

Merten Dahlkemper<sup>1,2</sup>  
Pascal Klein<sup>2</sup>  
Andreas Müller<sup>3</sup>  
Sascha Schmeling<sup>1</sup>  
Jeff Wiener<sup>1</sup>

<sup>1</sup>CERN, Genf  
<sup>2</sup>Universität Göttingen  
<sup>3</sup>Universität Genf

## Feynman-Diagramme als multiple Repräsentationen

In Kooperation zwischen dem CERN, der Universität Göttingen und der Universität Genf werden forschungsbasierte Lehr-Lernmaterialien zur Teilchenphysik entwickelt. Der Fokus liegt hierbei darauf herauszufinden, ob und wenn ja, unter welchen Umständen Feynman-Diagramme ein Werkzeug sein können, Inhalte der Teilchenphysik an Oberstufenschüler:innen zu vermitteln.

### Kontext

Nicht zuletzt seit der Entdeckung des Higgs-Teilchens im Jahr 2012 ist die Elementarteilchenphysik ein in der Öffentlichkeit häufig nachgefragtes Thema. In den letzten Jahren wurde es außerdem in zahlreichen deutschen Bundesländern in den Lehrplan der Physik aufgenommen. Gleichzeitig gibt es innerhalb der teilchenphysikdidaktischen Gemeinde Debatten darüber, welche Inhalte wie unterrichtet werden sollten (vgl. Passon & Zügge, 2020).

Insbesondere zur Behandlung der Feynman-Diagramme (FD) gibt es kontroverse Meinungen. Seitdem diese Ende der 1940er-Jahre eingeführt wurden, haben sie sich zu einem beinahe unverzichtbaren Werkzeug in der Teilchenphysik und später auch anderen Gebieten entwickelt (Kaiser, 2005). Diese Diagramme sind eine Form der Notation um die Entwicklungsterme in der perturbativen Behandlung der Quantenfeldtheorie intuitiv verständlich aufzuschreiben. Sie stellen also Beiträge zur Wahrscheinlichkeitsamplitude quantenfeldtheoretischer Prozesse dar. Innerhalb der Didaktik herrscht insbesondere Uneinigkeit darüber, wie stark auf die ursprüngliche Bedeutung der FD eingegangen werden sollte. Das Spektrum der Positionen reicht dabei von einer Einführung der FDs als Raum-Zeit-Diagramm (Jones, 2002) über eine mathematische Motivation (Woithe et al., 2017) bis hin zur oben erwähnten Beschreibung als Beitrag zur Wahrscheinlichkeitsamplitude (Allday, 1997; Passon et al., 2020). Einen anderen Ansatz wählen Hoekzema et al. (2005) mit einer reduzierten Form der Feynman-Diagramme, die sie „reaction diagrams“ nennen, um damit Erhaltungssätze und Symmetrien in der Teilchenphysik zu erklären. Die von den Forscher:innen entwickelten Lehr-Lernmaterialien wurden an Schulen eingesetzt und erhielten 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. Im vorliegenden Projekt verfolgen wir diesen Ansatz weiter, indem wir Bereiche der Teilchenphysik identifizieren, in denen eine didaktische Rekonstruktion von Feynman-Diagrammen zum Verständnis beiträgt.

### Forschungshintergrund

Der theoretische Rahmen dieses Projekts lässt sich folgendermaßen beschreiben. Zum einen wird basierend auf dem Modell der didaktischen Rekonstruktion (Duit et al., 2012) eine Synthese der fachlichen Klärung sowie der Lernendenperspektiven durchgeführt. Der

Designprozess von Lehr-Lernmaterialien bedient sich anschließend der Forschung zu multiplen Repräsentationen. Maßgeblich ist dabei das DeFT-Framework („*Design, Functions, Tasks*“, (Ainsworth, 2006; Opfermann et al., 2017) und die „Cognitive Theory of Multimedia Learning“ (CTML, Mayer, 2005). Zusätzlich kommt das Framework der „Sozialen Semiotischen Ressourcen“ (SSR, Airey & Linder, 2017) zum Tragen.

Während die CTML basierend auf Annahmen zu kognitiven Prozessen beim Lernen Hinweise zur effektiven Organisation von Bild und Text gibt, geht das DeFT-Framework darauf ein, wie multiple Repräsentationen verwendet werden sollten um bestimmte Funktionen zu erfüllen. Das Framework der SSR wiederum unterscheidet bei multiplen Repräsentationen generell zwischen disziplinärem Gebrauchswert und didaktischem Nutzwert und gibt Hinweise, wie der disziplinäre Gebrauchswert für Lernende zugunsten des didaktischen Nutzwertes reduziert werden kann. Basierend auf diesem Hintergrund stellen wir uns die folgenden Leitfragen:

- Welcher didaktische Nutzwert kann Feynman-Diagrammen zugeschrieben werden?
- Wie können Feynman-Diagramme für Jugendliche sinnvoll zugänglich gemacht werden?

### **Fachliche Klärung durch Expert:inneninterviews**

Um einen Überblick zu bekommen, in welchen Gebieten sich ein didaktischer Nutzwert für die Feynman-Diagramme ergibt, wurden Interviews mit drei Expert:innen auf dem Gebiet der Teilchenphysikdidaktik aus dem deutschsprachigen Raum geführt. Leitfragen bei diesen Interviews waren die folgenden:

- In welchen teilchenphysikalischen Kontexten kann die Verwendung für Jugendlichen einen didaktischen Nutzen erbringen?
- Welche Herausforderungen stellen sich bei der Thematisierung von Feynman-Diagrammen mit Jugendlichen?

Diese Interviews wurden mit Hilfe einer qualitativen Inhaltsanalyse (Kuckartz, 2016) ausgewertet.

Als Nutzen konnten die folgenden Hauptaspekte identifiziert werden:

- Es kann die Idee von Wechselwirkungsteilchen als zentrales Element der Teilchenphysik anschlussfähig motiviert werden.
- Es können Erhaltungssätze (insbesondere die Ladungserhaltung) motiviert werden.
- Es können quantenmechanische Konzepte wie die Superposition verschiedener Zustände motiviert werden und damit die Teilchenphysik anschlussfähig an die Quantenmechanik gemacht werden.
- Es kann ein erster Einblick gegeben werden, welche „Rechentools“ in der Teilchenphysik verwendet werden.

Dem gegenüber wurden die folgenden Herausforderungen identifiziert.

- Die Diagramme legen die wörtliche Lesart eines physischen Teilchenaustauschs nahe, wohingegen sie lediglich einen Beitrag zu einer Wahrscheinlichkeitsamplitude beschreiben.
- Die Diagramme suggerieren eine raumzeitliche Einbettung eines Prozesses, wobei jedoch diese physikalisch nicht haltbar ist.
- Die Diagramme verleiten zu einer oberflächlichen Betrachtung von Teilchenphysik, indem sie lediglich einen Jargon transportieren, nicht jedoch die Physik selbst.

### **Eye Tracking als Methode zum Einholen der Lernendenperspektiven**

Als Methode zum Auffinden von möglichen Lernschwierigkeiten sowie von Hinweisen auf mögliche Designelemente wird Eye Tracking verwendet.

In der Physikdidaktik wird Eye Tracking etwa seit zehn Jahren angewendet. Dabei liegt der Fokus bislang auf der Anwendung während der Bearbeitung von Aufgaben mit multiplen Repräsentationen (Klein et al., 2019; Madsen et al., 2013; Rosengrant et al., 2009). Das Potential von Eye Tracking zeigt sich auch darin, den visuellen Umgang mit Repräsentationen zu erforschen. Im Kontext von Vektorfeldern wurden beispielsweise visuelle Strategien identifiziert, die Expert:innen zur Beurteilung der Divergenz anwenden (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 Projekt verwenden wir Eye Tracking, um aus den Blickmustern von Noviz:innen auf dem Gebiet der FD abzuleiten, welche visuellen Hilfestellungen beim Lernen mit dieser Repräsentationsform nützlich sind und welche ablenken. Außerdem soll aus den Blickmustern von Expert:innen abgeleitet werden, in welchen visuellen Sinneinheiten („Chunks“) sie visuell verarbeitet werden. Es wurde bereits eine Pilotstudie mit Eye Tracking auf FD durchgeführt, bei der erste Unterschiede zwischen Blickmustern von Expert:innen und Noviz:innen erkannt wurden. Insbesondere wurde hier das Zusammenspiel zwischen Eye Tracking und Retrospective Think Aloud (van Gog et al., 2005) untersucht. Aus den Interview-Daten konnte eine Klassifizierung der Studienteilnehmenden in „Noviz:innen“, „Intermediates“ und „Expert:innen“ vorgenommen werden (Dahlkemper et al., 2021). Als nächste Schritte sind Eye Tracking-Studien mit Schüler:innen zwischen 16 und 20 Jahren aus verschiedenen Ländern sowie Expert:innen in Form von Teilchenphysiker:innen am CERN geplant.

### **Danksagung**

Diese Arbeit wird gefördert durch das Wolfgang-Gentner-Programm des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF-Forschungsvorhaben 05E18CHA)

## 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>
- 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](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>
- Dahlkemper, M., Wiener, J., Müller, A., Schmeling, S., & Klein, P. (2021). Untersuchung der Wahrnehmung von Feynman-Diagrammen mittels Eye Tracking. *PhyDid B - Didaktik der Physik - Beiträge zur DPG-Frühjahrstagung*, 1(0), Article 0. <http://www.phydid.de/index.php/phydid-b/article/view/1153>
- Duit, R., Gropengießer, H., Kattmann, U., Komorek, M., & Parchmann, I. (2012). The Model of Educational Reconstruction – A Framework for Improving Teaching and Learning Science. In *Science Education Research and Practice in Europe* (S. 13–37). Brill Sense. <https://brill.com/view/book/edcoll/9789460919008/BP000003.xml>
- 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>
- 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>
- Kaiser, D. (2005). *Drawing Theories Apart: The Dispersion of Feynman Diagrams in Postwar 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., 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>
- Kuckartz, U. (2016). *Qualitative Inhaltsanalyse. Methoden, Praxis, Computerunterstützung (Grundlagentexte Methoden, 3., überarbeitete Auflage)*. Weinheim: Beltz Juventa. Zugriff am, 9, 2017.
- 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. (2005). Cognitive theory of multimedia learning. *The Cambridge handbook of multimedia learning*, 41, 31–48.
- 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](https://doi.org/10.1007/978-3-319-58914-5_1)
- 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. (2020). Diskussion der didaktischen Impulse und Abschlussdiskussion. In O. Passon, T. Zügge, & J. Grebe-Ellis (Hrsg.), *Kohärenz im Unterricht der Elementarteilchenphysik: Tagungsband des Symposiums zur Didaktik der Teilchenphysik, Wuppertal 2018* (S. 143–150). Springer. [https://doi.org/10.1007/978-3-662-61607-9\\_9](https://doi.org/10.1007/978-3-662-61607-9_9)
- 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>
- 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>