

Moderne Physik im Lehr-Lern-Labor

**Tobias Reinsch*, Holger Cartarius⁺, Axel-Thilo Prokop*, Richard Kemmler*,
Philipp Scheiger*⁺, Katharina Stütz*, Ronny Nawrodt***

* 5. Physikalisches Institut, Abt. Physik und ihre Didaktik, Pfaffenwaldring 57, 70569 Stuttgart

⁺ AG Fachdidaktik der Physik und Astronomie, Friedrich-Schiller-Universität Jena, 07743 Jena

treinsch@pi5.physik.uni-stuttgart.de

Kurzfassung

Immer mehr Themen drängen sich mittelfristig in unseren Alltag. Aktuell beginnen moderne Quantentechnologien Einzug in Industrie und nachfolgend auch in unsere tägliche Lebenswelt zu halten. Damit einher geht die Notwendigkeit nach einem tiefgreifenden Verständnis komplexer Zusammenhänge, die im Minimum durch eine geeignete Schulausbildung untermauert werden müssen. Hierbei muss ein besonderes Augenmerk auf zukünftige Lehrkräfte gelegt werden, wobei umfassende experimentelle Fertigkeiten gefordert werden, die im Lehramtsstudium bisher nur eine nebengeordnete Rolle spielen. Wir präsentieren im Rahmen dieser Arbeit einen ersten Entwurf für die Eingliederung dieser Themen in das Studium. So sollen die Grundlagen der Themen moderner Physik im Zuge eines Lehr-Lern-Labors erlernt und ausprobiert werden. Dies umfasst zum einen optische Aufbauten, mit welchen quantenmechanische Analogieexperimente durchgeführt werden können. Zum anderen werden für die Auswertung von Einzelphotonenmessungen digitale Zähler und das nötige Verständnis elektronischer Schaltungen benötigt und erlernt.

1. Einleitung

Die moderne Physik ist aus unserem Alltag nicht mehr wegzudenken. Regelmäßig werden Entdeckungen aus der Forschung in diversen Medien publiziert, die auch für die breite Öffentlichkeit zugänglich sind. Sei es der Nachweis der Gravitationswellen im Jahr 2015 [1] oder die Würdigung dieser Arbeit mit einem Nobelpreis [2]; sei es die erste Fotografie eines Schwarzen Lochs [3] oder die präzise Messung des magnetischen Moments des Myons, die auf weitere physikalischen Theorien jenseits des Standardmodells hoffen lässt [4]. Meilensteine der modernen Physik sind längst Alltag geworden und sind daher auch im Leben von Schülerinnen und Schülern präsent. Doch nicht nur die Grundlagenforschung bringt zunehmend Schlagzeilen. Auch über technische Anwendungen wie der Quantencomputer [5] oder Quantensensoren wird regelmäßig berichtet. Es liegt daher nahe, dass diese Themen zusätzlich in Film und Fernsehen zu Unterhaltungszwecken eingebaut und behandelt werden. Dadurch kommen vor allem Jugendliche bereits sehr früh mit den Begriffen der Quantenphysik in Kontakt, was zur Folge hat, dass das Interesse für moderne Physik bereits bei Schülerinnen und Schülern vorhanden ist.

Damit diesen Themen auch im Physikunterricht entsprechend Beachtung geschenkt werden kann, müssen Lehrkräfte über das theoretische Fachwissen verfügen. Des Weiteren kommt ein hohes Maß an experimentellen Fertigkeiten hinzu, wenn quantenmechanische Experimente respektive deren Analogieexperimente vorgeführt werden sollen. Die Anforderungen hierfür sind sowohl vielseitig als auch interdisziplinär. Für die Integration in den Schulunterricht

müssen diese Themen bereits in der Lehramtsausbildung erlernt werden. Diese Arbeit soll eine erste mögliche Eingliederung dieser Themen in die Lehramtsausbildung vorstellen.

2. Moderne Physik in den Bildungsplänen (BW)

Die Entwicklung der Inhalte moderner Physik im Schulcurriculum soll exemplarisch für das Bundesland Baden-Württemberg betrachtet werden. In den Bildungsplänen des Landes ist eine stetige Entwicklung der Inhalte im Fach Physik in den letzten Jahren zu beobachten. Die Quantenphysik wird im Jahr 2001 in hohem Umfang behandelt [6]. 2004 hingegen wurden nur noch allgemeine Merkmale von Quantenobjekten diskutiert [7]. In der Bildungsplanreform aus dem Jahr 2016 hat die Quantenphysik wieder an Umfang gewonnen [8]. Es werden erneut Eigenschaften von Quantenobjekten behandelt. Der Fokus wird zusätzlich explizit auf quantenmechanische Experimente gelegt. Es sollen Aussagen zu diesen getroffen werden und mit Wahrscheinlichkeitsinterpretationen erklärt werden. Die Entwicklung der Bildungspläne aus Baden-Württemberg spiegelt die zunehmende Wichtigkeit moderner Physik für die Gesellschaft wieder.

3. Ziel des Lehr-Lern-Labors

Das Lehr-Lern-Labor (LLL) stellt eine besondere Seminarform dar, bei der das Lernen und Lehren synchron stattfindet. Der Ablauf eines LLLs lässt sich in verschiedenen Phasen darstellen (vgl. [9]). Die Grundlage bildet die theoretische Einarbeitung der Studierenden in ein Thema. Dabei sollen verschiedene Lehrmaterialien erarbeitet werden. In dieser Phase findet forschendes Lernen und eigenständiger

Erkenntnisgewinn der Studierenden statt [10]. Im Anschluss findet die praktische Erprobung mit Schülerinnen und Schülern in einem Schülerlabor statt. Nach einer Erprobung wird der Lernerfolg der Schülerinnen und Schülern diagnostiziert und die Lehr-/Lern-Erfolge reflektiert. Aufgrund dieser Erkenntnisse sollen die Unterrichtsmaterialien erneut überarbeitet werden. Die Praxisphase wird anschließend mit einer anderen Schülergruppe wiederholt.

Die Ziele des Lehr-Lern-Labors sind vielfältig. In der theoretischen und praktischen Vorbereitung sollen fachliche Inhalte verknüpft werden und in einen schulischen Kontext eingeordnet werden. Hierfür ist eine intensive didaktische Auseinandersetzung notwendig. Besonders bei Themen moderner Physik werden dabei auch experimentelle Fertigkeiten erlernt, erprobt und verbessert. Gleichzeitig sollen Themen aktueller Forschung auf Schulebene übertragen und möglicherweise didaktisch reduziert werden. Durch den Schülerkontakt können zudem eigene Lehrerfahrungen gesammelt werden, was auch dem Wunsch vieler Studierenden nach mehr Praxiserfahrung gerecht wird [11]. Das Lehr-Lern-Labor stellt somit eine Verknüpfung aus dem Fachbereich, der Didaktik und der Schule dar.

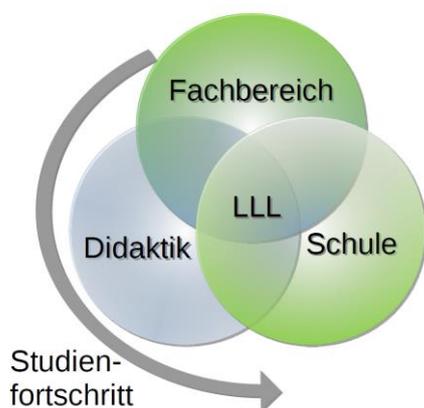


Abb. 1: Lehr-Lern-Labor als Verknüpfung verschiedener Teilbereiche der Lehramtsausbildung.

Abbildung 1 zeigt die Einbindung dieser Teilbereiche der Lehramtsausbildung. Zudem werden diese in Bezug zu den Schwerpunkten eines klassischen Ablaufs eines Physiklehramtsstudiums gesetzt, in welchem in frühen Semestern die Fachvorlesungen mit fachdidaktischen und allgemeinen pädagogischen Vorlesungen ergänzt werden. Gegen Ende des Studiums findet eine Orientierung in Richtung Schule durch beispielsweise ein Schulpraxissemester statt.

4. Mögliche Eingliederung des Lehr-Lern-Labors in den Modulplan

In diesem Abschnitt soll eine mögliche Einbindung des LLLs in den Modulplan des Studiums diskutiert

werden. Beispielhaft wird dies am Plan der Universität Stuttgart aufgezeigt. Das Lehramtsstudium ist dort in ein Bachelorstudium und ein Masterstudium unterteilt. Der Masterabschluss berechtigt hierbei als gleichwertiger Abschluss zum ersten Staatsexamen zum Antritt des Referendariats (Vorbereitungsdienst), welches schließlich zum zweiten Staatsexamen führt. Das Bachelorstudium umfasst fachliche und später fachdidaktische Vorlesungen. Begleitend dazu finden Vorlesungen zu den Bildungswissenschaften und ein Orientierungspraktikum statt. Im Masterstudiengang werden Fach- und fachdidaktische Inhalte vertieft. Des Weiteren findet ein dreimonatiges Praxissemester statt. Das Lehr-Lern-Labor ist aufgrund der fachlichen Tiefe, welche die Ausarbeitung der Schülerbesuche erfordert, als Fachmodul Physik im Masterstudium eingeordnet. Hinzu kommt, dass die Nähe zu aktueller Forschung zur Quantensensorik und zum Quantencomputing am selben Standort einen fachlichen Austausch begünstigt und der Fachbereich daher sehr einfach eingebunden werden kann.

5. Arbeitsfeld: Quantenmechanische Experimente

Ein Arbeitsfeld der modernen Physik im LLL können quantenmechanische Experimente sein. Wir wollen zunächst den Quantenradierer in Hinsicht der benötigten Fertigkeiten diskutieren.

Der Quantenradierer kann als quantenmechanisches Analogieexperiment aufgebaut werden. Es handelt sich um ein Mach-Zehnder-Interferometer, bei dem, durch geeignetes Anbringen von Polarisationsfiltern in den Strahlengang, Weginformationen des Lichts gewonnen werden können. Mit einer kontinuierlichen Lichtquelle lässt sich der Aufbau auch klassisch mit den Gesetzen der Elektrodynamik erklären. Mit einer Einzelphotonenquelle, lassen sich Konzepte wie Nichtlokalität, Wellenfunktionen und Messprozesse in der Quantenmechanik einführen. Für den Wechsel von der Elektrodynamik zur Quantenmechanik ist ein experimenteller Übergang vom cw-Laser zur Einzelphotonenquelle nicht zwingend erforderlich. Der Aufbau eines solchen Interferometers dürfte für einen Experimentalphysiker aus dem entsprechenden Labor keine großen Schwierigkeiten bereiten. In der Lehramtsausbildung kommen aber gerade diese praktischen Übungen häufig zu kurz.

Die Fertigkeiten, die bei diesem Experiment erlernt respektive beherrscht werden müssen sind vielseitig und umfassen in erster Linie den Umgang mit Lasern, Linsen und Polarisationsfiltern. Zum Aufbau muss der Strahlengang präzise justiert werden, was je nach Kohärenzlänge des Lasers mehr oder weniger Justiergeschick erfordert, um den Kontrast des Interferenzbilds zu maximieren.

Sollen quantitative Messungen stattfinden, kommen analoge und digitale Messwerterfassungsmethoden mittels Photodioden und passenden Messverstärkern

zum Einsatz. Beim Übergang zur Einzelphotonenquelle ergänzt sich das Spektrum um Koinzidenzmessungen, digitaler Zähler uvm. Je nach Komplexität des Experiments ist es hierbei unabdingbar, dass auch externe Hilfe mit einbezogen wird. Da der Umgang mit professionellen Laborgeräten in den verschiedenen Arbeitsgruppen der Universität zum Alltag gehört, liegt die Interaktion mit (Fach)Wissenschaftlern nahe. Dadurch wird die Arbeitsweise wissenschaftli-

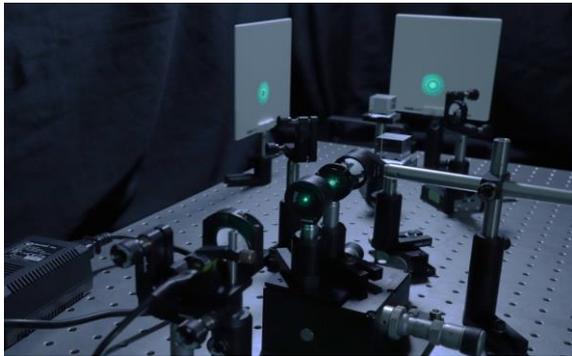


Abb. 2: Aufbau eines Mach-Zehnder-Interferometers als Vorübung des Quantenradierers.

cher Forscherinnen und Forschern und die zugehörigen Abläufe in einer Gruppe in die Lehramtsausbildung integriert.

Der Einstieg in quantenmechanische Experimente fordert daher bereits zu Beginn umfangreiche Fertigkeiten aus der Optik, der Elektronik und der Datenerfassung, die von den meisten Studierenden erst erlernt werden müssen. Die fachinhaltlichen Themen werden durch das Erlernen wissenschaftlichen Arbeitens und das Knowhow aus der Laborarbeit ergänzt.

Ob wie in Abbildung 2 ein Mach-Zehnder-Interferometer oder alternativ ein Michelson-Interferometer aufgebaut wird oder Koinzidenzmessungen zur Widerlegung der Bell-Ungleichung durchgeführt werden, ändert am Umfang der zu erlernenden Techniken wenig. Auch hierbei handelt es sich um komplexe Aufbauten, die eine interdisziplinäre Arbeitsweise erfordern. Gleichzeitig ist ein hohes theoretisches Verständnis erforderlich. Die Vorbereitung der Studierenden auf diese Themen soll selbständig im LLL erfolgen.

Anders als in typischen physikalischen Praktika liegt der Fokus des praktischen Teils nicht auf der Datenerfassung bereits fertig aufgebauter Experimente, sondern auf dem Aufbauen und Einstellen der Experimente von Grund auf, um dies im späteren Schulalltag sicher anwenden zu können. Die Studierenden sollen Aufbausicherheit erlangen, auch komplexe Experimente systematisch aufzubauen und diese Sicherheit auf andere quantenmechanische Aufbauten übertragen können.

6. Ausblick

Als nächster Schritt soll das vorgestellte Konzept mit Studierenden, Schülerinnen und Schülern getestet werden. Aufgrund gesetzlicher Vorgaben während der Corona-Pandemie konnte das Lehr-Lern-Labor in gewünschter Form bisher nicht stattfinden. Abhängig von den gemachten Erfahrungen soll das LLL im Anschluss um weitere Themen aus der Quantenmechanik, aber auch aus Teilbereichen der Messtechnik und der Kernphysik erweitert werden. Die selbstständige Arbeitsweise im LLL soll darüber hinaus auch in den physikalischen Praktika für Lehramtsstudierende verstärkt gefördert werden. Studierende sollen so optimal auf die offenen Aufgabenstellungen im LLL aber auch langfristig auf die Arbeitsweisen im Schulbetrieb vorbereitet werden.

7. Literatur

- [1] Abbott, B.P. et al. (LIGO Scientific Collaboration and Virgo Collaboration): Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Merger, In: Phys. Rev. Lett 116 (2016), S. 061102, URL: <https://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.116.061102> (Stand 5/2021).
- [2] Nobelpreisträger der Physik: <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/> (Stand 5/2021).
- [3] The Event Horizon Telescope Collaboration et al.: First M87 Event Horizon Telescope Results. I. The Shadow of the Supermassive Black Hole. In: The Astrophysical Journal Letters 875:L1 (2019), URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.3847/2041-8213/ab0ec7/pdf>.
- [4] Abi, B. et al. (Muon $g-2$ Collaboration): Measurement of the Positive Muon Anomalous Magnetic Moment to 0.46 ppm. In: Phys. Rev. Lett. 126 (2021), S. 141801, URL: <https://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.126.141801> (Stand 5/2021).
- [5] Quantencomputer: “Wir sind in einer Übergangsphase“: <https://www.mdr.de/wissen/quantencomputer-stand-quantentechnologien-forschung-foerderung-zukunft-100.html> (Stand 5/2021).
- [6] Bildungsplan Baden-Württemberg für das allgemeinbildende Gymnasium 2001: http://www.bildungsplaene-bw.de/site/bildungsplan/get/documents_E-1296698975/Isbw/Bildungsplaene/Bildungsplaene-2001-GymKurs/BP2001BW_bpgykurs.pdf (Stand 5/2021).
- [7] Bildungsplan Baden-Württemberg für das allgemeinbildende Gymnasium 2004: http://www.bildungsplaene-bw.de/site/bildungsplan/get/documents_E978621370/Isbw/Bil-

- [dungsplaene/Bildungsplaene-2004/Bildungsstandards/Gymnasium_Bildungsplan_Gesamt.pdf](#) (Stand 5/2021).
- [8] Bildungsplan Baden-Württemberg für das allgemeinbildende Gymnasium 2016: <http://www.bildungsplaene-bw.de/Lde/LS/BP2016BW/ALLG/GYM/PHI/K/11-12-BF-QUANTEN/06> (Stand 5/2021).
- [9] Nordmeier, V., Käpnick, F., Komorek, M., Leuchtner, M., Neumann, K., Priemer, B. et al. (2014): Schülerlabore als Lehr-Lern-Labore: Forschungsorientierte Verknüpfung von Theorie und Praxis in der MINT--Lehrerbildung. Unveröffentlichter Projektantrag.
- [10] Priemer, B. (2020): Ein kurzer Überblick über den Stand der fachdidaktischen Forschung der MINT-Fächer an Lehr-Lern-Laboren. In: Roth, J., Priemer, B. (2020): Lehr-Lern-Labore. Berlin: Springer-Verlag GmbH Deutschland.
- [11] Rehfeldt, D., Seibert, D., Klempin, C., Lücke, M., Sambanis, M. & Nordmeier, V. (2018): Mythos Praxis um jeden Preis? Die Wurzeln und Modellierung des Lehr-Lern-Labors. die hochschullehre, Jahrgang 4/2018, URL: http://www.hochschullehre.org/wp-content/files/diehochschullehre_2018_Rehfeldt_et_al_Mythos_Praxis.pdf (Stand 5/2021).

Danksagung

Die vorliegende Arbeit wurde im Rahmen der gemeinsamen Qualitätsoffensive Lehrerbildung von Bund und Ländern aus Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung im Projekt „Lehrerbildung PLUS“ (Förderkennzeichen 01JA1907A) unterstützt. Zusätzlich wird das Projekt durch den IQST-Cluster sowie durch die Carl-Zeiss-Stiftung gefördert.