

Quantenverschränkung: Schülerexperimente real und/oder digital?

Quantenphysikalische Inhalte sind seit vielen Jahren Bestandteil des Physikunterrichts in der Sekundarstufe II. Mit der Erweiterung der KMK-Bildungsstandards um abstrakte Konzepte wie „einzelne Photonen“, „Lokalität“ und „Realität“ (Kultusministerkonferenz, 2020, S. 21) wächst die Bedeutung an Erfahrungsmöglichkeiten (Seiter et al., 2025). Mögliche Erfahrungsräume werden durch reale Experimente (RE), interaktive Bildschirmexperimente (IBE) sowie simulierte Experimente (VE) zur Verschränkung von Photonen eröffnet. In einem Lehrgang von Bitzenbauer (2021) mit interaktiven Bildschirm-Einzelphotonen-Experimenten erzielten Teilnehmende (N = 150) in Konzepttests zu Quantenobjekten bessere Ergebnisse als Teilnehmende des traditionellen Physikunterrichts (vgl. Stadermann et al., 2019) ohne Einzelphotonenexperimente ($d = 0.27$). Hierbei stellt sich die Frage, ob sich diese Effekte durch den Einsatz kostenintensiver realer Einzelphotonenexperimente weiter verstärken lassen, da diese im Vergleich zu Bildschirmexperimenten Vorteile wie eine höhere Authentizität und haptische Komponenten bieten (De Jong et al., 2013). Auch Lehrende, die reale Einzelphotonenexperimente einsetzen, erwarten davon laut einer Umfrage sowohl positive motivationale Effekte als auch ein verbessertes Konzeptverständnis (Borish & Lewandowski, 2023). In diesem Beitrag werden die Motivation und theoretische Ausarbeitung einer Studie vorgestellt, in welcher diese Annahme mitunter empirisch untersucht werden soll.

Motivation, Wissenszuwachs, mental Effort & Load

In einer quantitativen Studie mit 254 Studierenden zeigte sich ein Zusammenhang zwischen intrinsischer Motivation, investiertem Effort und akademischer Leistung (Goodman et al., 2011). Eine höhere intrinsische Motivation geht demnach mit einem höheren *Effort* einher ($r = .244$; $p < .01$), der wiederum positiv mit der akademischen Leistung korreliert ($\beta = .220$; $p < .01$). Zudem wirkt Effort als Mediator zwischen Motivation und Leistung ($\beta = .228$; $p < .01$) (Goodman et al., 2011). Im Rahmen des Vergleichs von (IBE) und (RE) sollen daher neben dem Wissenszuwachs auch Motivation und Effort betrachtet werden, da sie offenbar Prädiktoren für langfristige Leistungsergebnisse darstellen. Wird ausschließlich der Lernzuwachs betrachtet, so zeigt ein Review von Brinson (2015), in dem 59 Studien aus den Jahren 2005–2015 analysiert wurden, dass virtuelle Experimentierzugänge (VE) wie Simulationen und Remote Labs in 65 % der betrachteten Studien zu höheren Lernerfolgen führen als traditionelle Realexperimente (RE). In weiteren 24 % der Studien zeigen sich keine Unterschiede zwischen VE und RE, während lediglich 16 % der Arbeiten zugunsten der RE ausfallen. Effektstärken werden dabei nicht berichtet. Insgesamt verdeutlichen die Ergebnisse, dass VE in der Mehrzahl der untersuchten Fälle einen mindestens gleichwertigen, häufig, aber auch höheren Lernerfolg ermöglichen als klassische RE. In einem systematischen Review von Wörner et al. (2022) wurde untersucht, inwieweit die Nutzung kombinierter Formate [RE + VE] im Vergleich zur isolierten Arbeit mit RE oder VE zu einem höheren conceptual understanding beim Lernen naturwissenschaftlicher Konzepte führt. In 42 experimentellen Studien aus den Jahren

2000 bis 2020 zeigte sich, dass ein höheres *conceptual understanding* bzw. ein größerer Wissenszuwachs durch den Einsatz von RE insbesondere dann auftritt, wenn diese mit VE kombiniert werden. Diese Befunde werden durch eine Meta-Analyse von Wang et al. (2024) gestützt, in der 27 Studien aus den Jahren 2001 bis 2021 zu physikalischen Themen ausgewertet wurden. Der Vergleich des Lernerfolgs zwischen der Kombination [RE + VE] und der ausschließlichen Nutzung von RE ergab einen positiven Gesamteffekt zugunsten der kombinierten Bedingung (Hedges' $g = 0.66$). Besonders deutlich zeigte sich dieser Vorteil bei komplexen und abstrakten Themenbereichen (Wang et al., 2024). Quantenphysikalische Inhalte sind ebenfalls abstrakt, sodass auch hier ein ähnlicher Effekt zu erwarten ist. Krüger et al. (2022) verglichen in zwei Studien den Einsatz von RE und Simulationen zu naturwissenschaftlichen Themen wie Ozeanversauerung (Studie 1, Lernort Schule, $N_1 = 443$) und Zukunft der Ostsee (Studie 2, Lernort außerhalb der Schule, $N_2 = 367$). Unabhängig vom Lernort erzielten Lernende mit Simulationen höhere Wissenszuwächse ($|d_1| = 0.19$; $|d_2| = 1.05$) als mit RE, trotz eines höheren cognitive Loads ($|d_1| = 0.19$; $|d_2| = 0.21$). Hinsichtlich des situativen Interesses zeigten sich Vorteile der RE, insbesondere in den epistemischen und wertbezogenen Komponenten ($|d_1| = 0.33 / 0.35$; $|d_2| = 0.54 / 0.37$). Eine Kombination beider Ansätze wird als besonders wirkungsvoll angesehen, da sich ihre jeweiligen Stärken ergänzen (Krüger et al., 2022). Demnach kann ein höherer cognitive Load durchaus mit höherem Lernerfolg einhergehen. Skulmowski und Xu (2021) stellen in ihrem Review heraus, dass beim digitalen Lernen einige Designfaktoren, die den extraneous Load erhöhen, trotzdem das Lernen fördern können. Dabei werden auch motivationale Einflussfaktoren als mögliche Erklärung diskutiert. Anstelle des cognitive Loads werden in dieser Studie die Konstrukte mental Load und mental Effort aus dem selbstregulierten Lernen verwendet. Mental Effort wird mit positiven Lernergebnissen in Verbindung gebracht, während mental Load negativ mit dem Lernerfolg korreliert (Endres et al., 2025). Daher sollen die Lernprozesse differenzierter erfasst und der mental Effort als möglicher Mediator untersucht werden.

Forschungsfrage und Hypothesen

Die Forschungsfrage lautet:

Welchen Einfluss hat die Verwendung eines interaktiven Bildschirmexperiments bzw. eines Realexperiments sowie deren Kombinationen mit einer Simulation zum Konzept der Verschränkung hinsichtlich deklarativen Wissenszuwachses, mental Load & Effort und intrinsischer Motivation von Schülerinnen und Schülern?

Es wird erwartet, dass der deklarative Wissenszuwachs für das IBE höher ausfällt als für das RE allein. Für die Kombination von RE und Simulation sollte der Wissenszuwachs höher ausfallen als für die Kombination aus IBE und Simulation.

Der mental Load sollte bei der Kombination von IBE und Simulation höher ausfallen als bei der Kombination von RE und Simulation. Bei dem mental Effort erwarten wir den entgegengesetzten Effekt.

Wir erwarten eine höhere intrinsische Motivation beim RE im Vergleich zum IBE. Das sollte auch bei der Kombination mit einer Simulation so bleiben.

Studiendesign

Die Untersuchung ist als experimentelle Studie mit Prä-, Zwischen- und Posttest angelegt. Als unabhängige Variable dient das Experimentierformat (RE vs. IBE), jeweils kombiniert mit einer Simulation, wie in Tabelle 1 dargestellt.

Gruppe	Vortest ca. 20 min	Intervention	Zwischentest ca. 20 min	Intervention	Nachtest ca. 20 min
I	Deklaratives Wissen	IBE ca. 40 min	Deklaratives Wissen; Mental Effort und Load; Intrinsische Motivation	Simulation ca. 20 min	Deklaratives Wissen;
II		RE ca. 40 min		Simulation ca. 20 min	Mental Effort und Load;
III		Simulation ca. 20 min		IBE ca. 40 min	Intrinsische Motivation

Tabelle 1: Beschreibung des Studiendesigns mit 3 Gruppen

Das IBE wird an der Ruhr-Universität entwickelt und basiert in Aufbau und Inhalt auf dem RE (Einzelphtonexperiment mit dem Quantenkoffer von qutools), um eine möglichst hohe Vergleichbarkeit zu gewährleisten. Die Simulation erfolgt voraussichtlich über die Plattform Quantum Flytrap. Aus einer Poweranalyse ($f = 0.25$, $\alpha = .05$, $1-\beta = .80$) ergibt sich die geplante Stichprobengröße von $N > 160$ Schülern (m/w/d) ab 16 Jahren. Daraus werden die Teilnehmenden zu einer der drei Gruppen randomisiert zugeordnet. Geplant sind Erhebungen an der Schule in Einzelarbeit außerhalb des Unterrichts. Für die Erhebung des deklarativen Konzeptwissens wird ein Testinstrument mit Single Choice Items entwickelt und validiert. Die Entwicklung der Items erfolgt literaturbasiert und orientiert sich außerdem an bestehenden Tests (z.B. Bondani et al., 2022; Bitzenbauer et al., 2024; Brang et al., 2024). Der Test erfasst Wissen zu Themen der Quantenphysik, insbesondere zur Quantenverschränkung. Da hierfür bestimmte Grundlagen vorausgesetzt werden, werden zusätzlich Kenntnisse zur Polarisation und zur klassischen Wahrscheinlichkeit abgefragt. Teile der Evaluation sind neben einer Expertenumfrage auch die Pilotierung mit Studierenden und Schülerinnen und Schülern. Mental Effort und Load werden mit einem bestehenden Testinstrument erhoben (Endres et al., 2025). Zur Erfassung der Motivation wird ebenfalls ein bestehendes Instrument, die sogenannte Kurzsкала intrinsischer Motivation (KIM) verwendet (Wilde et al., 2009).

Literatur

- Bitzenbauer, P. (2021). Effect of an introductory quantum physics course using experiments with heralded photons on preuniversity students' conceptions about quantum physics. *Physical Review Physics Education Research*, 17(2). <https://doi.org/10.1103/physrevphyseducres.17.020103>
- Bitzenbauer, P., Faletić, S., Michelini, M., Tóth, K. & Pospiech, G. (2024). Design and evaluation of a questionnaire to assess learners' understanding of quantum measurement in different two-state contexts: The context matters. *Physical Review Physics Education Research*, 20(2). <https://doi.org/10.1103/physrevphyseducres.20.020136>
- Bondani, M., Chiofalo, M. L., Ercolessi, E., Macchiavello, C., Malgieri, M., Michelini, M., Mishina, O., Onorato, P., Pallotta, F., Satanassi, S., Stefanel, A., Sutrin, C., Testa, I. & Zuccarini, G. (2022). Introducing quantum technologies at secondary school level: Challenges and potential impact of an online extracurricular course. *Physics*, 4(4), 1150–1167. <https://doi.org/10.3390/physics4040075>
- Borish, V. & Lewandowski HJ. (2023). Implementation and goals of quantum optics experiments in undergraduate instructional labs. *Physical Review Physics Education Research* [3;19(1). <https://doi.org/10.1103/physrevphyseducres.19.010117>
- Brang, M., Franke, H., Greinert, F., Ubben, M. S., Hennig, F. & Bitzenbauer, P. (2024). Spooky action at a distance? A two-phase study into learners' views of quantum entanglement. *EPJ Quantum Technology*, 11(1). <https://doi.org/10.1140/epjqt/s40507-024-00244-y>
- Brinson, J. R. (2015). Learning outcome achievement in non-traditional (virtual and remote) versus traditional (hands-on) laboratories: A review of the empirical research. *Computers & Education*, 87(September), 218–237. <https://doi.org/10.1016/j.compedu.2015.07.003>
- de Jong, T., Linn, M. C. & Zacharia, Z. C. (2013). Physical and virtual laboratories in science and engineering education. *Science*, 340(6130), 305–308. <https://doi.org/10.1126/science.1230579>
- Endres, T., Bender, L., Sepp, S., Zhang, S., David, L., Trypke, M., Lieck, D., Désiron, J. C., Bohm, J., Weissgerber, S., Castro-Alonso, J. C. & Paas, F. (2025). Developing the mental effort and load–translingual scale (MEL-TS) as a foundation for translingual research in self-regulated learning. *Educational Psychology Review*, 37(1). <https://doi.org/10.1007/s10648-024-09978-8>
- Goodman, S., Jaffer, T., Keresztesi, M., Mamdani, F., Mokgatle, D., Musariri, M., Pires, J. & Schlechter, A. (2011). An investigation of the relationship between students' motivation and academic performance as mediated by effort. *South African Journal Of Psychology*, 41(3), 373–385. <https://doi.org/10.1177/008124631104100311>
- Kultusministerkonferenz. (2020). Bildungsstandards im Fach Physik für die Allgemeine Hochschulreife. In Institut Zur Qualitätsentwicklung Im Bildungswesen.
- Krüger, J. T., Höffler, T. N., Wahl, M., Knickmeier, K. & Parchmann, I. (2022). Two comparative studies of computer simulations and experiments as learning tools in school and out-of-school education. *Instructional Science*, 50(2), 169–197. <https://doi.org/10.1007/s11251-021-09566-1>
- Seiter, M., Konieczny, V. & Krabbe, H. (2025). Erfahrungsbasiertes Lernen in der Quantenphysik – Ein phänomenologischer Zugang durch Realexperimente. *MNU-Journal*, 78(5), 393–400.
- Skulmowski, A. & Xu, K.M. (2021). Understanding cognitive load in digital and online learning: A new perspective on extraneous cognitive load. *Educational Psychology Review* 34, 171–196. <https://doi.org/10.1007/s10648-021-09624-7>
- Stadermann, H. K. E., Van den Berg, E. & Goedhart, M. J. (2019). Analysis of secondary school quantum physics curricula of 15 different countries: Different perspectives on a challenging topic. *Physical Review Physics Education Research*, 15(1). <https://doi.org/10.1103/physrevphyseducres.15.010130>
- Wang, X., Yu, X., Yu, D., Hwang, G. & Lan, M. (2024). Does combining real and virtual experiments improve learning achievement in physics? Evidence from a meta-analysis (2001 - 2021). *Educational Research Review*, 100661. <https://doi.org/10.1016/j.edurev.2024.100661>
- Wilde, M., Bätz, K., Kovaleva, A. & Urhahne, D. (2009). Überprüfung einer Kurzskaala intrinsischer Motivation (KIM). *Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften*, 15, S. 31–45
- Wörner, S., Kuhn, J. & Scheiter, K. (2022). The best of two worlds: A systematic review on combining eal and virtual experiments in science education. *Review Of Educational Research*, 92(6), 911–952. <https://doi.org/10.3102/00346543221079417>