

Merten Dahlkemper^{1,2}
 Pascal Klein²
 Andreas Müller³
 Sascha Schmeling¹
 Jeff Wiener¹

¹CERN, Genf
²Universität Göttingen
³Universität Genf

Forschungsbasierte Entwicklung von Lernmaterialien zu Feynman-Diagrammen

Teilchenphysik im Physikunterricht. Seit über 30 Jahren wird die Behandlung von Elementarteilchenphysik im Physikunterricht diskutiert (Aubrecht, 1986; Swinbank, 1992). Inzwischen ist Teilchenphysik in zahlreichen Ländern bereits Teil des Curriculums in der Oberstufe (Kranjc Horvat et al., 2022). Dementsprechend gibt es verschiedene Vorschläge zur Art und Weise wie Teilchenphysik für Oberstufenschüler*innen zugänglich vermittelt werden könnte. Hier sind für den deutschsprachigen Raum insbesondere die Materialien des *Netzwerk Teilchenwelt* (Kobel et al., 2018) sowie das Wuppertaler Curriculum der Elementarteilchenphysik (Zügge & Passon, 2020) zu nennen.

Eine wichtige Rolle in diesen Materialien nehmen die sogenannten *Feynman-Diagramme* (FD) ein. Diese sind als Repräsentationsform für Teilchenprozesse in der Elementarteilchenphysik nicht mehr wegzudenken. Ihre epistemologische Bedeutung wird jedoch unterschiedlich interpretiert (Meynell, 2008; Passon, 2019), was sich auch in Unterschieden für Erklärungen auf Schulniveau niederschlägt (Passon et al., 2018).

Erläuterung des Projekts. Im Rahmen dieses Projekts wird der konkrete didaktische Nutzen dieser Repräsentationsform untersucht, indem in einem Design-Based-Research (DBR)-Projekt Lehr-Lernmaterial zu Feynman-Diagrammen entwickelt wird.

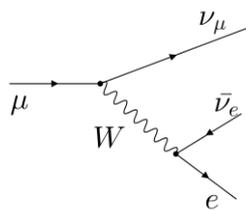


Abb. 1: Ein Feynman-Diagramm der Myon-Transformation, wie es in der Teilchenphysik verwendet wird.

Feynman-Diagramme sind einerseits Werkzeuge bei der störungstheoretischen Berechnung von Teilchenprozessen, andererseits aber auch Visualisierungen von Teilchenprozessen, die in der fachlichen Diskussion von Teilchenphysiker*innen verwendet werden. Verschiedene Konzepte und Definitionen sind in dieser graphischen Symbolsprache kodiert: a) die Ladung ist an jedem *Vertex* (die Verzweigungspunkte im Beispiel von Abb. 1) erhalten; b) Wechselwirkungsteilchen (die gewellte Linie im Beispiel von Abb. 1) sind zentrale Elemente für eine Wechselwirkung; c) Teilchen und Antiteilchen werden durch die Pfeilrichtung unterschieden. In diesem Projekt wird untersucht, welche Lernziele mit Hilfe von Feynman-Diagrammen erreicht und wie diese sinnstiftend vermittelt werden können.

Basierend auf Interviews mit Experten im Bereich der Vermittlung von Teilchenphysik für Schüler*innen wurden vier Lernziele definiert, die mit Feynman-Diagrammen erreicht werden können (Dahlkemper et al., 2022). Diese adressieren a) die Ladungserhaltung, b) die Rolle von Wechselwirkungsteilchen in der Teilchenphysik, c) die Superposition von Diagrammen und d) die Arbeitsweise von Teilchenphysiker*innen.

Designprinzipien für Feynman-Diagramme. Im nächsten Schritt wurden Designprinzipien abgeleitet, nach denen das Lernmaterial entwickelt wird. Diese Designprinzipien basieren auf der kognitiv-affektiven Theorie des Lernens mit Multimedia (CATLM, Moreno & Mayer, 2007), dem DeFT-Framework für das Lernen mit multiplen Repräsentationen (Ainsworth, 2006) und dem Framework der Social Semiotic Resources (SSR, Airey & Linder, 2017). Die CATLM beschreibt, wie multimediale Lernumgebungen verarbeitet werden und gibt konkrete Hinweise zum Design solcher Lernumgebungen. Das DeFT-Framework (Design, Functions, Tasks) beschreibt neben Designvorschlägen für den Gebrauch von multiplen Repräsentationen insbesondere die Funktionen, die diese beim Lernen erfüllen sowie die kognitiven Aufgaben, die für Lernende mit dem Gebrauch dieser Repräsentationen verbunden sind. Das Framework der SSR wiederum beschreibt den unterschiedlichen Umgang von Lernenden und Expert*innen mit Repräsentationen.

Die Designprinzipien sind drei Bereichen zuzuordnen und werden im Folgenden kurz erläutert: a) Reduktion der extrinsischen kognitiven Belastung der Schüler*innen, b) Interaktion der Schüler*innen mit dem Material, c) Anpassung disziplin-spezifischer Abbildungen für pädagogische Zwecke.

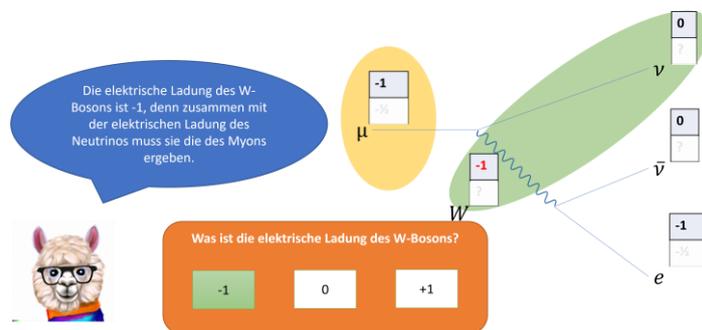


Abb. 2: Ein Beispiel aus dem Lernmaterial. Das Beispiel zeigt die Antwort auf eine Frage im Rahmen des Lernziels zur Ladungserhaltung.

Ein Beispiel aus dem Lernmaterial ist in Abb. 2 gegeben. An diesem Beispiel können einige der o.g. Designprinzipien erläutert werden. Die extrinsische Belastung wird vor allem durch zwei Prinzipien reduziert. Einerseits gibt es an geeigneten Stellen kohärente Zusammenfassungen der gelernten Inhalte, andererseits werden wichtige Dinge hervorgehoben. So sollen in Abbildungen etwa für eine Erklärung relevante Elemente sichtbarer und weniger relevante Elemente weniger sichtbar gestaltet bzw. weggelassen werden. Im Beispiel sind etwa die Zahlen für die sog. ‚schwachen Ladungen‘ schwächer dargestellt, da sie in dieser Erklärung nicht benötigt werden und es wird mit Farben gearbeitet, um darzustellen, welche Bereiche im Text angesprochen werden. Außerdem ist der Text nach Möglichkeit in Alltagssprache geschrieben. Fachtermini werden erklärt bzw. wo es geht, wird auf sie verzichtet.

Die Interaktion der Schüler*innen mit dem Material soll vor allen Dingen durch interaktive Fragen stattfinden, das heißt Schüler*innen beantworten Fragen und erhalten die Möglichkeit, die Antworten zu reflektieren. Die Fragen werden anschließend in erklärender Weise beantwortet, sodass die Erklärungen wiederum für die Beantwortung der nächsten Frage genutzt werden können. Im Beispiel ist zu sehen, wie die richtige Antwort in der Sprechblase erläutert wird.

Da in Feynman-Diagrammen zahlreiche Informationen kodiert sind, die nicht direkt zugänglich für Schüler*innen sind, sollen die Diagramme zudem angepasst werden. So wird einerseits auf Pfeile verzichtet, da diese zur Erreichung der o.g. Lernziele nicht notwendig sind. Es werden zudem Zusatzinformationen, wie etwa die verschiedenen Ladungen der einzelnen Teilchenarten, gegeben. Außerdem wird der Schwierigkeitsgrad der Diagramme Schritt für Schritt erhöht. Im Beispiel ist bereits die am weitesten fortgeschrittene Stufe zu sehen.

Test des Lernmaterials. Das Lernmaterial wird derzeit mit Schüler*innen zwischen 15 und 19 Jahren am CERN in einer kombinierten Eye-Tracking- und Interview-Studie getestet. Die Schüler*innen kommen entweder im Rahmen eines Schüler*innen-Praktikumsprogramms¹ oder als Teil einer Schulklasse für einen Besuch im Schüler*innen-Labor *S’Cool Lab*² ans CERN. Dabei beantworten die Proband*innen zunächst einen Fragebogen mit einigen Fragen zu ihrem Vorwissen in Teilchenphysik. Da es bislang keinen standardisierten Konzepttest zum Thema Teilchenphysik gibt, besteht dieser Vorwissenstest aus zehn Fragen mit Freitextantworten. Der Fragebogen orientiert sich am Fragebogen von Tuzón & Solbes (2016). Anschließend schauen sie sich das Lernmaterial auf einem Bildschirm an, wobei sie per Maus mit dem Material interagieren können. Die Interaktion besteht im Beantworten von Multiple-Choice-Fragen. Bevor die Auflösung zur Frage gegeben wird, erläutern die Schüler*innen ihre Antwort. Während sie das Material verwenden, werden die Augenbewegungen auf dem Bildschirm registriert. Nachdem das Lernmaterial fertig bearbeitet wurde, beantworten die Schüler*innen einen Fragebogen, in welchem sie zu ihrer kognitiven Belastung befragt werden, sowie dazu, inwiefern die Implementation der einzelnen Designprinzipien ihnen beim Verständnis des Materials geholfen hat. Außerdem werden sie gebeten, konkrete Verbesserungsvorschläge zu nennen.

Mit den Eye-Tracking-Daten der Schüler*innen soll einerseits untersucht werden, welche Elemente lernförderlich bzw. -hinderlich sind, andererseits aber auch Problemlösestrategien gefunden werden. So konnte in einer vorläufigen Analyse der Daten aus dem komplexen Beispiel aus Abb. 2 schon abgeleitet werden, dass einige Schüler*innen ein exploratives, suchendes Vorgehen haben, während andere fokussierter auf das Diagramm schauen. Eine systematische Analyse, die diese visuellen Strategien mit den verbalen Erklärungen und dem Vorwissen der Schüler*innen verknüpft steht zum Einreichungszeitpunkt dieses Beitrags jedoch noch aus.

¹ <https://hssip.web.cern.ch>

² <https://scoollab.web.cern.ch/scoollab-plus>

Danksagung

Diese Arbeit wird gefördert durch das Wolfgang-Gentner-Programm des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF-Forschungsvorhaben 13E18CHA).

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 (Eds.), *Multiple Representations in Physics Education* (pp. 95–122). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-58914-5_5
- Aubrecht, G. J. (1986). Report on the conference on the teaching of modern physics. *The Physics Teacher*, 24(9), 540–547. <https://doi.org/10.1119/1.2342122>
- Dahlkemper, M. N., Klein, P., Müller, A., Schmeling, S. M., & Wiener, J. (2022). Opportunities and Challenges of Using Feynman Diagrams with Upper Secondary Students. *Physics*, 4(4), Article 4. <https://doi.org/10.3390/physics4040085>
- Kobel, M., Bilow, U., Lindenau, P., & Schorn, B. (2018). *Teilchenphysik: Ladungen, Wechselwirkungen und Teilchen* (3. Auflage). Joachim Herz Stiftung. <https://doi.org/10.25368/2021.71>
- Kranjc Horvat, A., Wiener, J., Schmeling, S. M., & Borowski, A. (2022). What Does the Curriculum Say? Review of the Particle Physics Content in 27 High-School Physics Curricula. *Physics*, 4(4), Article 4. <https://doi.org/10.3390/physics4040082>
- Meynell, L. (2008). Why Feynman Diagrams Represent. *International Studies in the Philosophy of Science*, 22(1), 39–59. <https://doi.org/10.1080/02698590802280902>
- Moreno, R., & Mayer, R. (2007). Interactive Multimodal Learning Environments: Special Issue on Interactive Learning Environments: Contemporary Issues and Trends. *Educational Psychology Review*, 19(3), 309–326. <https://doi.org/10.1007/s10648-007-9047-2>
- Passon, O. (2019). On the interpretation of Feynman diagrams, or, did the LHC experiments observe $H \rightarrow \gamma\gamma$? *European Journal for Philosophy of Science*, 9(2), 20. <https://doi.org/10.1007/s13194-018-0245-1>
- 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>
- Swinbank, E. (1992). Particle physics: A new course for schools and colleges. *Physics Education*, 27(2), 87–91. <https://doi.org/10.1088/0031-9120/27/2/006>
- Tuzón, P., & Solbes, J. (2016). Particle Physics in High School: A Diagnose Study. *PLOS ONE*, 11(6), e0156526. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0156526>
- Zügge, T., & Passon, O. (2020). Das Wuppertaler Curriculum der Elementarteilchenphysik. In O. Passon, T. Zügge, & J. Grebe-Ellis (Eds.), *Kohärenz im Unterricht der Elementarteilchenphysik* (pp. 121–141). Springer Spektrum. https://doi.org/10.1007/978-3-662-61607-9_8