

Eye-Tracking-Studie zur Untersuchung von Strategien im Umgang mit Schaltplänen

Stefanie Peter*, Olaf Krey*

*Didaktik der Physik, Universität Augsburg, Universitätsstraße 1, 86159 Augsburg
stefanie.peter@physik.uni.augsburg.de

Kurzfassung

Beim Lernen, Anwenden und Kommunizieren physikalischer Konzepte spielen externe Repräsentationen eine zentrale Rolle. In der Elektrizitätslehre werden Schaltpläne genutzt, um elektrische Stromkreise auf einheitliche und übersichtliche Weise darzustellen. Der Umgang mit Schaltplänen stellt für Lernende jedoch eine Herausforderung dar. In einer Eye-Tracking-Studie untersuchen wir, inwiefern aus der visuellen Aufmerksamkeit von Lernenden beim Lösen von Aufgaben zu elektrischen Stromkreisen Strategien im Umgang mit Schaltplänen rekonstruiert werden können. Erste Ergebnisse aus der Pilotstudie zeigen Unterschiede im visuellen Verhalten der Lernenden, welche unterschiedliche Strategien im Umgang mit Schaltplänen andeuten, die im Zusammenhang mit verschiedenen Argumentationsweisen stehen.

1. Einleitung

Physikalische Konzepte und Inhalte werden mithilfe einer Vielzahl verschiedener externer Repräsentationen kommuniziert. Dazu zählen sowohl domänenübergreifende Darstellungen wie beispielsweise Liniendiagramme, als auch domänenspezifische Darstellungen wie Schaltpläne elektrischer Stromkreise. Insbesondere bei domänenspezifischen Repräsentationen, kann es zum „Representational Dilemma“ kommen: Lernende müssen ihnen unbekannte Inhalte und Konzepte mithilfe von Repräsentationen lernen, die für sie ebenfalls neu sind (Rau, 2017). Für das Lernen fachlicher Konzepte werden also auch entsprechende Kompetenzen im Umgang mit den spezifischen Repräsentationen benötigt. Elektrische Stromkreise können mithilfe von Schaltplänen auf übersichtliche und konventionalisierte Weise dargestellt werden und sind eine viel genutzte Repräsentation in der Elektrizitätslehre. Konkrete Schwierigkeiten im Umgang mit Schaltplänen stellen das Erkennen von Reihen- und Parallelschaltungen oder die Translation zwischen Schaltplänen und realen Stromkreisen dar (McDermott & Shaffer, 1992). Für die Elektrizitätslehre wurden eine Vielzahl an Lernendenvorstellungen beschrieben (Überblick bei Wilhelm and Hopf (2018)) und auch nach dem Unterricht mit aktuellen Konzeptionen sind die Leistungen der Schüler*innen nicht zufriedenstellend (Burdé & Wilhelm, 2020). Insbesondere das „lokale Denken“ und die „sequenzielle Argumentation“ deuten eine gewisse Lesart eines Schaltplans an. Obwohl gängige Schülervorstellungstest Schaltpläne als Repräsentationsform nutzen (Ivanjek et al., 2021; Rhöneck, 1986; Urban-Woldron & Hopf, 2012) und diese auch im Lernmaterial üblicherweise zur Darstellung von Stromkreisen genutzt werden, ist die konkrete Auseinandersetzung von Lernenden mit Schaltplänen noch nicht systematisch untersucht.

2. Theoretische Einordnung

Wird Lernenden Material mit Text-Bild-Kombinationen präsentiert, können die kognitiven Prozesse mithilfe der „Cognitive Theory of Multimedia Learning“ (CTML) beschrieben werden (Mayer, 2014): Bei der Verarbeitung visuell bildlicher Repräsentationen werden demnach Abbildungsaspekte durch Selektionsprozesse in das Arbeitsgedächtnis aufgenommen. Verschiedene Abbildungsaspekte werden durch Organisationsprozesse zusammen mit dem Vorwissen aus dem Langzeitgedächtnis zu einem mentalen Modell integriert. Diese kognitiven Prozesse werden in der CTML als Prozesse der Informationsverarbeitung beschrieben. Werden Lernende jedoch mit Aufgaben- und Problemlösematerial konfrontiert, gibt das Problem oder die Aufgabe ein konkretes Ziel für die Informationsverarbeitung vor. In diesem Kontext wird das Verhalten sowie die kognitiven Prozesse, die dem Erreichen des Ziels dienen, als Strategien bezeichnet (Bjorklund & Kipp Harnishfeger, 1990). Dabei können je nach Definition des Strategiebegriffs auch Prozesse eingeschlossen werden, die unbewusst ablaufen und für die Person nicht beschreibbar sind, was insbesondere dann sinnvoll erscheint, wenn durch Übung aus ursprünglich bewusste Prozessen Automatismen werden (Ashcraft, 1990). Weisen Lernende Vorwissen zu einer Repräsentation und der entsprechenden Domäne auf, hat dies Einfluss auf die verschiedenen Prozesse der Informationsverarbeitung (Gegenfurtner, 2020). In Bezug auf den Umgang mit fachspezifischen Repräsentationen eignet sich die Beschreibung des Vorwissens in Form von Repräsentationskompetenzen. Rau (2017) unterteilt diese in „konzeptuelle Kompetenzen“, „perzeptuelle Kompetenzen“ und „meta-repräsentationale Kompetenzen“. Zu den konzeptuellen Kompetenzen gehört unter anderem die Fähigkeit die Repräsentation mit Konzepten zu verknüpfen, zu den perzeptuellen

Kompetenzen das intuitive Erfassen von Repräsentationen sowie der mühelose Wechsel zwischen Repräsentationen und zu den meta-repräsentationalen Kompetenzen die Fähigkeit geeignete Repräsentationen auszuwählen (ebd.). Während bereits konkretere Formulierungen von Kompetenzen im Umgang Liniendiagrammen vorliegen (Lachmayer et al., 2007), wurden Kompetenzen im Umgang mit Schaltplänen noch nicht genauer beschrieben.

3. Eye-Tracking zur Untersuchung von Strategien

Beim Eye-Tracking handelt es sich um eine Untersuchungsmethode, bei der die Blickbewegungen von Studienteilnehmenden auf einen Stimulus untersucht werden. Diese Methode findet in der physikdidaktischen Forschung immer häufiger Anwendung (Hahn & Klein, 2022). Theoretisch begründet werden Eye-Tracking-Studien meist durch die „Eye-Mind-Assumption“ von Just und Carpenter (1980), die sich ursprünglich auf das Leseverstehen bezieht und besagt, dass Punkte der visuellen Aufmerksamkeit mit den kognitiven Prozessen in Beziehung stehen. Studien zeigen jedoch auch, dass die Eye-Mind-Assumption sich nicht allen Bereichen anwenden lässt und Blickbewegungen auch mehrdeutig sein können (Schindler & Lilienthal, 2019; Wu et al., 2021). In der physikdidaktischen Forschung kommt Eye-Tracking als Methode überwiegend in quantitativen Studien zum Einsatz (Hahn & Klein, 2022). In Nachbardisziplinen wie der mathematik- oder biologiedidaktischen Forschung finden sich jedoch auch Studien, die qualitative Ansätze verfolgen, um die Eignung der Eye-Mind-Hypothese zu testen oder konkrete Strategien und Vorgehensweise beim Lösen von Aufgaben zu rekonstruieren (Baumanns et al., 2024; Kastaun & Meier, 2022; Thomaneck et al., 2022). Beispielsweise finden Baumanns et al. (2024) verschiedene Typen der Mustererkennung durch eine qualitative Inhaltsanalyse von Eye-Trackingdaten. Bisherige Eye-Tracking-Studien, in denen die Teilnehmenden Aufgaben aus der Elektrizitätslehre bearbeiteten, deuten auf Unterschiede im Vorgehen zwischen Experten und Novizen hin, liefern allerdings keine systematische Analyse von Strategien oder Vorgehensweisen im Umgang mit Schaltplänen (Rosengrant et al., 2009; Van Gog et al., 2005).

4. Forschungsfragen

Die Elektrizitätslehre stellt Lernende vor große Herausforderungen, was sich in einer Vielzahl fachlich unzureichenden Vorstellungen auch nach dem Unterricht äußert. Obwohl der sichere Umgang mit Repräsentationen einen wichtigen Stellenwert für das Lernen physikalischer Konzepte einnimmt, wurden die zum Einsatz kommenden Strategien im Umgang mit Schaltplänen als Repräsentation elektrischer Stromkreise bisher nicht systematisch untersucht. Mit unserem Projekt sollen daher die folgenden Forschungsfragen beantwortet werden:

- 1) Inwiefern können aus der visuellen Aufmerksamkeit und den Lösungen von Aufgaben aus der Elektrizitätslehre Strategien im Umgang mit Schaltplänen rekonstruiert werden?
- 2) Welchen Einfluss hat das Vorwissen der Lernenden auf die Strategien im Umgang mit Schaltplänen?

Nachfolgend werden Methoden und ausgewählte Ergebnisse der Pilotstudie vorgestellt, mit der die Eignung des Materials und Vorgehens zur Beantwortung der Forschungsfragen geprüft wurde.

5. Methode

5.1. Stichprobe

Um insbesondere auch Strategien zu erheben, die von Lernenden mit höherer Expertise verwendet werden, wurde als Versuchsgruppe Studierende der Physik und assoziierte Studiengänge gewählt und keine Schüler*innen. Die Erhebung wurde mit N=16 Teilnehmenden (9 weiblich) durchgeführt.

Tab. 1: Studiengänge der Teilnehmenden.

Studiengang	Teilnehmende
Bachelor of Science	5
Lehramt Physik	9
Promotion Fachdidaktik Physik	2

Tabelle 1 gibt einen Überblick über die Studiengänge der Teilnehmenden. Es wurde eine diverse Stichprobe gewählt, um ein breites Spektrum von Strategien abzubilden. Alle Teilnehmenden haben die Einführungsvorlesung zu Elektrodynamik belegt. Die Teilnehmenden waren im Mittel „eher interessiert“ an Themen der Elektrizitätslehre (6-stufige Likert-Skala (1 - 6), $\bar{x} = 4,3$; $\sigma = 1,3$). Da die Audioaufnahme einer Person während der Erhebung abgebrochen ist, konnten diese Daten nicht in die Auswertung eingeschlossen werden

5.2. Material

Das Erhebungsmaterial kann in drei Abschnitte unterteilt werden: einen Fragebogen, Multiple-Choice-Aufgaben und offene Aufgaben. Der Fragebogen dient zum einen der Erhebung demografischer Informationen und zum anderen der Erhebung des

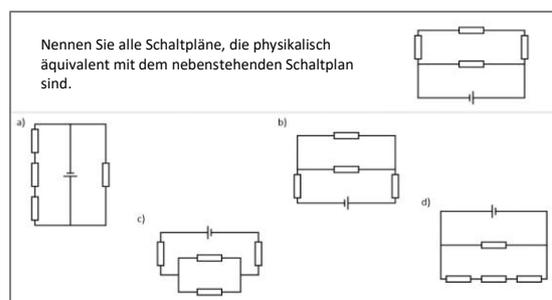


Abb. 1: Multiple-Choice-Aufgabe zur Erhebung perzeptueller Fähigkeiten

Vorwissen bezüglich der konventionellen Schaltsymbole und der grundsätzlichen Gesetzmäßigkeiten in Reihen- und Parallelschaltungen (u.a. Knoten- und Maschenregel). Dabei sind alle Gesetzmäßigkeiten und Symbole eingeschlossen, die für die Beantwortung der offenen Aufgaben notwendig sind. Mithilfe der Multiple-Choice-Aufgaben (insgesamt drei) werden die perzeptuellen Fähigkeiten der Teilnehmenden erhoben. Abb. 1 zeigt eine Beispielaufgabe. Hierbei sollen alle zu einem vorgegeben Schaltplan physikalisch äquivalenten Schaltpläne identifiziert werden. Die Teilnehmenden wurden dazu angehalten, die Aufgaben so schnell wie möglich zu bearbeiten, hatten allerdings kein vorgegebenes Zeitlimit.

In den elf offenen Aufgaben müssen die Teilnehmenden ihr Konzeptverständnis bezüglich der Größen Spannung und Stromstärke auf verschiedene durch Schaltpläne präsentierte Stromkreise anwenden. Sechs dieser Aufgaben wurden selbst entwickelt, zwei wurden in Anlehnung an Aufgaben aus einem Schülervorstellungstest (Urban-Woldron & Hopf, 2012) dem offenen Aufgabendesign angepasst und drei Aufgaben einer Unterrichtszeitschrift entnommen (Burzin, 2002). Es handelt sich ausschließlich um qualitative Aufgaben und die Teilnehmenden wurden dazu angehalten, ihre Antwort so ausführlich wie möglich zu begründen. In Abb. 3 ist exemplarisch eine der offenen Aufgaben dargestellt.

5.3. Durchführung



Abb. 2: Übersicht über den Ablauf der Studie und schematische Darstellung des Aufbaus für das stationäre Eye-Tracking.

Der Fragenbogen wurde in gedruckter Form ausgefüllt. Sowohl die Multiple-Choice-Aufgaben als auch die offenen Aufgaben wurden am Computer-Bildschirm bearbeitet. Das Vorgehen für die Aufgaben wurde zunächst durch die Versuchsleiterin erläutert. Für die Multiple-Choice-Aufgaben wurden die Teilnehmenden dazu angehalten, die Aufgaben so schnell wie möglich zu bearbeiten, hatten allerdings kein vorgegebenes Zeitlimit.

Für die offenen Aufgaben wurde ein dreigeteilter Ablauf gewählt: Die Aufgabe wurde präsentiert und eine Lösung sollte erarbeitet werden. Bevor geantwortet wird, bewerten die Teilnehmenden ihre Antwortssicherheit auf einer vier-Stufigen Skala (sehr sicher bis nicht sicher). Im letzten Schritt beantworten die Teilnehmenden die Aufgabe und begründen ihre Antwort. Während der gesamten Erhebung konnten die Teilnehmenden in ihrem Tempo arbeiten, indem sie sich durch Mausklücke selbstständig durch die Aufgaben navigieren. Alle Antworten wurde mit einem

Audiorekorder aufgenommen. Die Möglichkeit sich während der Bearbeitung der Aufgaben Notizen zu machen, wurde den Teilnehmenden freigestellt. Der Notizbereich wurde aus diesem Grund mit einer Videokamera aufgenommen. Die Aufgaben wurden auf einem 27 Zoll LED Bildschirm mit einer Auflösung von 1920 x 1200 Bildpunkten präsentiert. Die Blickbewegungen wurden für die Multiple-Choice-Aufgaben und für offenen Aufgaben mit einem Tobii-X3-120 mit einer Aufnahme Frequenz von 120 Hz aufgezeichnet. Für die Auswertung der Strategien wurden die Eye-Tracking-Daten während der Bearbeitung der offenen Aufgaben verwendet.

6. Auswertung

6.1. Fragebogen, Multiple Choice- und offene Aufgaben

Die Antworten für die Aufgaben des Fragebogen wurden auf Korrektheit geprüft. Bei den Multiple-Choice-Aufgaben wurde sowohl die Korrektheit der Antworten als auch die für das Erkennen der äquivalenten Schaltpläne benötigte Zeit ausgewertet. Bei den offenen Aufgaben wurde für einen Überblick über die Leistungen für jede Aufgabe jeweils bewertet, ob die Veränderung der physikalischen Größe korrekt angegeben wurde und ob eine richtige Begründung für die entsprechende Veränderung genannt wurde. Für die Rekonstruktion der Strategien wurden Fälle ausgewählt, bei denen die Teilnehmenden ausführliche Antworten gegeben haben und keine Notizen angefertigt haben, da die Eye-Tracking-Daten durch die Anfertigung von Notizen maßgeblich beeinflusst wurden. Für diese Fälle wurden in den Antworten zudem kodiert, anhand welcher physikalischer Größen argumentiert wird (Stromstärke, Spannung, Widerstand) bzw. welche Lernendenvorstellungen gegebenenfalls zu finden sind.

6.2. Eye-Tracking-Daten

Für die Auswertung der Eye-Trackingdaten werden „Areas of Interest“ (AOI) für jede Aufgabe festgelegt. Dabei handelt es sich um markierte Bereiche, für welche die weiteren Eye-Tracking-Metriken bestimmt werden. Abbildung 3 zeigt exemplarisch die festgelegten AOI für eine der Aufgaben. Für die Rekonstruktion der Strategien werden die Blickpfade betrachtet. Um diese übersichtlich darzustellen werden



Abb. 3: Festlegung der AOI für die Aufgabe. Alle Komponenten, die Beschreibung (Hellgrün) und die Aufgabe (dunkelgrün) werden als AOI definiert. In Parallelschaltungen wurden zudem die Knotenpunkte als AOI definiert

Sequenzdiagramme geplottet. Dabei wird die Reihenfolge der Fixationen für die AOI aufgetragen. Zum einen führt dies zu einer Reduktion der Daten auf den Bereich der AOI und die Anzahl der Fixationen, zum anderen werden auf diese Weise die Blickbewegungen für die gesamte Bearbeitungsdauer in einem Diagramm sichtbar. Die Abbildung 4 verdeutlicht, wie die Daten in einem Sequenzdiagramm dargestellt werden. Zudem wurde das Fixations-Transitions-Verhältnis (R) bestimmt (Rodemer et al., 2020).

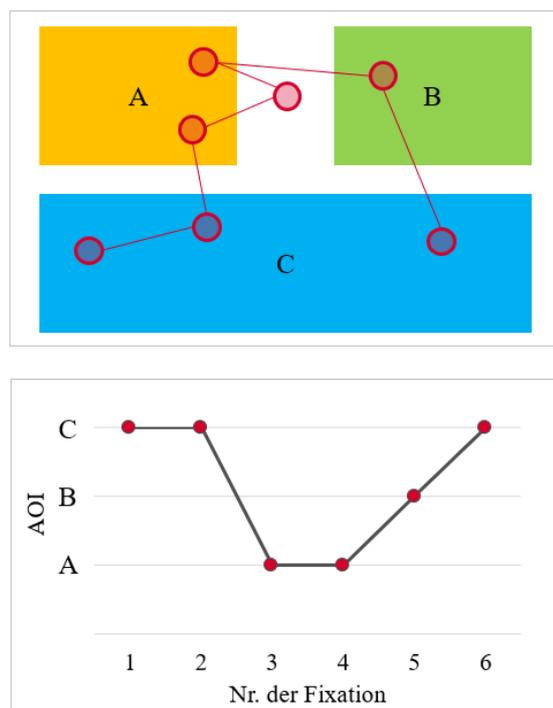


Abb. 4: Oben: Blickpfad, der die Fixationen (rote Kreise) auf die AOI (A, B, C) zeigt. Unten: Sequenzdiagramm des Blickpfades für die AOI.

7. Ausgewählte Ergebnisse

Die Ergebnisse der Leistung der Teilnehmenden können der Tabelle 2 entnommen werden. Insgesamt fällt auf, dass obwohl die Teilnehmenden die Symbole und Gesetzmäßigkeiten im Fragebogen korrekt wiedergeben können, das Wissen in den offenen Aufgaben nicht oder nur zum Teil anwenden können.

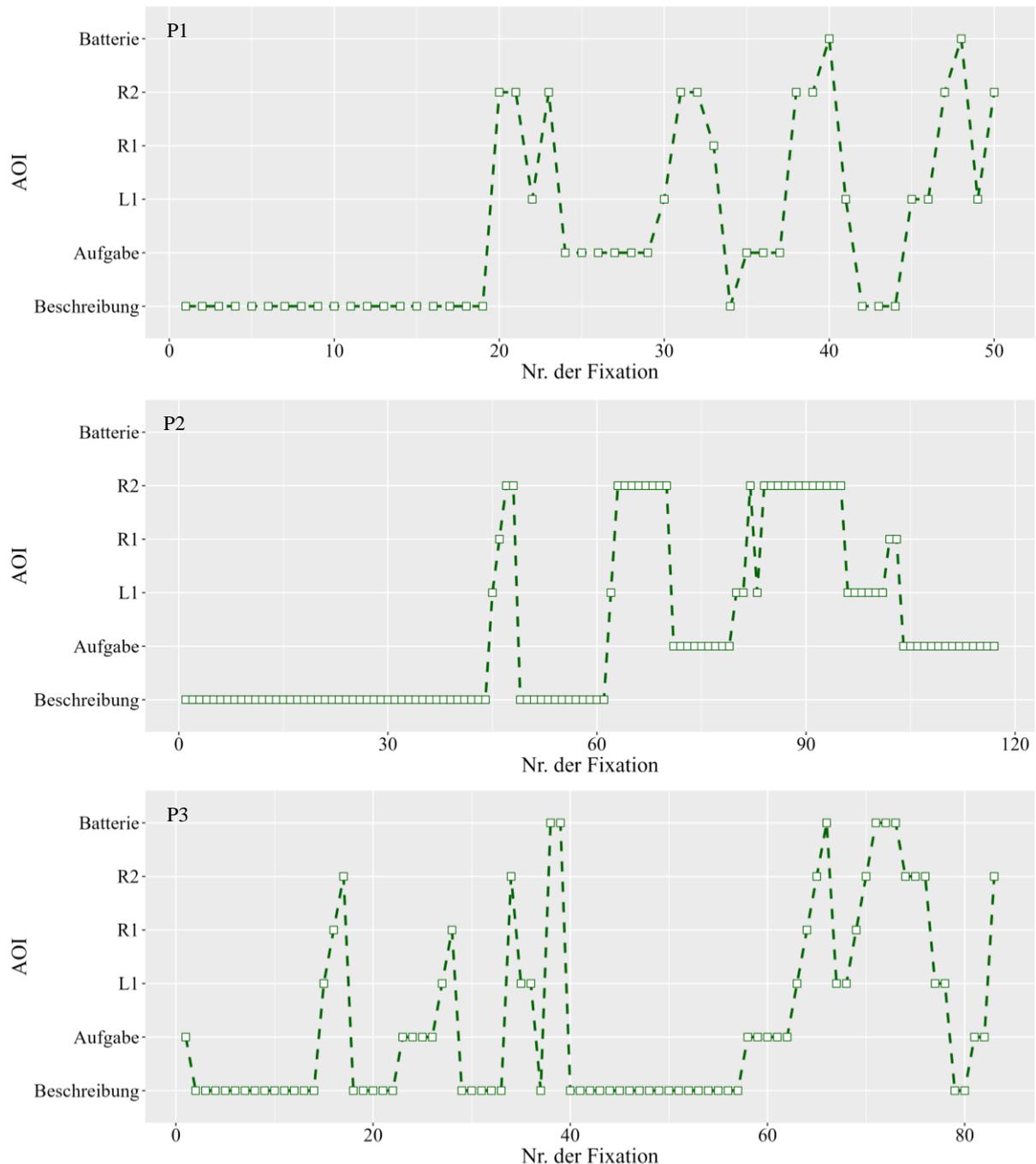
7.1. Visuelle Strategien

Im Folgenden werden die Strategien von drei Personen (P1, P2, P3) zu der Aufgabe aus Abb. 3 exemplarisch dargestellt und kontrastiert. Abb. 5 stellt die Sequenzen der Fixationen der Teilnehmenden gegenüber. Da die Teilnehmenden unterschiedlich viel Zeit für die Bearbeitung der Aufgabe benötigt haben, weisen die Diagramme in Abb. 5 unterschiedlich viele Fixationen auf. Alle drei Teilnehmenden lesen sich zunächst den Beschreibungstext durch, woraufhin der Blick zum ersten Mal auf den Schaltplan fällt. Während P2 und P3 die Komponenten von der Mitte aus beginnend in Blick nehmen (Lampe L1 in der Mitte,

Tab. 2: Überblick über den Anteil korrekter Antworten (AW) der Teilnehmenden (N) im Fragebogen (FB), den Multiple-Choice-Aufgaben (MCA) und den offenen Aufgaben (OA) in Prozent der insgesamt zu erreichenden Punkte. Für die Multiple-Choice-Aufgaben wurde zusätzlich die für die Aufgaben im Durchschnitt benötigte Zeit (\bar{t}) in Sekunden (s) und die Standardabweichung davon berechnet.

N	FB	MCA		OA	
	AW (%)	AW (%)	\bar{t} (s)	σ_t (s)	AW (%)
1	93	100	38,7	8,2	45
2	72	100	32,1	8,5	27
3	80	100	15,3	1,6	30
4	80	40	23,7	1,5	95
5	52	100	76,7	13,6	41
6	87	20	51,9	19,4	23
7	77	60	85,9	32,8	73
8	100	60	25,3	9,2	64
9	82	100	50,4	5,5	45
10	82	80	84,2	18,5	27
11	78	80	36,1	13,4	73
12	83	80	38,0	5,0	55
13	82	40	93,3	36,2	23
14	28	0	30,8	2,5	11
15	97	40	53,8	5,3	20
MW	78	67	49,1		43
SD	17	32	24,1		23

dann die Widerstände links und rechts von der Lampe), betrachtet P1 zunächst den Widerstand R2, der laut Beschreibungstext verändert wird, die Lampe und danach noch einmal den Widerstand R2. P2 und P3 kehren noch einmal zum Beschreibungstext zurück, woraufhin P2 noch einmal die Lampe fixiert und danach mehrere Fixationen nacheinander beim Widerstand R2 verharrt. Diese Überblicksphase endet für alle Teilnehmenden mit dem Lesen der Aufgabe. Danach beginnt die Aufgabenphase, in der die Aufgabe bearbeitet wird. Dabei zeichnet sich bei P1 insgesamt eine eher globale Strategie ab. Es werden alle Komponenten betrachtet und es finden viele Transitionen zwischen den Komponenten statt. P2 weist hingegen ein lokal fokussierendes Verhalten auf. Dabei werden insbesondere die für die Beantwortung der Aufgabe wichtigen Komponenten des Schaltplans mehrfach fokussiert, bevor zu einer anderen Komponente gewechselt wird. Diese beiden verschiedenen Blickverhalten spiegeln sich auch in unterschiedlichen Fixations-Transitions-Verhältnissen wider ($R_{P1} = 2,8$; $R_{P2} = 8,4$). P3 wiederum betrachtet ebenfalls alle Komponenten und weist viele Transitionen auf ($R_3 = 3$). Während bei P1 und P2 ein großer Anteil der Transitionen Verknüpfungen zwischen R2 und L1 sind (Bei P1 ~ 28 %, bei P2 ~ 36 %), welche in einer Ursache-Wirkungs-Beziehung stehen, ist der Anteil der Transitionen zwischen R2 und L1 bei P3 mit ca. 7 % im Vergleich deutlich geringer. Stattdessen ist bei P3 die Sequenz aus der Überblicksphase (L1 – R1 – R2) auch nach lesen der Aufgabe noch mehrfach zu finden. Somit wird nach der Lampe der Widerstand R1, welcher gemäß der technischen Stromrichtung „vor“ der Lampe liegt, und dann erst



Aufgaben auf. In der Überblicksphase zeichnet sich ein Unterschied zwischen einer eher textgeleiteten Erschließung (P2) und einer eher abbildungsgeleiteten Erschließung (P3) ab oder der einer Kombination (P1, erst abbildungs- dann textgeleitet). Nach der Überblicksphase finden sich bei P1 und P2 neue Strategien bei der Auseinandersetzung mit dem Schaltplan. Während bei P1 eine eher globale Strategie verfolgt, ist bei P2 eine lokal fokussierende Strategie zu finden. Bei beiden Teilnehmenden findet jedoch eine visuelle Verknüpfung der Komponenten, die in einer Ursache-Wirkungs-Beziehung stehen, statt. Bei P3 hingegen ist die Strategie aus der Überblicksphase auch in der Aufgabenphase wiederzufinden und es ist keine deutlich Verknüpfung der Komponenten, die in einer Ursache-Wirkungsbeziehung stehen, zu finden. Die aus den visuellen Daten rekonstruierten Strategien spiegeln sich ebenfalls in den Argumentationen der Teilnehmenden wider. P1 argumentiert auf globaler System-Ebene während P2 auf einer lokalen Ebene begründet. Bei P3 findet eine sequenzielle Argumentation statt. Diese kennzeichnet sich in diesem Fall nicht durch ein striktes sequenzielles Blickverhalten, jedoch deutet das Blickverhalten auf ein Unterteilung in „vor“ und „nach“ der Lampe hin.

9. Ausblick

Insgesamt zeigt sich, dass die hier vorgestellte Methode einen vielversprechenden Ansatz darstellt, die Strategien im Umgang mit Schaltplänen zu rekonstruieren. Aus dem für die Pilotierung verwendeten Aufgabenpool konnten eine Auswahl an Aufgaben für die Haupterhebung getroffen werden, die verschiedene Arten von Schaltungs- und Aufgabentypen einschließen. Der Aufgabentyp für das Erkennen äquivalenter Schaltpläne wurde von Multiple-Choice-Aufgaben zu Ja-Nein-Fragen verändert, bei denen lediglich zwei Schaltpläne gleichzeitig präsentiert werden. Um ausreichende Argumentationen zu gewährleisten, wurde zudem den Teilnehmenden die Möglichkeit genommen eigenständig durch die Aufgaben zu navigieren. Dies übernimmt die Versuchsleiterin, sodass gegebenenfalls noch einmal nach Begründungen für die Antwort gefragt werden kann. Die veränderte Studie wird im Rahmen der Haupterhebung mit einer größeren Stichprobe durchgeführt.

10. Literatur

- Ashcraft, M. H. (1990). Strategic processing in children's mental arithmetic: a review and proposal. In D. F. Bjorklund (Ed.), *Children's Strategies: contemporary views of cognitive development* (pp. 185-211). Psychology Press.
- Baumanns, L., Pitta-Pantazi, D., Demosthenous, E., Lilienthal, A. J., Christou, C., & Schindler, M. (2024). Pattern-Recognition Processes of First-Grade Students: An Explorative Eye-Tracking Study. *International Journal of Science and Mathematics Education*. <https://doi.org/10.1007/s10763-024-10441-x>
- Bjorklund, D. F., & Kipp Harnishfeger, K. (1990). Children's strategies: Their definition and origins. In D. F. Bjorklund (Ed.), *Children's Strategies: contemporary views of cognitive development* (pp. 309-323). Psychology Press.
- Burde, J.-P., & Wilhelm, T. (2020). Teaching electric circuits with a focus on potential differences. *Physical Review Physics Education Research*, 16(2). <https://doi.org/10.1103/physrevphyseducres.16.020153>
- Burzin, S. (2002). Physikaufgaben zum Nachdenken. *Naturwissenschaften im Unterricht Physik*, 67, 28-30.
- Gegenfurtner, A. (2020). *Professional vision and visual expertise* University of Regensburg.
- Hahn, L., & Klein, P. (2022). Eye tracking in physics education research: A systematic literature review. *Physical Review Physics Education Research*, 18(1), 013102.
- Ivanjek, L., Morris, L., Schubatzky, T., Hopf, M., Burde, J.-P., Haagen-Schützenhöfer, C., Dopatka, L., Spatz, V., & Wilhelm, T. (2021). Development of a two-tier instrument on simple electric circuits. *Physical Review Physics Education Research*, 17(2). <https://doi.org/10.1103/physrevphyseducres.17.020123>
- Just, M. A., & Carpenter, P. A. (1980). A theory of reading: from eye fixations to comprehension. *Psychological review*, 87(4), 329.
- Kastaun, M., & Meier, M. (2022). Eine qualitative Analyse von Blickdaten bei statischen und dynamischen Repräsentationen im naturwissenschaftlichen Erkenntnisprozess. In (pp. 19-39). Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-662-63214-7_2
- Lachmayer, S., Nerdel, C., & Pechtl, H. (2007). Modellierung kognitiver Fähigkeiten beim Umgang mit Diagrammen im naturwissenschaftlichen Unterricht (Modelling of cognitive abilities regarding the handling of graphs in science education). *Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften*, 13, 161-180.
- Mayer, R. E. (2014). Cognitive Theory of Multimedia Learning. In R. E. Mayer (Ed.), *The Cambridge Handbook of Multimedia Learning* (2 ed., pp. 43-71). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9781139547369.005>
- McDermott, L. C., & Shaffer, P. S. (1992). Research as a guide for curriculum development: An example from introductory electricity. Part I: Investigation of student understanding. *American Journal of Physics*, 60(11), 994-1003. <https://doi.org/10.1119/1.17003>
- Rau, M. A. (2017). Conditions for the Effectiveness of Multiple Visual Representations in Enhancing STEM Learning. *Educational*

- Psychology Review*, 29(4), 717-761.
<https://doi.org/10.1007/s10648-016-9365-3>
- Rhöneck, C. v. (1986). Vorstellungen vom elektrischen Stromkreis und zu den Begriffen Strom, Spannung und Widerstand. *Naturwissenschaften im Unterricht-Physik*, 34(13), 10-14.
- 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.
- Rosengrant, D., Thomson, C., Mzoughi, T., Sabella, M., Henderson, C., & Singh, C. (2009). Comparing Experts and Novices in Solving Electrical Circuit Problems with the Help of Eye-Tracking. *AIP Conference Proceedings* 5 November 2009; 1179 (1)
- 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>
- Thomanek, A., Vollstedt, M., & Schindler, M. (2022). What can eye movements tell about students' interpretations of contextual graphs? A methodological study on the use of the eye-mind hypothesis in the domain of functions. *Frontiers in Education*, 7. <https://doi.org/10.3389/feduc.2022.1003740>
- Urban-Woldron, H., & Hopf, M. (2012). Entwicklung eines Testinstruments zum Verständnis in der Elektrizitätslehre *Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften*, 18, 201-227.
- Van Gog, T., Paas, F., & Van Merriënboer, J. J. G. (2005). Uncovering expertise-related differences in troubleshooting performance: combining eye movement and concurrent verbal protocol data. *Applied Cognitive Psychology*, 19(2), 205-221. <https://doi.org/10.1002/acp.1112>
- Wilhelm, T., & Hopf, M. (2018). Schülervorstellungen zum elektrischen Stromkreis. In H. Schecker, T. Wilhelm, M. Hopf, & R. Duit (Eds.), *Schülervorstellungen und Physikunterricht: Ein Lehrbuch für Studium, Referendariat und Unterrichtspraxis* (pp. 115-138). Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-662-57270-2_6
- Wu, C.-J., Liu, C.-Y., Yang, C.-H., & Jian, Y.-C. (2021). Eye-movements reveal children's deliberative thinking and predict performance on arithmetic word problems. *European Journal of Psychology of Education*, 36(1), 91-108. <https://doi.org/10.1007/s10212-020-00461-w>