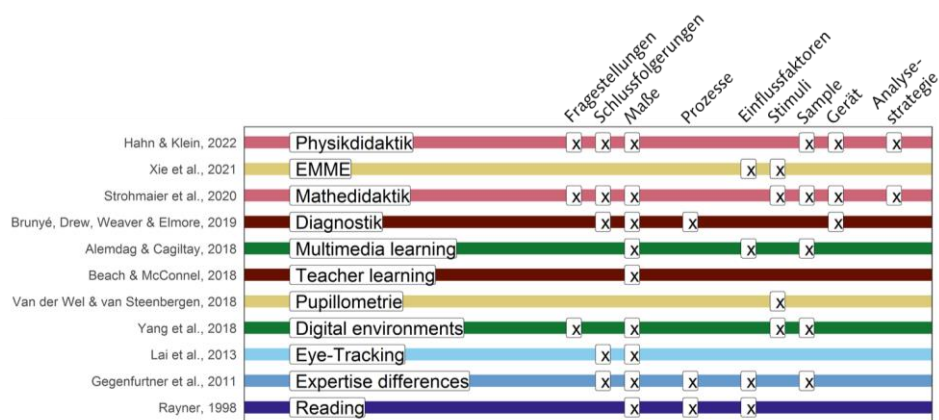


Abb. 1: Übersicht über Review- und meta-analytische Studien mit ihren jeweiligen Schwerpunkten

Im Vergleich dieser Überblicksartikel wird deutlich, dass diese (wenig überraschend) spezifische Schwerpunkte legen, dass jedoch insb. der Aspekte der verwendeten Eye-Tracking-Maße und deren Interpretation im Rahmen der zugrundeliegenden Forschungsbeiträge die zentrale durchgehende Achse darstellt. Während der Fokus auf zeitliche Abläufe und Prozesse sich eher in älteren Beiträgen findet, finden weitere technische Aspekte (eine genauere Klassifikation der verwendeten Stimuli, das verwendete Eye-

Tracking-System, die Analysestrategie) verstärkt in neueren Beiträgen Berücksichtigung. Dies spiegelt auch die wiederholte Kritik wieder, dass diese relevanten technischen Angaben in vielen Forschungsbeiträgen nicht aufgeführt werden, was ein Nachvollziehen oder gar eine Replikation von Studien massiv erschwert (Holmqvist et al., 2022; Strohmaier et al., 2020). Wenngleich diese technischen Aspekte von zentraler Bedeutung sind, wird in den Review-Beiträgen jedoch vielfach auch beklagt, dass die Fragestellungen inhaltlich nicht gut theoretisch abgeleitet sind oder mit methodischen Verfahren untersucht werden, die nicht zu diesen Fragestellungen passen. So beklagen Lai et al. (2013), dass die Blickbewegungsdaten in den analysierten Studien oftmals nur unter dem Blickwinkel einer Aufmerksamkeitsverteilung in Echtzeit ausgewertet wurden, nicht jedoch hinsichtlich der zugrundeliegenden kognitiven Mechanismen, die gemäß der Forschungsfragen in den Blick genommen werden sollten. So verwischen oft unterschiedliche Interpretation der erhobenen Blickbewegungsdaten, ohne dass ersichtlich ist, worauf die jeweiligen Perspektiven zurückgeführt werden. So indizieren Blickbewegungsdaten in erster Linie momentane Aufmerksamkeitsprozesse, zumindest solange die „verfügbare“ visuelle Umgebung vor unseren Augen für die Aufgabe, die wir untersuchen möchten, relevant ist (Hyönä, 2010). Blickbewegungsdaten indizieren jedoch nicht den Inhalt der Vorstellungen, die wir mental bilden (Ferreira & Yang, 2019) und sie unterliegen auch nicht einer Gesetzmäßigkeit per se, sondern bedürfen einer kontextabhängigen Interpretation (Hayhoe, 2004; Schindler & Lilienthal, 2019). Auch wenn dieser Sachverhalt immer wieder betont wird, wird in den Review-Beiträgen immer wieder angeführt, dass oftmals eher pragmatische Sichtweise in den analysierten Studien vorherrschen (Hahn & Klein, 2022; Holmqvist et al., 2011; Lai et al., 2013; Strohmaier et al., 2020). Neben generellen oder in bestimmten Forschungsbereichen festzustellenden Hot Spots und Blind Spots findet sich in den o.g. Review-Beiträgen daher immer wieder die Forderung nach einer stärkeren theoretischen Fundierung und theoriebasierten Auswahl und Begründung von Eye-Tracking-Maßen. Darüber hinaus sollte nicht nur die (kumulierte) Aufmerksamkeitsverteilung in den Blick genommen werden, sondern auch (wieder) verstärkt der Fokus auf Sequenzanalysen und die Betrachtung zeitkritischer (Lösungs- und Bearbeitungs-)Prozesse gelegt werden (Lai et al., 2013; Strohmaier et al., 2020). Weitere Desiderata, die sich wiederholt in den o.g. Review-Beiträgen finden, beziehen sich vor allem auf methodische Aspekte (Alemdag & Cagiltay, 2018; Hahn & Klein, 2022; Lai et al., 2013; Strohmaier et al., 2020). So sollen mögliche Freiheitsgrade bei den verwendeten Stimuli und den Erhebungsgeräten besser ausgenutzt und nicht durch artifizielle Bearbeitungssettings Artefakte in den Daten erzeugt werden. Bei der Erhebungsdurchführung sollte insbesondere die Sampling-Strategie stärker berücksichtigt und transparenter in den Publikationen dargestellt werden, inkl. der Implikationen bei der Interpretation der erhobenen Daten. Die Validität dieser Interpretation und Schlussfolgerungen können auch die eine stärkere Verwendung von Methoden- und Datentriangulationen unterstützt werden.

Der Blick nach vorn: Aktuelle Entwicklungen

Viele der o.g. Desiderata werden in aktuellen Forschungsvorhaben bereits aufgegriffen. So werden mit Blick auf eine Datentriangulation neben „klassischen“ Maßen wie Performanz und Reaktionszeiten zunehmend auch weitere Maße in Studien erhoben und mit Blickbewegungsdaten in Zusammenhang gebracht. Dazu gehören bspw. Mimik, Gestik,

physiologische Maße (EEG o.ä.), Interviewdaten (Lautes Denken) oder Selbstberichte (bspw. zu affektiven Variablen). Neuerungen finden hier aktuell vor allem im Bereich von Prozessmaßen statt, bspw. bei der Aufzeichnung von Kopf-, Körper- und Effektorbewegungen (Ballenghein et al., 2020; Kaakinen et al., 2018) oder von physiologischen Maßen (Gwizdka et al., 2017; Mason et al., 2020). Diese technischen und methodischen Weiterentwicklungen werfen jedoch auch datenschutzrelevante Fragen auf, da sich durch die erhobenen Daten zunehmend auch personenbezogene Informationen ableiten lassen (Kröger et al., 2020).

Im Sinne einer Flexibilisierung von Stimuli und Erhebungen lassen sich nicht mehr nur die Blickbewegungen einzelner Personen, sondern auch mehrerer Personen und deren Interaktion auswerten. Damit werden auch Fragestellungen bspw. hinsichtlich der Interaktion zwischen Lehrkraft und Lernenden (Haataja et al., 2021) oder zwischen mehreren Lernenden (Goldberg et al., 2021) im Unterricht untersuchbar. Neben einer Erhöhung der Personenanzahl rücken damit auch „echte“ Klassenräume in den Möglichkeitsraum von Eye-Tracking-Studien, was insb. als Gewinn im Sinne einer erhöhten ökologischen Validität und Authentizität angesehen wird (Kaakinen, 2021).

Durch technologische Entwicklungen wird die Verknüpfung von Eye-Tracking mit Virtual und Augmented Reality (VR/AR) vorangetrieben. Durch die inzwischen modular mögliche Integration von Eye-Tracking-Sensoren in entsprechende Brillen sind zusätzliche Erhebungsszenarien und die Nutzung bereits bestehender VR/AR-Umgebungen möglich. (Clay et al., 2019). Ebenfalls durch technologische Entwicklungen wird auch die Schnittstelle zum Bereich Machine Learning ausgebaut. Da bei der Analyse von Blickbewegungsdaten (und insb. im Falle von mehreren zeitgleich zu erhebenden Proband:innen und/oder der Erhebung multipler Datenquellen) enorme Datenmengen anfallen, können bei deren Verarbeitung Verfahren aus dem Bereich Machine Learning unterstützen. Dies betrifft zum einen die unmittelbare Datenverarbeitung, bspw. bei der Kalibrierung oder der Detektion und Klassifikation bestimmter Ereignisse oder Verläufe (Klaib et al., 2021), zum anderen aber auch die eigentliche Datenanalyse (Krol & Krol, 2012; Wu et al., 2020).

Während diese Entwicklungen zum einen eher durch das Ziel einer „holistischeren“ Betrachtung von Lernen getrieben sind, die Datenerhebungen in authentischeren Lernumgebungen und die Berücksichtigung sozialer Komponenten von Lehr-Lernprozessen ermöglichen, spielen zum anderen auch pragmatische Argumente im Sinne möglicher Potenziale, der Machbarkeit, einer stärkeren Kontrollierbarkeit von Untersuchungssettings oder auch nur bezüglich (wahrgenommener) Bedarfe der Erhebung und Auswertung im Sinne notwendiger Geschwindigkeit oder der Anforderungen des Datenumfangs eine Rolle. Mit Blick auf die o.g. Desiderata und Kritikpunkte, die zusammenfassend aus den betrachteten Review-Beiträgen abgeleitet wurden, bleibt hier kritisch zu prüfen, ob und wie hier eine stärkere theoretische Fundierung und theorie-basierte Auswahl und Begründung von Eye-Tracking-Maßen und diesbezüglichen Auswertungsstrategien erreicht werden können (Kaakinen, 2021). Hinzu kommt, dass durch die Komplexitätssteigerung der Erhebungssettings auch eine Vervielfachung von Einflussfaktoren vorliegt, dass technische Probleme bei der Erhebung und Auswertung von multisensorischen und multi-channel Daten berücksichtigt werden müssen und dass Konfundierungen durch raum- und zeitveränderliche Zusammenhänge auftreten können (bspw. im Sinne des sog. binding problems; Singer, 2001). Die aktuellen technologischen Entwicklungen machen Eye-Tracking zunehmend flexibel einsetzbar, aber damit gehen somit auch spezifische Herausforderungen einher. Diese

betreffen insbesondere den Bereich der Theoriebildung und hierbei insbesondere zu den zugrundeliegenden Prozessen, die wir in unseren Untersuchungsumgebungen auslösen (und z.T. auch abzubilden versuchen). Diese Weiterentwicklung der theoretischen Fundierung von Designs und Auswertungsstrategien erscheint notwendig, um die Potenziale der Methode Eye-Tracking zur Erkenntnisgewinnung bei Lehr-Lernprozessen tatsächlich ausspielen zu können. Dies umfasst insbesondere auch die Entwicklung gegenstandsbezogener Theorien in den Fachdidaktiken.

Literatur

- Ainsworth, S. (2006). DeFT: A conceptual framework for considering learning with multiple representations. *Learning and Instruction*, 16(3), 183–198. <https://doi.org/10.1016/j.learninstruc.2006.03.001>
- Alemdag, E. & Cagiltay, K. (2018). A systematic review of eye tracking research on multimedia learning. *Computers & Education*, 125(2), 413–428. <https://doi.org/10.1016/j.compedu.2018.06.023>
- Alfieri, L., Nokes-Malach, T. J. & Schunn, C. D. (2013). Learning Through Case Comparisons: A Meta-Analytic Review. *Educational Psychologist*, 48(2), 87–113. <https://doi.org/10.1080/00461520.2013.775712>
- Asmussen, G., Rodemer, M., Eckhard, J. & Bernholt, S. (2022). From free association to goal-directed problem-solving: Network analysis of students' use of chemical concepts in mechanistic reasoning. In N. Graulich & G. V. Shultz (Hrsg.), *Student Reasoning in Organic Chemistry: Research Advances and Evidence-based Instructional Practices* (S. 90–109). Royal Society of Chemistry.
- Ballenghein, U., Kaakinen, J. K., Tissier, G. & Baccino, T. (2020). Cognitive engagement during reading on digital tablet: Evidence from concurrent recordings of postural and eye movements. *Quarterly journal of experimental psychology (2006)*, 73(11), 1820–1829. <https://doi.org/10.1177/1747021820931830>
- Baluyut, J. Y. & Holme, T. A. (2019). Eye tracking student strategies for solving stoichiometry problems involving particulate nature of matter diagrams. *Chemistry Teacher International*, 1(1). <https://doi.org/10.1515/cti-2018-0003>
- Beach, P. & McConnel, J. (2018). Eye tracking methodology for studying teacher learning: A review of the research. *International Journal of Research & Method in Education*, 42(5), 485–501. <https://doi.org/10.1080/1743727X.2018.1496415>
- Bernholt, S., Eckhard, J., Rodemer, M., Langner, A., Asmussen, G. & Graulich, N. (subm.). Designing tutorial videos to support students' learning of reaction mechanisms in organic chemistry. In Y. J. Dori, C. Ngai & G. A. Szeinberg (Hrsg.), *Digital Learning and Teaching in Chemistry: An International and Inclusive Approach*. Royal Society of Chemistry.
- Bhattacharyya, G. (2014). Trials and tribulations: Student approaches and difficulties with proposing mechanisms using the electron-pushing formalism. *Chemistry Education Research and Practice*, 15(4), 594–609. <https://doi.org/10.1039/C3RP00127J>
- Bodé, N. E., Deng, J. M. & Flynn, A. B. (2019). Getting Past the Rules and to the WHY: Causal Mechanistic Arguments When Judging the Plausibility of Organic Reaction Mechanisms. *Journal of Chemical Education*, 96(6), 1068–1082. <https://doi.org/10.1021/acs.jchemed.8b00719>
- Boucheix, J.-M. & Lowe, R. K. (2010). An eye tracking comparison of external pointing cues and internal continuous cues in learning with complex animations. *Learning and Instruction*, 20(2), 123–135. <https://doi.org/10.1016/j.learninstruc.2009.02.015>
- Caspari, I., Kranz, D. & Graulich, N. (2018). Resolving the complexity of organic chemistry students' reasoning through the lens of a mechanistic framework. *Chemistry Education Research and Practice*, 19(4), 1117–1141. <https://doi.org/10.1039/C8RP00131F>
- Clay, V., König, P. & König, S. (2019). Eye Tracking in Virtual Reality. *Journal of eye movement research*, 12(1). <https://doi.org/10.16910/jemr.12.1.3>
- Ferreira, F. & Yang, Z. (2019). The Problem of Comprehension in Psycholinguistics. *Discourse Processes*, 56(7), 485–495. <https://doi.org/10.1080/0163853X.2019.1591885>
- Gegenfurtner, A., Lehtinen, E. & Säljö, R. (2011). Expertise Differences in the Comprehension of Visualizations: A Meta-Analysis of Eye-Tracking Research in Professional Domains. *Educational Psychology Review*, 23(4), 523–552. <https://doi.org/10.1007/s10648-011-9174-7>
- Goldberg, P., Schwerter, J., Seidel, T., Müller, K. & Stürmer, K. (2021). How does learners' behavior attract preservice teachers' attention during teaching? *Teaching and Teacher Education*, 97, 103213. <https://doi.org/10.1016/j.tate.2020.103213>
- Graulich, N. (2015). The tip of the iceberg in organic chemistry classes: How do students deal with the invisible? *Chemistry Education Research and Practice*, 16(1), 9–21. <https://doi.org/10.1039/C4RP00165F>

- Graulich, N., Rodemer, M., Eckhard, J. & Bernholt, S. (2022). Gibt es ideale Blickmodelle zur Förderung der Lernenden beim Lösen organisch-chemischer Aufgaben? In P. Klein, N. Graulich, J. Kuhn & M. Schindler (Hrsg.), *Eye-Tracking in der Mathematik- und Naturwissenschaftsdidaktik: Forschung und Praxis* (S. 1–18). Springer Spektrum.
- Graulich, N. & Schween, M. (2018). Concept-Oriented Task Design: Making Purposeful Case Comparisons in Organic Chemistry. *Journal of Chemical Education*, 95(3), 376–383. <https://doi.org/10.1021/acs.jchemed.7b00672>
- Grove, N. P., Cooper, M. M. & Rush, K. M. (2012). Decorating with Arrows: Toward the Development of Representational Competence in Organic Chemistry. *Journal of Chemical Education*, 89(7), 844–849. <https://doi.org/10.1021/ed2003934>
- Gwizdzka, J., Hosseini, R., Cole, M. & Wang, S. (2017). Temporal dynamics of eye-tracking and EEG during reading and relevance decisions. *Journal of the Association for Information Science and Technology*, 68(10), 2299–2312. <https://doi.org/10.1002/asi.23904>
- Haataja, E., Salonen, V., Laine, A., Toivanen, M. & Hannula, M. S. (2021). The Relation Between Teacher-Student Eye Contact and Teachers' Interpersonal Behavior During Group Work: A Multiple-Person Gaze-Tracking Case Study in Secondary Mathematics Education. *Educational Psychology Review*, 33(1), 51–67. <https://doi.org/10.1007/s10648-020-09538-w>
- Hahn, L. & Klein, P. [P.] (2022). Eye tracking in physics education research: A systematic literature review. *Physical Review Physics Education Research*, 18(1), 225. <https://doi.org/10.1103/PhysRevPhysEducRes.18.013102>
- Hayhoe, M. M. (2004). Advances in Relating Eye Movements and Cognition. *Infancy*, 6(2), 267–274. https://doi.org/10.1207/s15327078in0602_7
- Holmqvist, K., Nyström, M., Andersson, R., Dewhurst, R., Jarodzka, H. & van de Weijer, J. (2011). *Eye tracking: A comprehensive guide to methods and measures* (First edition). Oxford University Press.
- Holmqvist, K., Örbom, S. L., Hooge, I. T. C., Niehorster, D. C., Alexander, R. G., Andersson, R., Benjamins, J. S., Blignaut, P., Brouwer, A.-M., Chuang, L. L., Dalrymple, K. A., Drieghe, D., Dunn, M. J., Ettinger, U., Fiedler, S., Foulsham, T., van der Geest, J. N., Hansen, D. W., Hutton, S. B., . . . Hessels, R. S. (2022). Eye tracking: Empirical foundations for a minimal reporting guideline. *Behavior research methods*.
- Huey, E. B. (1908). *The Psychology and Pedagogy of Reading*. Macmillan.
- Hyönä, J. (2010). The use of eye movements in the study of multimedia learning. *Learning and Instruction*, 20(2), 172–176. <https://doi.org/10.1016/j.learninstruc.2009.02.013>
- Jarodzka, H., Scheiter, K., Gerjets, P. & van Gog, T. (2010). In the eyes of the beholder: How experts and novices interpret dynamic stimuli. *Learning and Instruction*, 20(2), 146–154. <https://doi.org/10.1016/j.learninstruc.2009.02.019>
- Jarodzka, H., van Gog, T., Dorr, M., Scheiter, K. & Gerjets, P. (2013). Learning to see: Guiding students' attention via a Model's eye movements fosters learning. *Learning and Instruction*, 25, 62–70. <https://doi.org/10.1016/j.learninstruc.2012.11.004>
- Javal, L. É. (1878). Essai sur la physiologie de la lecture. *Annales d'Oculistique*(79), 97–117.
- Kaakinen, J. K. (2021). What Can Eye Movements Tell us about Visual Perception Processes in Classroom Contexts? Commentary on a Special Issue. *Educational Psychology Review*, 33(1), 169–179. <https://doi.org/10.1007/s10648-020-09573-7>
- Kaakinen, J. K., Ballenghein, U., Tissier, G. & Baccino, T. (2018). Fluctuation in cognitive engagement during reading: Evidence from concurrent recordings of postural and eye movements. *Journal of experimental psychology. Learning, memory, and cognition*, 44(10), 1671–1677. <https://doi.org/10.1037/xlm0000539>
- Klaib, A. F., Alsrehin, N. O., Melhem, W. Y., Bashtawi, H. O. & Magableh, A. A. (2021). Eye tracking algorithms, techniques, tools, and applications with an emphasis on machine learning and Internet of Things technologies. *Expert Systems with Applications*, 166(1), 114037. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2020.114037>
- Krebs, M.-C., Schüler, A. & Scheiter, K. (2019). Just follow my eyes: The influence of model-observer similarity on Eye Movement Modeling Examples. *Learning and Instruction*, 61, 126–137. <https://doi.org/10.1016/j.learninstruc.2018.10.005>
- Kröger, J. L., Lutz, O. H.-M. & Müller, F. (2020). What Does Your Gaze Reveal About You? On the Privacy Implications of Eye Tracking. In M. Friedewald, M. Önen, E. Lievens, S. Krenn & S. A. Fricker (Hrsg.), *Privacy and identity management: Data for better living: AI and privacy* (S. 226–241). Springer.
- Krol, M [Michael] & Krol, M [Magdalena] (2012). A novel approach to studying strategic decisions with eye-tracking and machine learning. *Judgment and Decision Making*, 12(6), 596–609.
- 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. *Educational Research Review*, 10(5), 90–115. <https://doi.org/10.1016/j.edurev.2013.10.001>

- Mason, L., Zaccoletti, S., Scrimin, S., Tornatora, M. C., Florit, E. & Goetz, T. (2020). Reading with the eyes and under the skin: Comprehending conflicting digital texts. *Journal of Computer Assisted Learning*, 36(1), 89–101. <https://doi.org/10.1111/jcal.12399>
- Rayner, K. (1993). Eye Movements in Reading: Recent Developments. *Psychological Science*, 2(3), 81–85.
- Rayner, K. (1998). Eye movements in reading and information processing: 20 years of research. *Psychological Bulletin*, 124(3), 372–422.
- Rodemer, M., Eckhard, J., Graulich, N. & Bernholt, S. (2020). Decoding Case Comparisons in Organic Chemistry: Eye-Tracking Students' Visual Behavior. *Journal of Chemical Education*, 97(10), 3530–3539. <https://doi.org/10.1021/acs.jchemed.0c00418>
- Rodemer, M., Eckhard, J., Graulich, N. & Bernholt, S. (2021). Connecting explanations to representations: Benefits of highlighting techniques in tutorial videos on students' learning in organic chemistry. *International Journal of Science Education*, 43(17), 2707–2728. <https://doi.org/10.1080/09500693.2021.1985743>
- Rodemer, M., Lindner, M. A., Eckhard, J., Graulich, N. & Bernholt, S. (2022). Dynamic signals in instructional videos support students to navigate through complex representations: An eye-tracking study. *Applied Cognitive Psychology*, 36(4), 852–863. <https://doi.org/10.1002/acp.3973>
- Schindler, M. & Lilienthal, A. J. (2019). Domain-specific interpretation of eye tracking data: Towards a refined use of the eye-mind hypothesis for the field of geometry. *Educational Studies in Mathematics*, 101(1), 123–139. <https://doi.org/10.1007/s10649-019-9878-z>
- Singer, W. (2001). Consciousness and the binding problem. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 929, 123–146. <https://doi.org/10.1111/j.1749-6632.2001.tb05712.x>
- Strohmaier, A. R., MacKay, K. J., Obersteiner, A. & Reiss, K. M. (2020). Eye-tracking methodology in mathematics education research: A systematic literature review. *Educational Studies in Mathematics*, 104(2), 147–200. <https://doi.org/10.1007/s10649-020-09948-1>
- Taasoobshirazi, G. & Glynn, S. M. (2009). College students solving chemistry problems: A theoretical model of expertise. *Journal of Research in Science Teaching*, 46(10), 1070–1089. <https://doi.org/10.1002/tea.20301>
- Tinker, M. A. (1958). Recent studies of eye movements in reading. *Psychological Bulletin*, 55(4), 215–231. <https://doi.org/10.1037/h0041228>
- van der Wel, P. & van Steenbergen, H. (2018). Pupil dilation as an index of effort in cognitive control tasks: A review. *Psychonomic bulletin & review*, 25(6), 2005–2015. <https://doi.org/10.3758/s13423-018-1432-y>
- van Gog, T., Jarodzka, H., Scheiter, K., Gerjets, P. & Paas, F. G. (2009). Attention guidance during example study via the model's eye movements. *Computers in Human Behavior*, 25(3), 785–791. <https://doi.org/10.1016/j.chb.2009.02.007>
- van Meeuwen, L. W., Jarodzka, H., Brand-Gruwel, S., Kirschner, P. A., Bock, J. J. de & van Merriënboer, J. J. G. (2014). Identification of effective visual problem solving strategies in a complex visual domain. *Learning and Instruction*, 32, 10–21. <https://doi.org/10.1016/j.learninstruc.2014.01.004>
- Wu, Y., Liu, Z., Jia, M., Tran, C. C. & Yan, S. (2020). Using Artificial Neural Networks for Predicting Mental Workload in Nuclear Power Plants Based on Eye Tracking. *Nuclear Technology*, 206(1), 94–106. <https://doi.org/10.1080/00295450.2019.1620055>
- Yang, F.-Y., Tsai, M.-J., Chiou, G.-L., Lee, S. W.-Y., Chang, C.-C. & Chen, L.-L. (2018). Instructional Suggestions Supporting Science Learning in Digital Environments Based on a Review of Eye Tracking Studies. *Journal of Educational Technology & Society*, 21(2), 28–45.