

Untersuchung der Wahrnehmung von Feynman-Diagrammen mittels Eye Tracking

Merten Dahlkemper^{*,+}, Jeff Wiener^{*}, Andreas Müller[°], Sascha Schmeling^{*}, Pascal Klein⁺

^{*} CERN, Esplanade de Particules 1, CH-1211 Genève 23, Schweiz,

⁺ Fakultät für Physik, Abteilung Didaktik der Physik, Universität Göttingen, Friedrich-Hund-Platz 1, 37077 Göttingen,

[°] Faculty of Science/Physics Section IUFE, Universität Genf, Pavillon d'Uni Mail, Boulevard du Pont d'Arve 40, CH-1211 Genève, Schweiz
merten.dahlkemper@cern.ch

Kurzfassung

Seit mehr als 70 Jahren sind Feynman-Diagramme (FD) aus der Elementarteilchenphysik kaum mehr wegzudenken, da sie komplexe Rechnungen auf eine kompakte Weise veranschaulichen. Dies wird vielfach auch für die Behandlung im Schulunterricht genutzt. Aus fachdidaktischer und lerntheoretischer Sicht wird der Nutzen verschiedener Repräsentationsformen zum Problemlösen und Lernen als zentral erachtet. Dennoch wird im Rahmen der Vermittlung von Teilchenphysik kontrovers darüber diskutiert, ob und in welcher Form FD im Unterricht der Schule vorkommen sollen, da umstritten ist, inwiefern der Nutzen dieser Darstellungen ihre potentiellen Nachteile durch resultierende Missverständnisse und Fehlvorstellungen übersteigt. Diese Schwierigkeiten und das Fehlen empirischer Untersuchungen zum visuellen Umgang mit FD weisen auf den Forschungsbedarf zu diesem Thema hin. Das Lernen mit graphischen Repräsentationen wie Feynman-Diagrammen beinhaltet visuelle Prozesse. Um diese Prozesse genauer zu untersuchen, verwenden wir Eye Tracking als eine inzwischen auch in den Fachdidaktiken zunehmend verbreitete Methode zur Messung der visuellen Aufmerksamkeit, die uns Einblick in die kognitiven Prozesse geben kann. Die Stichprobe unserer Eye Tracking-Studie setzt sich zum einen aus Studierenden zusammen, die mit der Repräsentationsform nicht vertraut sind, und zum anderen aus Forschenden in dem Gebiet der Elementarteilchenphysik. Das mittelfristige Ziel der Arbeit ist, aus den Studienergebnissen forschungsbasierte Instruktionen zum Betrachten, Zeichnen und Anwenden von FD im Rahmen eines Onlinekurses zur Teilchenphysik zu entwerfen.

1. Motivation

Die Teilchenphysik ist eines der Forschungsfelder, welches sich in der Öffentlichkeit seit vielen Jahren und zunehmend auch im Schulunterricht großer Beliebtheit erfreut. Dies erfordert, dass angemessene Lehr- und Lernmaterialien (weiter)entwickelt werden, mit denen das Thema Teilchenphysik Schüler:innen nahe gebracht werden kann.

Eine Darstellung, die im Zusammenhang mit didaktischen und populärwissenschaftlichen Beiträgen immer wieder gezeigt wird, sind die Feynman-Diagramme (FD; Kaiser, 2005). Nicht zuletzt sorgte auch der Erfinder Richard Feynman (1918-1989) selbst für die Popularisierung „seiner“ Diagramme (vgl. Feynman, 2014).

Jedoch werden die Diagramme in der theoretischen Physik auf eine andere Weise verwendet als es eine eher „buchstäbliche Lesart“ nahelegen würde. Dies ist ein Hinweis darauf, dass es eine Diskrepanz zwischen der *disziplinspezifischen* und *pädagogischen Affordanz* gibt. Das heißt, die Bedeutung, die der Repräsentationsform innerhalb der Disziplin zugemessen wird, ist nicht ohne weiteres auf seinen Nutzen zum Lehren von physikalischen Inhalten übertragbar (vgl. Airey & Eriksson, 2019; Airey & Linder, 2017).

In der physikdidaktischen Forschung gibt es bisher keine empirischen Untersuchungen dazu, wie mit Feynman-Diagrammen gelernt wird.

Aus diesem Grund untersuchen wir eben diese Wahrnehmung von Feynman-Diagrammen bei Personen unterschiedlicher Expertise. Als Methode zur Untersuchung von Lernprozessen bei visuellen Repräsentationen hat sich Eye Tracking als eine vielversprechende Methode etabliert, mit der z.B. Informationsverarbeitungsprozesse ebenso wie die Effektivität von Instruktionsdesigns erforscht werden können (z.B. Lai et al., 2013). In diesem Beitrag werden die Möglichkeiten von Eye Tracking für die Untersuchung des Themas Feynman-Diagramme diskutiert.

2. Hintergrund

2.1. Lernen mit multiplen Repräsentationen

In der Physik ist das Lernen mit multiplen Repräsentationen (also z.B. einer Text-Bild-Kombination) allgegenwärtig. Dabei haben multiple Repräsentationen beim Lernen drei Schlüsselfunktionen: Sie können sich ergänzen, indem sie komplementär zueinander sind, sie können sich ergänzen, indem sie sich jeweils einschränken, oder sie können ein tieferes Verständnis

konstruieren (Ainsworth, 1999, 2006; Opfermann et al., 2017).

Im Falle von Feynman-Diagrammen kann beispielsweise ihre Interpretation anhand von bekannteren Repräsentationen wie Stromkreisen oder des Doppelspaltversuchs eingeschränkt werden (Passon et al., 2020). Ebenso können Feynman-Diagramme zu einem tieferen Verständnis von Teilchenphysik beitragen, indem sie schon vorhandenes Wissen (etwa über die Existenz von Elementarteilchen) erweitern (z.B. indem anhand der Feynman-Diagramme die Idee von virtuellen Teilchen erläutert wird (Jones, 2002)).

Mit dem Lernen sind jedoch verschiedene kognitive Aufgaben verbunden. Zum einen müssen die Lernenden verstehen, wie Informationen in die Repräsentationsform kodiert sind. Außerdem müssen sie verstehen, wie die Repräsentation mit der jeweiligen Domäne in Beziehung steht; sie müssen wissen, wie die richtige Repräsentation ausgewählt und wie sie konstruiert wird (Ainsworth, 2006).

Hier macht die Cognitive Theory of Multimedia Learning (CTML; Mayer, 2002), basierend auf Erkenntnissen zur Informationsverarbeitung im Arbeitsgedächtnis, Vorschläge, wie die Repräsentationen präsentiert werden können, um das Lernen zu unterstützen. So wird z.B. empfohlen, textuelle und bildliche Darstellungen gemeinsam und in räumlicher Nähe zueinander darzustellen (Kontiguitätsprinzip). Im Design der vorliegenden Studie wurde versucht, die Empfehlungen bestmöglich zu berücksichtigen.

2.2. Feynman-Diagramme im Physikunterricht

Feynman-Diagramme wurden das erste Mal im Frühjahr 1948 durch Richard Feynman im Rahmen einer Konferenz öffentlich vorgestellt (Kaiser, 2005, S. 43). Seitdem haben sie sich zu einem weit verbreiteten graphischen Werkzeug in vielen Bereichen der theoretischen Physik, vor allem aber in der Quantenfeldtheorie und damit der Teilchenphysik entwickelt. Hauptsächlich werden sie als „Werkzeug zur Buchführung“ bei der störungstheoretischen Berechnung von Prozessen in der Teilchenphysik gebraucht (Kaiser, 2005). Innerhalb der theoretischen Physik (genauer gesagt der Quantenfeldtheorie) besitzen Feynman-Diagramme als semiotische Resource eine hohe disziplinspezifische Affordanz. Diese ist definiert als die vereinbarten bedeutungsstiftenden Funktionen, die eine semiotische Ressource für eine bestimmte Community (die in der Disziplin Tätigen) erfüllt (Airey, 2015; Airey & Eriksson, 2019). Die Diagramme sind dabei eine *disziplinspezifische Kurzschrift* (Airey & Linder, 2017, S. 101 f.) für einen komplizierten mathematischen Ausdruck.

Der disziplinspezifischen Affordanz steht die pädagogische Affordanz gegenüber, die definiert ist

als die Eignung, einer Resource, bestimmte Inhalte zu vermitteln (Airey, 2015).

Laut Airey ist jedoch eine hohe disziplinäre Affordanz, wie sie bei Feynman-Diagrammen vorliegt, in der Regel mit einer verminderten pädagogischen Affordanz verbunden. Dies ist insofern bedeutsam, da die Diagramme heute nicht nur in wissenschaftlichen, sondern auch in populärwissenschaftlichen Publikationen und zum Teil auch in Lehr-Lernmaterialien für den Schulunterricht zu finden sind (z.B. Kobel et al., 2018). Hier werden sie in der Regel als (vermeintlich) anschauliche Darstellung teilchenphysikalischer Prozesse verwendet. So zeigen etwa Passon et al., (2018, 2020) verschiedene mit Feynman-Diagrammen verbundene Vorstellungen auf, die so nicht haltbar sind. Etwa ist jede Lesart, in der den Teilchen eine Trajektorie in Zeit und Raum zugeordnet wird, physikalisch unsinnig. Es wurden von verschiedenen Physiker:innen und Physikdidaktiker:innen Versuche unternommen, didaktische Einführungen zu Feynman-Diagrammen zu geben. Pascolini & Pietroni (2002) führten die Diagramme als „akkurate Metaphern“ ein und versuchten, die den Feynman-Diagrammen zugrunde liegenden Regeln anhand eines mechanischen Modells den Lernenden nahe zu bringen. Dieser Ansatz wurde in einem reinen Post-Test-Design empirisch untersucht, wobei ein positiver Einfluss auf das Lernen festgestellt wurde.

Generell unterscheiden sich die Erklärungen dadurch, wie stark auf eine „wörtliche Lesart“ eingegangen wird. In einigen Texten werden die Feynman-Diagramme als Raum-Zeit-Diagramme eingeführt ((Jones, 2002), während in anderen die einzelnen fundamentalen Vertices erläutert und mit mathematischen Termen verknüpft werden (Woithe et al., 2017). Wieder andere Texte gehen explizit auf die Vorstellung einer zu wörtlichen Lesart ein und beschreiben Feynman-Diagramme als einen Beitrag zu einer Wahrscheinlichkeitsamplitude (Allday, 1997; Lambourne, 1992; Passon et al., 2020).

Einen anderen Ansatz wählen Hoekzema et al. (2005). Diese arbeiten in ihrem Text mit einer reduzierten Form der Feynman-Diagramme, welche sie „reaction diagrams“ nennen, um damit Erhaltungssätze und Symmetrien in der Teilchenphysik zu erklären. Der Text wurde an Schulen eingesetzt und erhielt positives Feedback von Lehrpersonen. Insbesondere wurde der Ansatz mit der reduzierten Form der Feynman-Diagramme als verständlicher als ein vorhergehender Text mit herkömmlichen Feynman-Diagrammen beurteilt.

2.3. Eye Tracking in der physikdidaktischen Forschung

Eye Tracking ist eine Technik, mit der die Augenbewegungen nachverfolgt werden können. Ihr Einsatz in der Bildungsforschung beruht auf der sog.

„Eye-Mind-Hypothese“ (Just & Carpenter, 1976), welche besagt, dass die gegenwärtige Blickposition Auskunft darüber gibt, wo jeweils die Aufmerksamkeit liegt.

In der Physikdidaktik wird Eye Tracking etwa seit zehn Jahren verwendet. Die Anwendungsfelder reichen hierbei von der Untersuchung von Lernprozessen beim Lernen mit Simulationen (Hoyer & Girwidz, 2020) über die Untersuchung von Assessment-Szenarien mit multiplen Repräsentationen (Rosengrant et al., 2009), den Einfluss aktiver Manipulationen oder instruktiver Hilfestellungen (Klein et al., 2019; Madsen et al., 2013) bis hin zur Nutzung von Eye Tracking-Metriken als Prädiktoren für die Antwortkorrektheit beim Lösen von Aufgaben (Küchemann et al., 2021). Mit Eye Tracking gelang es beispielsweise, postulierte Aufgabenanforderungen beim Arbeiten mit Kinematik-Diagrammen empirisch nachzuweisen (Klein et al., 2018). Auch wurden bekannte Lernschwierigkeiten beim Umgang mit Kinematik-Diagrammen, wie die Punkt-Intervall-Konfusion, durch die Analyse von Blickdaten bestätigt.

Neben diesem konfirmatorischen Charakter zeigt sich das Potential von Eye Tracking auch darin, den visuellen Umgang mit Repräsentationen erstmalig zu erforschen. Im Kontext von Vektorfeldern wurden beispielsweise visuelle Strategien identifiziert, die Expert:innen zur Beurteilung der Divergenz anwenden; sie betrachten die Diagramme überwiegend systematisch mit vertikalen und horizontalen Sakkaden (Klein et al., 2021). Insbesondere im letzteren Fall ist es wichtig, die Methode des Eye Tracking mit anderen Indikatoren für das Verständnis der vorliegenden Repräsentationen zu kombinieren, etwa mit Verbaldaten (van Gog et al., 2005).

Darüber hinaus wird Eye Tracking im Design von Lernmaterialien verwendet, um bestehende Theorien, wie etwa die CTML zu testen und zu erweitern (Alemdag & Cagiltay, 2018; Jarodzka et al., 2017; Mayer, 2010).

Im vorliegenden Fall soll Eye Tracking verwendet werden, um einerseits Hypothesen über Lernschwierigkeiten bei Feynman-Diagrammen zu überprüfen und andererseits Strategien zu identifizieren, die Expert:innen beim Betrachten von Feynman-Diagrammen verwenden.

3. Forschungsziele

Das kurzfristige Ziel der Arbeit ist es, herauszufinden, ob es beim Lernen mit Feynman-Diagrammen spezifische Elemente innerhalb von schriftlichen und graphischen Instruktionen gibt, die lernförderlich oder -hinderlich sind und welche Informationen Eye Tracking hierüber liefern kann.

Außerdem soll herausgefunden werden, wie sich die visuellen Strategien beim Betrachten von Feynman-

Diagrammen zwischen Personen mit und Personen ohne Vorwissen und Expertise in der Anwendung von Feynman-Diagrammen unterscheidet.

Mittelfristig soll im Sinne der fachdidaktischen Entwicklungsforschung (*Design-based research*; The Design-Based Research Collective, 2003) mit Hilfe der Erkenntnisse der vorliegenden Studie eine Lerneinheit zum Thema Feynman-Diagramme im Rahmen eines Online-Kurses zu Teilchenphysik für Oberstufenschüler:innen am CERN entwickelt werden.

4. Pilot-Studie

Es wurde eine explorative Studie durchgeführt, anhand derer untersucht werden soll, welche Erkenntnisse bei der Anwendung von Eye Tracking auf Aufgaben mit Feynman-Diagrammen zu erwarten sind.

4.1. Methoden

Zunächst wurden einführende Erklärtexte (Instruktionen) und Aufgaben in englischer und deutscher Sprache zum Thema entworfen. Die Instruktionen umfassten 7 Seiten und waren text- und bildbasiert. Ein Beispiel für eine solche Instruktion ist in Abb. 1 gezeigt.

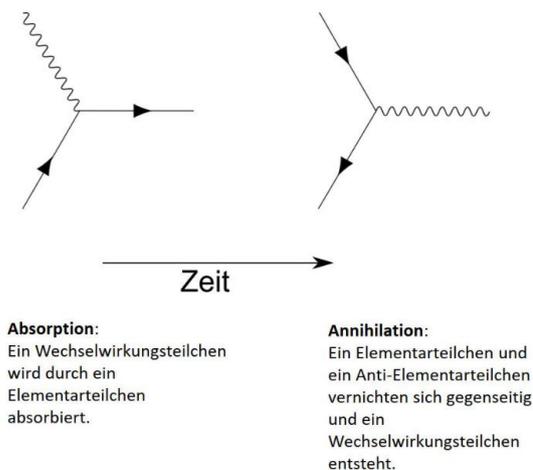


Abb. 1: Ausschnitt aus einer der sieben Instruktionsfolien. Gezeigt sind zwei der vier fundamentalen Vertices. Im Text darunter ist die jeweilige physikalische Interpretation beschrieben (*Absorption*, *Anihilation*). Neben den Vertices und dem Erklärtext ist als zusätzlicher Hinweis der Zeitpfeil als „Leserichtung“ für die Diagramme abgebildet.

Als Basis für die Erstellung der Instruktionen und Aufgaben dienten gängige Textbücher der Elementarteilchenphysik sowie Vorüberlegungen zu potentiellen Lernschwierigkeiten auf Basis von publizierten Lernressourcen (s.o.; z.B. Kobel et al., 2018; Woithe et al., 2017). Besonderer Wert wurde

in den Instruktionen auf die Einführung der fundamentalen Vertices sowie die inhärente Beinhaltung der Erhaltungssätze in den Feynman-Diagrammen gelegt.

Die insgesamt neun zu lösenden Aufgaben wurden in vier Aufgabentypen unterteilt: Im ersten Aufgabentyp sollten die Teilnehmenden beurteilen, ob ein gegebenes Diagramm gemäß der zuvor in den Instruktionen beschriebenen Regeln einen gültigen Prozess darstellt, im zweiten Typ sollte die Anzahl der Vertices angegeben werden, aus denen ein dargestelltes Feynman-Diagramm besteht, und im dritten und vierten Typ sollte ein gegebenes Diagramm mit anderen Diagrammen verglichen werden.

An der Studie nahmen insgesamt 16 Mitglieder der Didaktik-Forschungsgruppen am CERN sowie der Universität Göttingen teil. Der Grad an Expertise reichte von Schulwissen in Physik bis zur Promotion in Teilchenphysik. Während die Teilnehmenden die Instruktionen lasen und die Aufgaben lösten, wurden ihre Blickbewegungen aufgenommen. Die Aufnahme der Blickbewegungen erfolgte mit einem Remote Eye Tracker der Firma Tobii Pro (Fusion, Version 120 Hz). Die Teilnehmenden saßen etwa 80 – 100 cm vom Bildschirm entfernt und konnten sich frei bewegen.

Die 9-Punkt-Kalibration ergab eine Genauigkeit der Blickdaten zwischen $0,31^\circ$ und $1,33^\circ$ bei einer Präzision zwischen $0,17^\circ$ und $0,7^\circ$ auf einem 24“-Bildschirm mit einer Auflösung von 2560 x 1440 Px. Im besten Fall konnten die Blickbewegungen also auf etwa 5 mm oder 20 Pixel genau aufgelöst werden, im schlechtesten Fall auf 14 mm oder 70 Pixel. Dies korrespondiert in etwa mit den o.g. Materialien, bei denen die kleinsten Einzelstrukturen etwa 5 mm groß waren. Innerhalb der Instruktionen und Aufgaben konnte nicht gesprungen werden und nicht die Richtung gewechselt werden. Die Teilnehmenden hatten jedoch für jede einzelne Seite so viel Zeit wie sie brauchten.

Um zusätzliche Informationen über die Überlegungen der Teilnehmenden zu erhalten, wurden im Anschluss an die Lösung der Aufgaben den Teilnehmenden die Instruktionen und Aufgaben zusammen mit einem Video ihrer Augenbewegungen gezeigt und sie wurden befragt, wie sie mental beim Lösen der Aufgaben vorgegangen sind. Im folgenden wird dieser Teil als Retrospective Think Aloud (RTA) bezeichnet.

4.2. Erste Ergebnisse

Anhand der Erklärmuster im RTA wurden die Teilnehmenden in drei Gruppen eingeteilt: „Expert:innen“, „Noviz:innen“ und „Intermediates“. Die Expert:innen zeichneten sich dadurch aus, dass sie beim Erklären auf die physikalischen Begriffe (z.B. *Teilchen*, *Anti-Teilchen*, *Emission*, *Absorption*)

referierten, während die Noviz:innen diese Begriffe nicht verwendeten. Bei den Intermediates waren Ansätze von Expertendenken, aber kein kohärentes Muster erkennbar.

Die Eye Tracking-Daten wurden anschließend anhand dieser Einteilung in die verschiedenen Expertise-Gruppen aufgeteilt. Die kumulierten Blickdaten wurden anschließend pro Gruppe gegenüber gestellt und auf qualitative Unterschiede hin miteinander verglichen.

Von den vier Aufgabentypen eigneten sich drei für eine Analyse der Eye Tracking-Daten. Der erste Aufgabentyp, in dem beurteilt werden sollte, ob ein gegebener fundamentaler Vertex (also ein fundamentaler Baustein eines Feynman-Diagramms) den vorher gezeigten Regeln entspricht, war hingegen ein guter Indikator für die oben beschriebene Einteilung.

Im zweiten Aufgabentyp wurde nach der Anzahl der Vertices gefragt, aus denen das gezeigte Diagramm besteht. Für diese Aufgabe waren dementsprechend lediglich die Vertices relevant, also die Bereiche im Diagramm, an dem sich drei Linien treffen. In Abb. 2 sind die kumulierten Blickdaten für die drei Gruppen aufgetragen. Es zeigt sich hier, dass nur die Expert:innen den Großteil ihrer Aufmerksamkeit auf den relevanten Teil der Abbildung verwenden. Zwischen Intermediates und Noviz:innen gibt es in dieser Hinsicht keinen qualitativen Unterschied.

Im dritten Aufgabentyp sollte beurteilt werden, aus welchen der vier auf der linken Seite gezeigten Vertices das auf der rechten Seite gezeigte Diagramm zusammengesetzt ist. Die Blickmuster bei einer Aufgabe dieses Typs ist in Abb. 3 gezeigt. Hier fällt auf, dass die Expert:innen im Vergleich zu den Intermediates und Noviz:innen relativ viel Aufmerksamkeit auf dem im Sinne der Aufgabe „falschen“ Vertex B verwenden. Rein qualitativ sind auch hier die Unterschiede zwischen Intermediates und Noviz:innen kleiner als die zwischen den Expert:innen und den anderen Gruppen.

Im vierten Aufgabentyp sollte beurteilt werden, ob ein gegebenes Feynman-Diagramm aus den beiden zusätzlich gegebenen Vertices zusammengesetzt sein kann. Die kumulierten Blickdaten für eine Aufgabe dieses Typs sind in Abb. 4 gezeigt. Hier ist auffällig, dass sich die Blickdaten zwischen den einzelnen Gruppen im Gegensatz zu den anderen gezeigten Beispielen qualitativ kaum unterscheiden.

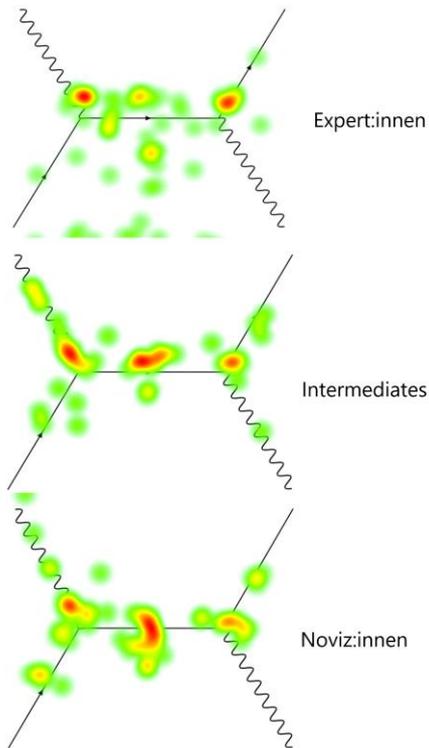


Abb. 2: Kumulierte Blickdaten für Expert:innen (oben), Intermediates (Mitte) und Noviz:innen (unten) bei einer Aufgabe des Typs 2 („Aus wie vielen Vertices besteht das Diagramm?“)

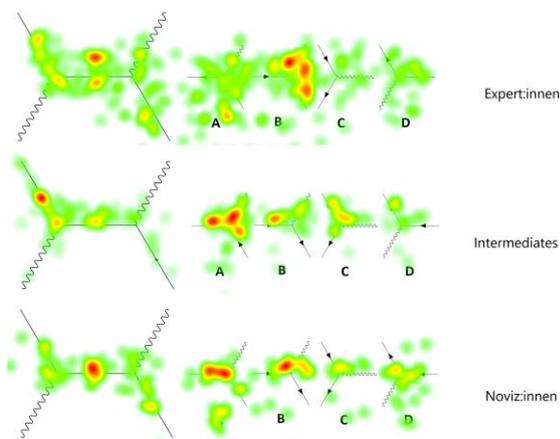


Abb. 3: Kumulierte Blickdaten für Expert:innen (oben), Intermediates (Mitte) und Noviz:innen (unten) bei einer Aufgabe des Typs 3 („Aus welchen Vertices setzt sich das Diagramm auf der linken Seite zusammen?“). Die richtige Antwort ist in diesem Fall D + A.

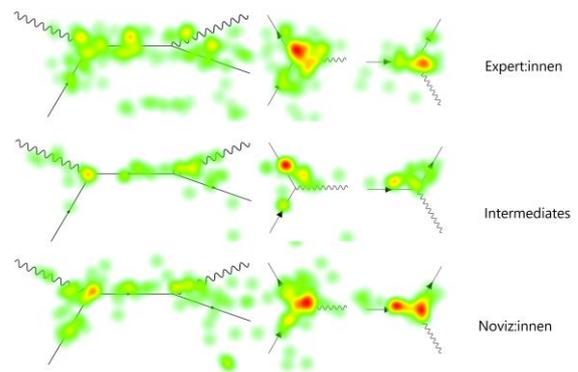


Abb. 4: Kumulierte Blickdaten für Expert:innen (oben), Intermediates (Mitte) und Noviz:innen (unten) bei einer Aufgabe des Typs 4 („Setzt sich das Diagramm auf der linken Seite aus den beiden Vertices auf der rechten Seite zusammen?“). Die Antwort ist in diesem Fall „Nein“.

5. Diskussion

In der vorliegenden Pilotstudie wurde erstmals die Wahrnehmung von Lernmaterialien zum Thema Feynman-Diagramme empirisch mit Hilfe von Eye Tracking untersucht. Die Blickmuster in Abb. 2 lassen darauf schließen, dass bei Nennung bestimmter Begriffe in einer Aufgabe bei Personen mit Vorwissen der Blick auf bestimmte Stellen in der Repräsentation gelenkt wird. Dies ist im Einklang mit bisherigen Eye Tracking-Studien, in denen ebenfalls gezeigt werden konnte, dass Expert:innen relativ viel visuelle Aufmerksamkeit auf relevante als auf irrelevante Bereiche der Aufgabe verwenden und insgesamt weniger Zeit zum Lösen der Aufgaben brauchen als Noviz:innen (vgl. Klein, et al., 2019; A. M. Madsen et al., 2012).

Wie die Abbildungen 3 und 4 zeigen, ist dieses Ergebnis in unserer Studie jedoch nicht persistent über alle Aufgabentypen. So kam es auch vor, dass Expert:innen relativ gesehen mehr Zeit auf einer falschen Antwortoption verbrachten als Intermediates und Noviz:innen, oder es konnten keine Unterschiede zwischen den Gruppen beobachtet werden. Dies kann unterschiedliche Gründe haben. So erwähnten mehrere Expert:innen in den RTA-Daten, dass sie versucht hatten, die einzelnen Vertices mental zu rotieren, um sicher zu gehen, dass der Vertex nicht doch eine Option sein könnte. Noviz:innen erwähnten dies nicht.

Eine Einschränkung dieser Pilotstudie ist ihre kleine Stichprobe sowie die fehlende Repräsentativität in Bezug auf die Zielgruppe der Materialien (Oberstufenschüler:innen). Aus diesem Grund haben wir uns für eine qualitative und heuristische Form der Auswertung entschieden. Die vorliegenden Ergebnisse können lediglich ein Hinweis auf weitere Forschung sein.

6. Ausblick

Im Anschluss an die vorgestellte Pilotstudie soll eine Hauptstudie durchgeführt werden, in der eine größere Stichprobe von Schüler:innen, Studienanfänger:innen sowie Physiker:innen untersucht wird. Die Instruktionen und Aufgaben dieser Studie werden dabei im Sinne einer didaktischen Rekonstruktion auf Basis von Literatur, den Erkenntnissen aus der Pilotstudie sowie Interviews mit Expert:innen erstellt. Die Erkenntnisse aus dieser Studie sollen anschließend genutzt werden, um Lehr-Lernmaterialien zu erstellen. Hier könnten auch interaktive Aufgaben, wie etwa das Zeichnen von Diagrammen (vgl. Ainsworth et al., 2011) oder sog. *Eye-Movement-Modeling-Examples* (vgl. van Gog et al., 2009) zum Einsatz kommen.

7. Literatur

- Ainsworth, S. (1999). The functions of multiple representations. *Computers & Education*, 33(2), 131–152.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360131599000299>
- 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>
- Ainsworth, S., Prain, V., & Tytler, R. (2011). Drawing to Learn in Science. *Science*, 333(6046), 1096–1097.
<https://doi.org/10.1126/science.1204153>
- Airey, J. (2015). *Social Semiotics in Higher Education: Examples from teaching and learning in undergraduate physics*. 103.
<http://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:uu:diva-266049>
- Airey, J., & Eriksson, U. (2019). Unpacking the Hertzprung-Russell Diagram: A Social Semiotic Analysis of the Disciplinary and Pedagogical Affordances of a Central Resource in Astronomy. *Designs for Learning*, 11(1), 99–107.
- Airey, J., & Linder, C. (2017). Social Semiotics in University Physics Education. In D. F. Treagust, R. Duit, & H. E. Fischer (Hrsg.), *Multiple Representations in Physics Education* (S. 95–122). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-58914-5_5
- Alemdag, E., & Cagiltay, K. (2018). A systematic review of eye tracking research on multimedia learning. *Computers & Education*, 125, 413–428.
<https://doi.org/10.1016/j.compedu.2018.06.023>
- Allday, J. (1997). The nature of force in particle physics. *Physics Education*, 32(5), 327.
<https://doi.org/10.1088/0031-9120/32/5/016>
- Feynman, R. P. (2014). *QED*. In *QED*. Princeton University Press.
<https://www.degruyter.com/document/doi/10.1515/9781400847464/html>
- Hoekzema, D., Schooten, G., van den Berg, E., & Lijnse, P. (2005). Conservation Laws, Symmetries, and Elementary Particles. *The Physics Teacher*, 43(5), 266–271.
<https://doi.org/10.1119/1.1903808>
- Hoyer, C., & Girwidz, R. (2020). Animation and interactivity in computer-based physics experiments to support the documentation of measured vector quantities in diagrams: An eye tracking study. *Physical Review Physics Education Research*, 16(2), 020124.
<https://doi.org/10.1103/PhysRevPhysEducRes.16.020124>
- Jarodzka, H., Gruber, H., & Holmqvist, K. (2017). *Eye tracking in Educational Science: Theoretical frameworks and research agendas*.
<https://doi.org/10.16910/jemr.10.1.3>
- Jones, G. T. (2002). The uncertainty principle, virtual particles and real forces. *Physics Education*, 37(3), 223–233.
<https://doi.org/10.1088/0031-9120/37/3/306>
- Just, M. A., & Carpenter, P. A. (1976). Eye fixations and cognitive processes. *Cognitive Psychology*, 8(4), 441–480.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/0010028576900153>
- Kaiser, D. (2005). *Drawing Theories Apart: The Dispersion of Feynman Diagrams in Post-war Physics*. University of Chicago Press.
- Klein, P., Becker, S., Küchemann, S., & Kuhn, J. (2021). Test of understanding graphs in kinematics: Item objectives confirmed by clustering eye movement transitions. *Physical Review Physics Education Research*, 17(1), 013102.
<https://doi.org/10.1103/PhysRevPhysEducRes.17.013102>
- Klein, P., Küchemann, S., Brückner, S., Zlatkin-Troitschanskaia, O., & Kuhn, J. (2019). Student understanding of graph slope and area under a curve: A replication study comparing first-year physics and economics students. *Physical Review Physics Education Research*, 15(2), 020116.
<https://doi.org/10.1103/PhysRevPhysEducRes.15.020116>
- Klein, P., Viiri, J., & Kuhn, J. (2019). Visual cues improve students' understanding of divergence and curl: Evidence from eye movements during reading and problem solving. *Physical Review Physics Education Research*, 15(1), 010126.
<https://doi.org/10.1103/PhysRevPhysEducRes.15.010126>
- Klein, P., Viiri, J., Mozaffari, S., Dengel, A., & Kuhn, J. (2018). Instruction-based clinical

- eye-tracking study on the visual interpretation of divergence: How do students look at vector field plots? *Physical Review Physics Education Research*, 14(1), 010116. <https://doi.org/10.1103/PhysRevPhysEducRes.14.010116>
- Kobel, M., Bilow, U., Lindenau, P., & Schorn, B. (2018). *Teilchenphysik: Ladungen, Wechselwirkungen und Teilchen—Unterrichtsmaterial ab Klasse 10*. Joachim Herz Stiftung. https://www.teilchenwelt.de/fileadmin/user_upload/Redaktion/Netzwerk_Teilchenwelt/material/Band1_UnterrichtsmaterialTP_2018.pdf
- Küchemann, S., Klein, P., Becker, S., Kumari, N., & Kuhn, J. (2021). *Classification of Students' Conceptual Understanding in STEM Education using Their Visual Attention Distributions: A Comparison of Three Machine-Learning Approaches*. 36–46. <https://www.scitepress.org/PublicationsDetail.aspx?ID=RR+w7e5T9Tc=&t=1>
- 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, 90–115. <https://doi.org/10.1016/j.edurev.2013.10.001>
- Lambourne, R. (1992). Predicting the physics of particles. *Physics Education*, 27(2), 71. <https://doi.org/10.1088/0031-9120/27/2/003>
- Madsen, A. M., Larson, A. M., Loschky, L. C., & Rebello, N. S. (2012). Differences in visual attention between those who correctly and incorrectly answer physics problems. *Physical Review Special Topics - Physics Education Research*, 8(1), 010122. <https://doi.org/10.1103/PhysRevSTPER.8.010122>
- Madsen, A., Rouinfar, A., Larson, A. M., Loschky, L. C., & Rebello, N. S. (2013). Can short duration visual cues influence students' reasoning and eye movements in physics problems? *Physical Review Special Topics - Physics Education Research*, 9(2), 020104. <https://doi.org/10.1103/PhysRevSTPER.9.020104>
- Mayer, R. E. (2002). Multimedia learning. In *Psychology of Learning and Motivation* (Bd. 41, S. 85–139). Academic Press. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0079742102800056>
- Mayer, R. E. (2010). Unique contributions of eye-tracking research to the study of learning with graphics. *Learning and Instruction*, 20(2), 167–171. <https://doi.org/10.1016/j.learninstruc.2009.02.012>
- Opfermann, M., Schmeck, A., & Fischer, H. E. (2017). Multiple Representations in Physics and Science Education – Why Should We Use Them? In D. F. Treagust, R. Duit, & H. E. Fischer (Hrsg.), *Multiple Representations in Physics Education* (S. 1–22). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-58914-5_1
- Pascolini, A., & Pietroni, M. (2002). Feynman diagrams as metaphors: Borrowing the particle physicist's imagery for science communication purposes. *Physics Education*, 37(4), 324. <https://doi.org/10.1088/0031-9120/37/4/306>
- Passon, O., Lindenau, P., & Kobel, M. (2020). Von Feynman-Diagrammen und Stromkreisen. *Unterricht Physik*, 180. <https://www.friedrich-verlag.de/physik/quantenphysik/von-feynman-diagrammen-und-stromkreisen-7480>
- Passon, O., Zügge, T., & Grebe-Ellis, J. (2018). Pitfalls in the teaching of elementary particle physics. *Physics Education*, 54(1), 015014. <https://doi.org/10.1088/1361-6552/aadbc7>
- Rosengrant, D., Thomson, C., & Mzoughi, T. (2009). Comparing Experts and Novices in Solving Electrical Circuit Problems with the Help of Eye-Tracking. *AIP Conference Proceedings*, 1179(1), 249–252. <https://doi.org/10.1063/1.3266728>
- The Design-Based Research Collective. (2003). Design-Based Research: An Emerging Paradigm for Educational Inquiry. *Educational Researcher*, 32(1), 5–8. <https://doi.org/10.3102/0013189X03200105>
- van Gog, T., Jarodzka, H., Scheiter, K., Gerjets, P., & Paas, F. (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 Gog, T., Paas, F., van Merriënboer, J. J. G., & Witte, P. (2005). Uncovering the Problem-Solving Process: Cued Retrospective Reporting Versus Concurrent and Retrospective Reporting. *Journal of Experimental Psychology: Applied*, 11(4), 237–244. <https://doi.org/10.1037/1076-898X.11.4.237>
- Woithe, J., Wiener, G. J., & Veken, F. F. V. der. (2017). Let's have a coffee with the Standard Model of particle physics! *Physics Education*, 52(3), 034001. <https://doi.org/10.1088/1361-6552/aa5b25>

Danksagung

Wir danken Julia Woithe für hilfreiche Hinweise zum Materialdesign sowie Stefanie Peter für ihre Hilfe bei der Durchführung der Studie. Diese Arbeit wurde gefördert durch das Wolfgang-Gentner-Programm des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF-Forschungsvorhaben 05E18CHA).