

Maike SCHINDLER, Köln

## **Eye-Tracking in der mathematikdidaktischen Forschung: Chancen und Herausforderungen**

In der Mathematikdidaktik gibt es ein wachsendes Interesse an und eine zunehmende Nutzung von Eye-Tracking (ET) (Andrá et al., 2015; Schindler & Lilienthal, 2019). ET, das Erfassen und Aufzeichnen von Blickbewegungen, wird im Zusammenhang mit mathematischen Inhalten zwar schon seit 100 Jahren genutzt (Strohmaier et al., 2020a) – jedoch zunächst vorwiegend in der Kognitionspsychologie und erst später auch in der (mathematik-)didaktischen Forschung (vgl. Shayan et al., 2017). Ein Anstieg an publizierten ET Studien zeigt sich in der Mathematikdidaktik v. a. seit etwa 2014 (Lilienthal & Schindler, 2019; Strohmaier et al., 2020a) – insbesondere in den letzten drei Jahren. Der vermehrte Einsatz von ET in der mathematikdidaktischen Forschung hängt u. a. damit zusammen, dass ET Systeme zugänglicher werden: ET Systeme, die Hardware und Software umfassen, werden von verschiedenen Herstellern vertrieben und es ist weniger technisches Knowhow erforderlich als noch vor zwanzig Jahren, um ET Studien durchzuführen. Solche ET Systeme werden zudem kostengünstiger und sind für wenige Tausend Euro erhältlich. Gleichzeitig sollte nicht vergessen werden, dass es – einhergehend mit den Anschaffungs- und Unterhaltungskosten von ET Systemen – global einen unterschiedlichen Zugang und unterschiedliche Partizipation an dieser Datenerhebungsmethode gibt (Biswas & Langdon, 2014).

Für die Mathematikdidaktik ist ET aus verschiedenen Gründen interessant. Für das mathematische Lernen spielen Repräsentation eine wesentliche Rolle. Duval (2000) erläutert: „We do not have any perceptive or instrumental access to mathematical objects, even the most elementary .... The only way of gaining access to them is using signs, words or symbols, expressions or drawings” (S. 61) und ergänzt, dass mathematische Objekte dennoch nicht mit ihren semiotischen Repräsentationen zu verwechseln sind und dass dies den spezifischen Kern mathematischen Wissens ausmacht. Funktionen können bspw. neben der Sprache als Term, Funktionsgraph oder als Wertetabelle repräsentiert werden (vgl. z. B. Leuders & Prediger, 2005) – solche semiotischen Repräsentationen sind für das Mathematiklernen von besonderer Bedeutung. Jedoch spielen für das Wahrnehmen von Repräsentationen nicht nur die gegebenen Stimuli selbst eine Rolle: Radford (2010) hält fest: “What we see is not the result of direct inputs but of stimuli already filtered by meanings and information about objects and events in the world” (S. 2). Repräsentationen haben eine soziokulturelle Dimension und werden – in Abhängigkeit u. a. von Vorerfahrungen, vorhandenem Wissen über mathematische Objekte und der entsprechend unterschiedlichen Blickwinkel – von Schüler\*innen unterschiedlich wahrgenommen. ET ist eine Methode, die sich anbietet, um zu untersuchen, wie Repräsentationen mathematischer Objekte (wie etwa Tabellen, Graphen oder Terme) erfasst und wahrgenommen werden – und welche Gedankengänge unter Umständen damit verbunden sind (s. u.).

## Überblick über Eye-Tracking Forschung in der Mathematikdidaktik

Mathematikdidaktische Studien unter Verwendung von ET untersuchen Blickverhalten im Zusammenhang mit mathematischem Lernen und Lehren, mit mathematischen Fähigkeiten und Fertigkeiten. Im Folgenden wird ein Überblick über die Ausrichtung dieser Studien gegeben. Die Ergebnisse der Studien können aufgrund von Platzrestriktionen im vorliegenden Beitrag nicht im Detail dargestellt werden – hierzu wird auf Überblicksarbeiten, die vorhandene ET Studien mit mathematikdidaktischer Ausrichtung sichten und zusammenfassen, verwiesen (z. B. Lilienthal & Schindler, 2019; Strohmaier et al., 2020a).

Die Inhaltsbereiche, zu denen ET Studien in der Mathematikdidaktik durchgeführt werden, sind divers. Es gibt bspw. Studien zum Thema *Zahlen und Operationen*, die etwa die Bruchrechnung (z. B. Obersteiner & Tumpek, 2016), die Anzahlerfassung an Hunderterfeld und Rechenrahmen (z. B. Rottmann & Schipper, 2002; Schindler et al., 2019) oder den Zahlenstrahl (Simon & Schindler, 2020) betreffen. Es gibt Studien zum Thema *Raum und Form* – etwa zur ebenen oder räumlichen Geometrie (z. B. Merschmeyer-Brüwer, 2001; Shvarts et al., 2019) – und Studien zum Thema *Muster und Strukturen* sowie zu *Funktionen und funktionalem Denken* in unterschiedlichen Altersstufen (z. B. Chumachenko et al., 2014; Sprenger & Benz, 2020). Zudem wurden ET Studien zum Inhaltsbereich *Daten und Zufall* durchgeführt und betreffen die Stochastik und die Statistik (z. B. Boels et al., 2019; Bruckmaier et al., 2019; Lehner & Reiss, 2018).

Ebenso werden auch Prozesse in ET Studien untersucht – etwa das Führen und das Interpretieren von *Beweisen* (z. B. Beitlich et al., 2014; Panse et al., 2018). Zudem gibt es Studien zum *Problemlösen* – z. B. zum Nutzen von Darstellungen und zur Interpretation von Darstellungen beim Problemlösen (z. B. Hannula & Toivanen, 2019) – sowie Studien zum Umgang mit *Textaufgaben* – bspw. mit PISA-Aufgaben und zur Rolle des Lesens (z. B. Strohmaier et al., 2019; Strohmaier et al., 2020b). Es wurden insbesondere auch Studien zum Umgang mit Darstellungen bei Textaufgaben (z. B. Lee & Wu, 2018) und bspw. zu linguistischen Merkmalen bei Textaufgaben (z. B. Dröse et al., 2021) durchgeführt.

Neben diesen empirischen Arbeiten gibt es auch *theoretische und methodische Arbeiten* im Zusammenhang mit ET in der Mathematikdidaktik: So haben sich theoretische Arbeiten der Beziehung zwischen Blickbewegungen und dem mathematischen Denken und Arbeiten gewidmet (vgl. z. B. Shvarts, 2019). Methodische Arbeiten fokussieren etwa auf die Triangulation von ET Daten mit anderen Daten, bspw. aus (Stimulated Recall) Interviews (Schindler & Lilienthal, 2019; 2020), oder auf die Entwicklung von Datenauswertungsmethoden beim ET (Garcia Moreno-Esteva et al., 2018; Schindler, Schaffernicht & Lilienthal, 2019; 2020). Weitere methodische Arbeiten beschäftigen sich mit der Erforschung der Möglichkeiten und Grenzen von ET als Methode (z. B. Schindler & Lilienthal, 2018, 2019) – dies wird im vorliegenden Beitrag weiter ausgeführt (siehe über- nächster Abschnitt).

## Zur Interpretation von Blickbewegungen

Wenn ET Studien durchgeführt und Blickbewegungen untersucht werden, stellt sich stets die Frage, welchen zugrundeliegenden Forschungsinteressen dies dient: Soll über die Blickbewegungen die (visuelle) Aufmerksamkeit untersucht werden? Sollen über Blickbewegungen Rückschlüsse zu kognitiver Verarbeitung gezogen werden? Sind es kognitive Prozesse oder auch affektive Prozesse, die untersucht werden sollen – wenn sich bspw. die Freude über eine Entdeckung oder die Verunsicherung beim Bemerkens eines Fehlers in Blickbewegungen widerspiegeln? Andr a et al. (2015) halten bspw. fest: “The merit [of eye tracking] from a didactic perspective is that we can examine how and which information students are attending to” (S. 241). Sie verweisen damit auf die Aufmerksamkeit – und in der Tat wird bei vielen ET Studien die visuelle Aufmerksamkeit betrachtet. Hierbei wird zwischen *offener und verdeckter Aufmerksamkeit* unterschieden (engl. overt attention und covert attention) (Carrasco, 2011; Posner, 1980): Offene Aufmerksamkeit liegt dann vor, wenn die Augen sich unmittelbar zu dem Stimulus, dem die Aufmerksamkeit geschenkt wird, bewegen. Jedoch können auch ohne Bewegungen der Augen andere Bereiche, die nicht foveal betrachtet werden, sich jedoch im Gesichtsfeld befinden, wahrgenommen und diesen durchaus auch Aufmerksamkeit geschenkt werden: In diesem Fall spricht man von verdeckter Aufmerksamkeit.

Für die Interpretation von ET Daten wird häufig auf die sogenannte *Eye-Mind-Hypothesis* verwiesen (vgl. Just & Carpenter, 1980), die aussagt, dass es keinen nennenswerten Unterschied gibt zwischen dem, was mit den Augen fixiert wird, und jenem, was verarbeitet wird (vgl. Holmqvist et al., 2011). Just and Carpenter (1980) haben hierzu formuliert: „the eye remains fixated as long as the word is being processed” (S. 330). Wie hier bereits ersichtlich wird, stammt die Eye-Mind-Hypothesis ursprünglich aus der Anwendung des Lesens. Obgleich ihre Gültigkeit auch für die Analyse von Blickbewegungen in der Mathematikdidaktik häufig angenommen wird, lässt sich diese Annahme nicht selbstverständlich auf das Mathematiklernen übertragen (vgl. Schindler & Lilienthal, 2019): Bspw. kann der Blick auch auf Aspekten ruhen, denen keine Aufmerksamkeit geschenkt wird (Holmqvist et al., 2011), und so ist die Zuordnung von Blickbewegungen zu dem, was Menschen verarbeiten, nicht bijektiv (Hayhoe, 2004; Holmqvist et al., 2011) – und die Interpretation von Blickbewegungen zudem natürlich kontextabhängig, insbesondere bezogen auf die Aufgabe (Hayhoe, 2004).

## Forschung zu Chancen und Herausforderungen von Eye-Tracking in der Mathematikdidaktik

Aufgrund der Unsicherheit bzgl. der Interpretation von Blickbewegungen im Kontext mathematischen Lernens und Lehrens und der verbundenen Frage, welche Rückschlüsse Blickbewegungen zulassen, wurden und werden methodische Studien durchgeführt, die die Chancen und Herausforderungen von ET für die mathematikdidaktische Forschung in den Blick nehmen. Diese methodischen

Studien erfolgen subdomänenspezifisch – etwa im Bereich geometrischer Begründeaufgaben oder der Anzahlbestimmung –, da nicht davon ausgegangen werden kann, dass die Methode des ET in allen mathematischen Inhaltsbereichen gleiche Chancen und Herausforderungen bereithält: So können sich etwa im Bereich der Geometrie andere Herausforderungen für die Interpretation von Blickbewegungen geben als im Bereich der Arithmetik.

Schindler und Lilienthal (2018) haben die Chancen von ET für die Analyse von Vorgehensweisen von Kindern bei der Anzahlerfassung am Hunderterfeld und Rechenrahmen untersucht. Dabei wurde ein methodischer Vergleich der Erkenntnisse, die durch die Analyse von ET Videos erlangt wurden, zu jenen, die durch die Analyse des Lauten Denkens der Kinder erlangt wurden, vorgenommen. Dabei zeigte sich u. a., dass durch das ET z. T. Vorgehensweisen aufgedeckt werden konnten, die von Kindern beim Lauten Denken nicht berichtet wurden. Zusätzlich lieferte das ET vielfach detailliertere Einblicke in die Vorgehensweisen als die mündlichen Beschreibungen der Kinder. Das ET erwies sich als besonders nützlich bei Kindern mit Schwierigkeiten im Mathematiklernen und mit sonderpädagogischen Förderbedarfen – womöglich, weil metakognitive und/oder sprachliche Fähigkeiten die Berichte der Kinder beeinflussten oder weil Kinder ihre Vorgehensweisen möglicherweise teilweise als nicht angemessen empfanden und daher nicht berichteten. Zusammenfassend zeigte sich, dass sich die Vorgehensweisen der Kinder bei der Anzahlerfassung durch die Analyse von ET Videos gut bestimmen ließen und dass das ET hier große Chancen bot.

Im Bereich der Geometrie haben Schindler und Lilienthal (2019) eine Studie durchgeführt mit dem Ziel, sowohl Erkenntnisse zur subdomänenspezifischen Interpretation von Blickbewegungen im Bereich der Geometrie zu erlangen als auch zu untersuchen, inwiefern die Eye-Mind-Hypothese in der Geometrie gilt. Hierbei hat ein Schüler der Sekundarstufe 2 zunächst eine geometrische Begründeaufgabe bearbeitet, während er eine ET Brille trug. Anschließend hat er in einem Stimulated Recall Interview (SRI) das Video seiner Aufgabebearbeitung, in dem sein Blick als wandernder Punkt visualisiert war, betrachtet und seine Blickbewegungen kommentiert und Gedanken bei der Aufgabebearbeitung beschrieben. Die Ergebnisse der Studie zeigten auf, dass die Eye-Mind-Hypothese über weite Teile galt, dass aber Blickbewegungsmuster verschiedene kognitive und affektive Prozesse bedeuteten: So ging etwa das Hin- und Herblicken zwischen zwei Ecken einer Figur mit verschiedenen kognitiven Prozessen einher (z. B. dem Vergleichen von Winkeln, dem Vergleichen anliegender Flächen oder dem Vorstellen einer Linie). Interessanterweise zeigte sich, dass selbst wenn die Eye-Mind-Hypothese *nicht* galt, Blickbewegungsmuster bestimmte Arten von kognitiven und affektiven Prozessen andeuteten: So gingen flüchtige Blicke und Fixationen auf nicht-bedeutsame Aspekte der Aufgabendarstellung mit affektiver Erregung einher (z. B. Freude aufgrund einer Entdeckung oder Stress aufgrund von Zeitdruck oder des Bemerkens eines Fehlers). Zusammenfassend zeigte sich in dieser Studie, dass die Triangulation von ET mit SRIs im Bereich der geometrischen

Begründeaufgaben vorteilhaft schien, da die Deutung von Blickbewegungen ohne das SRI schwierig und die Daten teilweise ambig waren. Jedoch zeigte sich auch, dass die Kombination von ET und SRI genutzt werden kann, um subdomänenspezifische Interpretationstheorien zu entwickeln. Die Kombination von ET und SRI wurde zudem auch für empirische Zwecke genutzt – um etwa den kreativen Prozess im Bereich geometrischer Begründeaufgaben zu untersuchen (Schindler & Lilienthal, 2020). Die Kombination von ET und SRI hat es ermöglicht, neue Erkenntnisse zum kreativen mathematischen Prozess bei Schüler\*innen zu erlangen – etwas, das bislang nur rudimentär erforscht wurde. So konnten etwa Einsichten dazu gewonnen werden, welche Phasen der kreative Prozess haben kann, wie Ideen inkubiert werden oder es zu Aha!-Momenten kommt.

Anhand dieser exemplarisch dargestellten Studien wird ersichtlich, dass die Möglichkeiten wie auch die Herausforderungen der Methode des ET sich in verschiedenen mathematischen Inhaltsbereichen unterscheiden und dass daher jeweils subdomänenspezifisch (bzw. sogar aufgabenspezifisch) untersucht und betrachtet werden muss, welche Aussagen das ET zulässt und inwiefern eine Triangulation mit anderen Methoden wie Interviews sinnvoll und notwendig ist.

### **Trends, Zukunft und Fazit**

In der ET Forschung im Bereich der Mathematikdidaktik zeigt sich der Trend, dass Studien eine zunehmende Authentizität haben: Während die meisten ET Studien in der Vergangenheit mit Studierenden durchgeführt wurden, werden ET Studien zunehmend mit authentischen Proband\*innen, d. h. mit Kindern und Jugendlichen und auch mit aktiven Lehrkräften (wenn etwa Noticing-Prozesse von Lehrkräften oder die Interaktion mit Schüler\*innen im Klassenraum untersucht werden) durchgeführt (z. B. Haataja et al., 2019, 2020; Schindler et al., 2019). Es gibt zudem immer weniger Restriktionen bezüglich des ET Equipments: Schüler\*innen können relativ frei beweglich vor einem Bildschirm sitzen, sie können mit Papier und Stift arbeiten und dabei ET Brillen tragen – und sich hiermit sogar im Raum umher bewegen. ET Studien beschränken sich zudem nicht mehr nur auf das individuelle Aufgabebearbeiten einzelner Personen, sondern es gibt mehr und mehr ET Studien, die bspw. Partner- oder Gruppenarbeit oder die Interaktion mit der Lehrkraft im Klassenraum untersuchen (z. B. Haataja et al., 2019, 2020; Lilienthal & Schindler, 2017; Shvarts, 2019). Aktuelle Projekte, wie etwa die EARLI Emerging Field Group EyeTale (“Eye-Tracking for teaching and learning in the wild: developing solutions for educational research together“), deuten den Trend an, dass sich die Authentizität der Studien in Zukunft weiter erhöhen wird und dass das ET sich hinsichtlich seiner Einsatzmöglichkeiten weiterentwickeln wird. Zudem gibt eine zunehmende Vernetzung zur Methode des ETs innerhalb der Mathematikdidaktik und darüber hinaus (z. B. Klein et al., 2021).

Zusammenfassend deuten die Arbeiten und deren Ergebnisse an, dass das ET ein großes Potenzial für die Erforschung von mathematischen Lehr- und Lernprozessen zu haben scheint. Mithilfe von ET konnten neue Erkenntnisse über

mathematische Lehr- und Lernprozesse in verschiedenen Inhaltsbereichen erlangt werden und die Granularität von ET ermöglichte dabei oftmals detaillierte Einblicke in diese Prozesse. Allerdings geht ET Forschung auch mit verschiedenen Herausforderungen einher. Es gibt bspw. hohe Anforderungen an das Aufgabendesign. Zudem ist die Interpretation von ET nicht trivial: Es muss für die verschiedenen mathematischen Inhaltsbereiche jeweils betrachtet werden, wie Blickbewegungen interpretiert werden können und welche Rückschlüsse das ET ermöglicht. Für die Zukunft erweist es sich bspw. als günstig, methodische Voruntersuchungen durchzuführen, wenn etwa die Arbeit in einem neuen Inhaltsbereich begonnen wird. So können etwa durch Studien, die ET und SRI kombinieren, subdomänenspezifische Interpretationstheorien entwickelt werden, die für die Interpretation von Blickbewegungen herangezogen werden können, um die Unsicherheit der Interpretation zu reduzieren (s. Schindler & Lilienthal, 2019). Wenn eine sensible Interpretation von ET Daten – etwa aufbauend auf subdomänenspezifischen Interpretationstheorien – erfolgt, ermöglicht die Methode – ggf. in Triangulation mit weiteren Methoden – interessante Erkenntnisse, die die mathematikdidaktische Forschungslandschaft bereichern.

## Literatur

- Andrá, C., Lindström, P., Arzarello, F., Holmqvist, K., Robutti, O. & Sabena, C. (2015). Reading mathematics representations: An eye tracking study. *International Journal of Science and Mathematics Education*, 13, 237–259.
- Beitlich, J. T., Obersteiner, A., Moll, G., Mora Ruano, J. G., Pan, J., Reinhold, S. & Reiss, K. (2014). The role of pictures in reading mathematical proofs: An eye movement study. In P. Liljedahl, C. Nicol, S. Oesterle & D. Allan (Hrsg.), *Proceedings of the 38th Conference of the IG PME and the 36th Conf. of the NA Chapter of the PME* (Vol. 2, S. 121–128). PME.
- Biswas, P. & Langdon, P. (2014). Eye-gaze tracking based interaction in India. *Procedia Computer Science*, 39, 59–66.
- Boels, L., Bakker, A. & Drijvers, P. (2019). Eye-tracking secondary school students' strategies with interpreting statistical graphs. In M. Graven, H. Venkat, A. Essien & P. Vale (Hrsg.), *Proceedings of the 43rd Conference of the IGPME* (Vol. 2, S. 113–120). PME.
- Bruckmaier, G., Binder, K., Krauss, S. & Kufner, H. M. (2019). An eye-tracking study of statistical reasoning with tree diagrams and 2×2 tables. *Frontiers in psychology*, 10, 632.
- Carrasco, M. (2011). Visual attention: The past 25 years. *Vision research*, 51(13), 1484–1525.
- Chumachenko, D., Shvarts, A. & Budanov, A. (2014). The development of the visual perception of the Cartesian coordinate system: An eye tracking study. In C. Nicol, P. Liljedahl, S. Oesterle & D. Allan (Hrsg.), *Proceedings of the 38th Conference of the IGPME and the 36th Conference of the North American Chapter of the PME* (Vol. 2, S. 313–320). PME.
- Dröse, J., Prediger, S., Neugebauer, P., Danhier, R. D. & Mertins, B. (2021). Investigating students' processes of noticing and interpreting syntactic language features in word problem solving through eye-tracking. *International Electronic Journal of Mathematics Education*, 16(1), em0625.
- Duval, R. (2000). Basis issues for research in mathematics education. In T. Nakahara & M. Koyama (Hrsg.), *Proceedings of the 24th Conference of the IGPME* (Vol. 1, S. 55–69). PME.

- Garcia Moreno-Esteva, E., White, S. L., Wood, J. M. & Black, A. A. (2018). Application of mathematical and machine learning techniques to analyse eye tracking data enabling better understanding of children's visual cognitive behaviours. *Frontline Learning Research*, 6(3), 72–84.
- Haataja, E., Salonen, V., Laine, A., Toivanen, M. & Hannula, M.S. (2020). 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*. <https://doi.org/10.1007/s10648-020-09538-w>
- Hannula, M. & Toivanen, M. S. (2019). Making and observing visual representations during problem solving: An eye tracking study. In M. Graven, H. Venkat, A. Essien & P. Vale (Hrsg.). *Proceedings of the 43rd Conference of the IGPME* (Vol. 2, S. 328–335). PME.
- Hayhoe, M. (2004). Advances in relating eye movements and cognition. *Infancy*, 6, 267–274.
- Holmqvist, K., Nyström, M., Andersson, R., Dewhurst, R., Jarodzka, H. & van de Weijer, J. (2011). *Eye tracking: A comprehensive guide to methods and measures*. Oxford University Press.
- Just, M. A. & Carpenter, P. A. (1980). A theory of reading: From eye fixations to comprehension. *Psychological Review*, 87, 329–354.
- Klein, P., Graulich, N., Kuhn J. & Schindler, M. (2021.). *Eye-Tracking in der Mathematik- und Naturwissenschaftsdidaktik. Forschung und Praxis*. Springer Spektrum.
- Lee, W.-K. & Wu, C.-J. (2018). Eye movements in integrating geometric text and figure: Scanpaths and given new effects. *International Journal of Science and Mathematics Education*, 16, 699–714.
- Lehner, M. C. & Reiss, K. (2018). Entscheidungsstrategien an Vierfeldertafeln: eine Analyse mit Blickbewegungen. *Journal für Mathematik-Didaktik*, 39, 147–170.
- Leuders, T. & Prediger, S. (2005). Funktioniert's? – Denken in Funktionen. *PM*, 41, 1–7.
- Lilienthal, A. J. & Schindler, M. (2019). Current trends in the use of eye tracking in mathematics education research: A PME survey [v2]. <https://arxiv.org/abs/1904.12581>
- Lilienthal, A. J., & Schindler, M. (2017). Conducting dual portable eye-tracking in mathematical creativity research. In B. Kaur, W.K. Ho, T.L. Toh, & B.H. Choy (Hrsg.), *Proceedings of the 41st Conference of the IGPME* (Vol. 1, S. 233). PME.
- Merschmeyer-Brüwer, C. (2001). How do primary school pupils “see” and structure two-dimensional representations of cube configurations? Case studies with analyses of eye movements during spatial structuring processes. In H-G. Weigand, A. Peter-Koop, K. Reiss, G. Toerner & B. Wollring (Hrsg.), *Developments in mathematics education in German-speaking countries* (S. 83–97). Franzbecker.
- Obersteiner, A. & Tumpek, C. (2016). Measuring fraction comparison strategies with eye-tracking. *ZDM–Mathematics Education*, 48, 255–266.
- Panse, A., Alcock, L. & Inglis, M. (2018). Reading proofs for validation and comprehension: An expert-novice eye-movement study. *International Journal of Research in Undergraduate Mathematics Education*, 4, 357–375.
- Posner, M. I. (1980). Orienting of attention. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 32(1), 3–25.
- Radford, L. (2010). The eye as a theoretician: Seeing structures in generalizing activities. *For the Learning of Mathematics*, 30(2), 2–7.
- Rottmann, T. & Schipper, W. (2002). Das Hunderter-Feld – Hilfe oder Hindernis beim Rechnen im Zahlenraum bis 100?. *Journal für Mathematik-Didaktik*, 23, 51–74.

- Schindler, M., Bader, E., Lilienthal, A. J., Schindler, F. & Schabmann, A. (2019). Quantity recognition in structured whole number representations of students with mathematical difficulties: An eye-tracking study. *Learning Disabilities: A Contemporary Journal*, 17, 5–28.
- 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, 123–139.
- Schindler, M. & Lilienthal, A. J. (2020). Students' mathematical creativity process: Insights from eye-tracking stimulated recall interview. *International Journal of Science and Mathematics Education*, 18, 1565–1586.
- Schindler, M. & Lilienthal, A. J. (2018). Eye-tracking for studying mathematical difficulties—also in inclusive settings. In E. Bergqvist, M. Österholm, C. Granberg & L. Sumpter (Hrsg.), *Proceedings of the 42nd Conference of the IGPME* (Vol. 4, S. 115–122). PME.
- Schindler, M., Schaffernicht, E. & Lilienthal, A. J. (2020). Identifying student strategies through eye tracking and unsupervised learning: The case of quantity recognition. In M. Inprasitha, N. Changsri & N. Boonsena (Hrsg.), *Interim Proceedings of the 44th Conference of the IGPME* (S. 518–527). PME.
- Schindler, M., Schaffernicht, E. & Lilienthal, A. J. (2019). Differences in quantity recognition of students with and without mathematical difficulties: Analysis through eye-tracking and AI. In M. Graven, H. Venkat, A.A. Essien & P. Vale (Hrsg.), *Proceedings of the 43rd Conference of the IGPME* (Vol. 3, S. 281–288). PME.
- Shayan, S., Abrahamson, D., Bakker, A., Duijzer, C. A. & van der Schaaf, M. (2017). Eye-tracking the emergence of attentional anchors in a mathematics learning tablet activity. In C. Was, F. Sansosti, B. Morris (Hrsg.), *Eye-tracking technology applications in educational research* (S. 166–194). IGI Global.
- Shvarts, A. (2019). Theory, methodology and design as an insightful bundle: a case of dual eye-tracking student-tutor collaboration on an embodied mathematical task. In U. Jankvist, M. Van den Heuvel-Panhuizen, & M. Veldhuis (Hrsg.). (2019). *Proceedings of CERME11*. Utrecht University and ERME. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02418086>
- Shvarts, A., Chumachenko, D., Drenyova, A. & Krichevets, A. (2019). From prototypical phenomenon to dynamic functional system: Eye-tracking data on the identification of special quadrilaterals. In A. Shvarts (Hrsg.), *Proceedings of the PME and Yandex Russian conference: Technology and PME* (S. 122–129). HSE.
- Simon, A.L. & Schindler, M. (2020). A comparative analysis of eye tracking and thinking aloud in number line estimation tasks: A study on students with and without mathematical difficulties. In M. Inprasitha, N. Changsri & N. Boonsena (Hrsg.), *Interim Proceedings of the 44th Conference of the IGPME* (S. 537–545). PME.
- Sprenger, P. & Benz, C. (2020). Children's perception of structures when determining cardinality of sets—results of an eye-tracking study with 5-year-old children. *ZDM—Mathematics Education*, 52(4), 753–765.
- Strohmaier, A. R., Lehner, M. C., Beitlich, J. T. & Reiss, K. M. (2019). Eye movements during mathematical word problem solving—Global measures and individual differences. *Journal für Mathematik-Didaktik*, 40, 255–287.
- Strohmaier, A. R., MacKay, K. J., Obersteiner, A. & Reiss, K. M. (2020a). Eye-tracking methodology in mathematics education research: A systematic literature review. *Educational Studies in Mathematics*, 104, 147–200.
- Strohmaier, A. R., Schiepe-Tiska, A., Chang, Y.-P., Müller, F., Lin, F.-L., Reiss, K. M. (2020b). Comparing eye movements during mathematical word problem solving in Chinese and German. *ZDM—Mathematics Education*, 52, 45–58.