

Abb. 1 Auf einem Lehrmittelworkshop im Berliner Magnus-Haus wurden verschiedene Experimente ausgestellt, beispielsweise zur Faraday-Rotation (vorn), diffraktiven Optik (rechts) und zum Polytropen-Exponent.

Neuen Experimenten auf der Spur

Über die Arbeit der Lehrmittelkommission

Ilja Rückmann und Peter Schaller

Nur innovative Experimente erlauben es, in der Schule und in Bachelor-Studiengängen ein modernes Bild der Physik und ihrer Rolle bei der Realisierung neuer Technologien zu vermitteln. Ziel der Lehrmittelkommission ist es, neue Lehrmittel oder Experimentideen, die an einzelnen Einrichtungen entstanden sind, der Allgemeinheit vorzustellen, zu diskutieren, auszuprobieren, weiterzuentwickeln und damit für alle nutzbar zu machen.

Experimente zielen darauf ab, Hypothesen zu bestätigen. Dies kann mitunter sehr lange dauern, wie die Nachweise des Higgs-Teilchens und der Gravitationswellen gezeigt haben. Experimentieren gilt es zu erlernen – und es erfordert viel Fleiß, Ausdauer, Kreativität, Planung und Objektivität. Die grundlegende experimentelle Ausbildung angehender Physiker findet in den physikalischen Praktika statt. Diese erlauben es, zahlreiche Lernziele zu erreichen sowie auch soziale Kompetenzen zu erlernen [1].

Die rasante Technologieentwicklung der letzten Jahrzehnte, nicht zuletzt auf Basis physikalischer Forschungsergebnisse und ihrer ingenieurtechnischen Umsetzung,

muss Konsequenzen für die Gestaltung der Physikpraktika sowie des Physik- und Technikunterrichts haben. Die Studierenden möchten in den Praktika Technologien nutzen, die sie aus dem Alltag kennen, beispielsweise moderne Lichtquellen, Sensoren, Computer sowie Mikrocontroller oder Smartphones [2].

Neben der Modernisierung klassischer Versuche gilt es, Experimente zu neuen physikalischen Phänomenen zu entwickeln. Doch dies ist leider kein Automatismus und auch keine Aufgabe, die Praktikumsleiter nebenbei erledigen können. Bislang erfährt diese Aufgabe kaum Förderung. Zudem können bei modernen komplexeren Praktikumsversuchen von der Idee bis zum einsatzfähigen, studentensicheren Experiment mit reproduzierbaren Ergebnissen, Anleitungen und Musterlösungen mehrere Jahre vergehen.

Die Experimententwicklung bleibt daher oft Enthusiasten vorbehalten. Das sind meist Fachphysiker, die sich Gedanken um die Verbesserung der experimentellen Lehre machen oder ihre aktuelle Forschung über einen neuen Praktikumsversuch stärker in die Lehre einbringen wollen. Darunter gibt es auch theoretische Physiker wie René Matzdorf aus Kassel mit seinem Experiment „Akustische

Quantenanalogie“ [3], bei dem Kugelflächenfunktionen ausgemessen werden, oder Stefan Bornholdt aus Bremen mit seinem Versuch „Boolesche Genregulierungsmechanismen“ [4], der das Zusammenspiel von Zellen in einfachen biologischen Systemen elektronisch simuliert. Beide Versuche sind, von Kooperationspartnern produziert, inzwischen an mehreren Physikfachbereichen im Einsatz, und erhielten von der Lehrmittelkommission der Arbeitsgruppe Physikalische Praktika (AGPP) in der DPG jeweils ein Gütesiegel [5]. Ideen für neue Experimente oder Weiterentwicklungen entstehen auch in Qualifizierungsarbeiten, kommen aber wegen mangelnden Austauschs selten einem größeren Publikum zugute.

Austausch über Innovationen

Ein Teil des Austauschs über neu entwickelte Lehrmittel, zu denen Schul-, Praktikums- und Demonstrationsexperimente gehören, geschieht klassisch über Veröffentlichungen und Vorträge, beispielsweise auf den DPG-Frühjahrstagungen. Jährlich treffen sich die Praktikumsleiter aller rund 60 Physikfachbereiche in Bad Honnef mit dem Ziel, die Qualität der experimentellen Physikausbildung zu sichern [6]. Ein integraler Bestandteil dieser DPG-Schule besteht darin, neue Experimente bzw. die Weiterentwicklungen bekannter Versuche vorzustellen. Darüber hinaus regt die jährliche Praktikumsleitertagung, bei der das Praktikum der gastgebenden Universität besichtigt wird, zur intensiven Diskussion an.



Abb. 2
Mit Lego lassen sich spannende Versuche zur Optik aufbauen, wie hier bei einem Workshop am MPI für Quantenoptik in Garching.

Eine Lehrmittelkommission, die sich intensiv und ausschließlich der Aufgabe widmet, innovative Experimente zu erfassen, vorzustellen und zu verbreiten, wurde 2010 auf unsere Initiative zusammen mit Silvana Fischer von der Universität Jena gegründet. Später kamen Stephan Graunke von der Universität Rostock und Ronny Nawroth von der Universität Stuttgart hinzu. Die Lehrmittelkommission möchte die an Universitäten entstandenen Entwicklungen erfassen und verbreiten, um Nachnutzungen der Lehrmittel zu ermöglichen und doppelte Entwicklungsarbeit zu vermeiden.

Neue Experimente lassen sich wirkungsvoll bei den Jahrestagungen der DPG, MNU, von Lernort Labor und bei Science on Stage ausstellen und vorführen. Das erzeugt eine viel stärkere Resonanz als Poster oder Vorträge. So entstand die Idee, spezielle Lehrmittel-Workshops zu gestalten. Diese erreichten auch Vertreter von Schülerlaboren, Lehrer, Fachleiter, Entscheider in Bildungsministerien, Schulbuchverlage und nicht zuletzt Lehrmittelfirmen, die daran interessiert sein könnten, Physikexperimente zu vermarkten.

Die Wilhelm und Else Heraeus-Stiftung und die DPG fördern seit Mitte 2017 die Tätigkeit der Lehrmittelkommission mit folgenden Schwerpunkten:

- Weiterführung der ganztägigen, jährlich stattfindenden, bundesweiten Lehrmittel-Workshops „Innovative Experimente zum Erlernen physikalischer Konzepte“;
- Herstellung von Prototypen zweier Experimentneuentwicklungen, um diese an verschiedenen Einrichtungen evaluieren zu lassen und
- Ausgestaltung einer Website „Neue Lehrmittel“, um neue Experimente dort bekannt zu machen.¹⁾

Unsere Vision, das „Gütesiegel für ein innovatives Experiment“ weiterzuentwickeln, haben die AG Physikalische Praktika und die DPG aufgegriffen und den Wilhelm-Westphal-Preis geschaffen, der im September 2019 erstmals vergeben wird.

Vorstellen und ausprobieren

Auf unseren Workshops werden neue Experimente in Kurzvorträgen vorgestellt – mit Kontext und Einordnung in ein physikalisches oder Lehrkonzept [7]. Anschließend können die Teilnehmer die Experimente unter Anleitung der Entwickler selbst ausprobieren. Unser erster Workshop fand 2012 im Haus der Wissenschaft in Bremen statt. Die später bundesweit annoncierten Workshops sind als Lehrer-Weiterbildung anerkannt und führten unter anderem an die Universität Jena, ins Berliner Magnus-Haus (**Abb. 1**), ins Max-Planck-Institut für Quantenoptik in Garching (**Abb. 2**) und an die Universität Rostock. Neben den jeweils etwa 45 angemeldeten Teilnehmern kamen stets Gäste aus den Einrichtungen vor Ort spontan dazu. Seit 2018 ist der Ansturm der Aussteller so gestiegen, dass es nicht mehr möglich ist, alle Experimente in einem eigenen

¹⁾ Die Website wird derzeit aufgebaut. Wir freuen uns auf Beiträge von allen, die ihre neu entwickelten Experimente in dieser Form bekanntmachen wollen.

Vortrag vorzustellen. Die Workshop-Reihe hat ihr Format und Klientel gefunden und sich zu einem Forum des Austauschs entwickelt.

Das Pilotprojekt „Snellius“

Oft sind in den Praktika für Nicht-Physikstudierende selbst einfachste Grundlagen der Optik kaum bekannt. Um dennoch möglichst effektiv diese Grundlagen zu vermitteln, entwickelte und erprobte Peter Schaller an der Phillips-Universität Marburg das Laser-Optik-Kit „Snellius“. Dieser patentierte, kompakte Baukasten enthält eine transparente Grundplatte, auf der ein grüner und roter Halbleiterlaser drehbar angeordnet sind und auf der sich verschiedene optische Elemente wie reflektierende Materialien, eine planparallele Platte mit tangensskaliertes Skala zum Ablesen der Brechungswinkel, Prisma, Halbkreisscheibe, Gitter oder optisch aktive Kristalle aufstecken lassen [8]. Der Versuch vermittelt, dass es an den Grenzflächen stets zu einer Aufspaltung in einen reflektierten und einen transmittierten Strahl kommt. Brechzahlen lassen sich aus Brechungswinkeln, an Prismen aus dem Winkel der geringsten Ablenkung sowie aus dem Grenzwinkel der Totalreflexion im Halbkreiszyylinder bestimmen. An optischen Gittern wird die Beugung abhängig von der Wellenlänge und an verschiedenen Quarzplatten die frequenzabhängige optische Aktivität untersucht (Abb. 3).

Ein Clou dieses Baukastens sind Versuchs- und Protokollvorlagen, die unter die transparente Grundplatte zu legen sind und je nach durchzuführendem Experiment den Aufbau zeigen und es gestatten, gemessene Werte zu protokollieren sowie Strahlengänge aufzuzeichnen. Dies erleichtert es, das Experiment später nachzuarbeiten und nachzuvollziehen. Der Versuchsaufbau „Snellius“ ermöglicht grundlegende Versuche zur Wellen- und Strahlenoptik, die äußerst schnell und sicher aufzubauen sind. Der Baukasten eignet sich in seiner Basisvariante für effektives Experimentieren im zeitlich stark begrenzten Physikunterricht. So ist der Brechungsindex aus den Messwerten bereits ohne Kenntnis der Winkelfunktionen mit einer Zirkel- und Linealkonstruktion zu ermitteln [9]. Der Baukasten wurde 2011 mit einem Gütesiegel ausgezeichnet.

Im Rahmen des Pilotprojekts wurde der mit Mitteln der WEH-Stiftung und mit Unterstützung der DPG hergestellte Klassensatz der Basisvariante „Snellius“ seit Herbst 2017 im FS-Gymnasium Weimar, der TU Freiberg, den didaktischen Fachbereichen der Universitäten Rostock und der Westsächsischen Hochschule Zwickau evaluiert und auf Veranstaltungen wie den Workshops der Lehrmittelkommission oder der DPG-Frühjahrstagung präsentiert.

Auf dem MINT-Festival an der Universität Jena fanden im vergangenen Jahr sechs Workshops mit der Basisvariante und auch mit „Snellius Advanced“ statt, an denen insgesamt 288 Schülerinnen und Schüler teilnahmen. Die Versuchsergebnisse wurden anschließend im Physikunterricht ausgewertet. Die Lehrmittelkommission unterstützte die Workshops auch personell und bekam dadurch etliche Hinweise, wie sich Aufbau und Versuch erweitern bzw. verbessern lassen könnten.

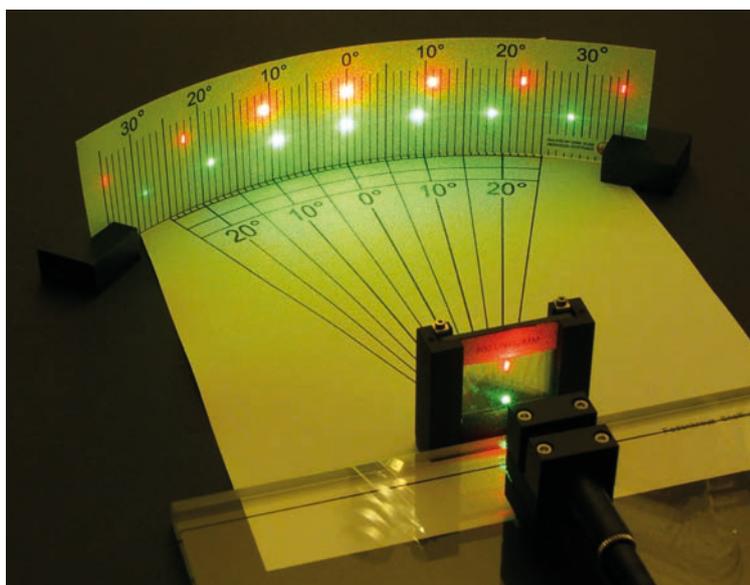


Abb. 3 Das Laser-Optik-Kit „Snellius“ erlaubt es unter anderem, die Wellenlängen mit Hilfe der Beugung am Gitter zu bestimmen.

Im Herbst 2018 folgten weitere Einsätze und Evaluierungen an der BTU Cottbus/Senftenberg. Zudem startete ein ganzjähriges Seminar in Unterschleißheim mit dem Ziel, einen Optikkurs mit „Snellius“ in der zweiten Hälfte des Schuljahres vorzubereiten, in welchem die elften Klassen die siebten Klassen unterrichten. Der Klassensatz wurde im März 2019 zum MINT-Tag im IFL Hamburg eingesetzt und von der Lehrmittelkommission evaluiert.

Der Baukasten zur Faraday-Rotation

Der zweite durch die WEH-Stiftung und die DPG im Rahmen des Pilotprojekts geförderte Versuch stammt aus der Atomphysik und zeigt, dass die Elektronen für die optischen Eigenschaften von Materialien, hier von Glas, verantwortlich sind. Er vermittelt Lerninhalte wie den Zeeman-Effekt, das Oszillator-Modell, dielektrische Funktion (Dispersionstheorie), Spektren von LEDs und das Malus-Gesetz.

Im Versuch wird die durch den Zeeman-Effekt hervorgerufene magnetfeldinduzierte Doppelbrechung in einem Glasblock bei verschiedenen Wellenlängen untersucht, wobei LEDs als Lichtquellen dienen. Da die als Faraday-Rotation bezeichnete Drehung der Polarisationssebene sehr klein ist, muss das Magnetfeld moduliert werden, um den Drehwinkel zu bestimmen. Mit einem auf 45° positionierten Analysator kürzen sich bei der Berechnung vorteilhafterweise die Helligkeit der LED sowie die jeweilige spektrale Empfindlichkeit des Detektors heraus.

Die Verdet-Konstante hängt von der Wellenlänge ab. Daraus lassen sich die effektive Oszillatormasse der Dispersionselektronen, deren Anzahl sowie die Lage einer Modellresonanz ableiten, die alle hochenergetischen optischen Übergänge im Glas zusammenfasst und die dem Zeeman-Effekt ausgesetzt ist. Dadurch spaltet sich die Dispersionskurve auch im weit von der Resonanz entfernten, transparenten Bereich des Glases auf. Als Dispersionselektronen gelten die für die optischen Eigenschaften verant-



Abb. 4 Der Ergänzungsbaukasten zur Faraday-Rotation enthält nur diejenigen Teile, die nicht in der Grundausrüstung für optische Experimente vorhanden sind.

wortlichen Elektronen, also ein Teil der schwächer gebundenen Valenzelektronen. In den 1970er-Jahren war es üblich, mit der Faraday-Rotation die effektive Masse der Elektronen in Halbleitern zu bestimmen. Heute dient sie in speziellen Materialien dazu, optische Isolatoren bei Hochleistungslasern zu realisieren oder äußerst kleine Flussdichten im Nano-Tesla-Bereich in Lichtwellenleitern zu messen.

Dieser in Bremen entstandene Atomphysik-Versuch kann sowohl im Fortgeschrittenenpraktikum als auch bei geeigneter Reduktion im Grundpraktikum oder Schülerlabor zum Einsatz kommen. Im Rahmen des Projekts wurde der Bau von fünf Ergänzungsbaukästen und deren Evaluation gefördert. Diese enthalten nur die Zusatzteile, die für die Faraday-Rotation notwendig sind, und nutzen ansonsten die in den Praktika vorhandene Grundausrüstung (**Abb. 4**). Dadurch ist dieses Experiment mit einer Vielzahl von Lerninhalten recht preiswert zu realisieren.

Die geförderten Baukästen kamen bisher sehr erfolgreich zum Einsatz: über zwei Semester an der TU Chemnitz im Fortgeschrittenenpraktikum, im Projektpraktikum der FH Zwickau und an der Uni Rostock im 4. Semester des Grundpraktikums. Studierende und Lehrkräfte kamen mit dem Ergänzungsbaukasten, der Anleitung, der Musterlösung und der technischen Beschreibung sehr gut zurecht, entwickelten aber auch eigene Aufgabenblätter bzw. Anleitungen. An der TU Wien und an der Uni Hannover wurde der Einsatz des Baukastens bei Lehramtsstudierenden im Rahmen einer Bachelor- bzw. Masterarbeit evaluiert. Der Ergänzungsbaukasten erlaubt es auch, ein Demoexperiment zur Informationsübertragung mittels Polarisationsmodulation eines Laserstrahls zu realisieren.

Von der Evaluation zur Optimierung

Die bisherigen Evaluierungen der beiden Experimente haben diese Versuche bekanntgemacht und im Gegenzug viele Anregungen gebracht. Beispielsweise entstanden beim Laser-Optik-Kit „Snellius“ einige spannende neue Aufga-

benstellungen, aussagekräftigere Anleitungshäfte und ein verbesserter Arbeitsschutz. Für den Versuch Faraday-Rotation wird nun eine heruntergebrochene Anleitung für Schülerlabore und Gymnasien mit dem Schwerpunkt der e/m -Bestimmung erarbeitet.

Schüler und Studierende finden Physik interessant und spannend, wenn sie mit modern ausgestatteten Experimenten selbstständig hantieren dürfen und dabei ihr teilweise bereits vorhandenes Wissen vernetzen. Die Lehrmittelkommission möchte Experimententwicklungen aufspüren und diese im Rahmen von Lehrmittelworkshops, Veranstaltungen und Vorträgen, Evaluierungen und über die derzeit entstehende Webseite einem breiten Publikum zur Verfügung stellen. Die nächsten Lehrmittelworkshops finden am 4. Juli 2019 in Garching und am 14. Mai 2020 in Salzburg statt. Darüber hinaus wird die Lehrmittelkommission im August 2019 Experimente in Moskau präsentieren.

Literatur und Links

- [1] C. Nagel, R. Scholz und K.-A. Weber, Umfrage zu den Lehr/Lernzielen in den physikalischen Praktika, *PhyDid B* (2018), bit.ly/2UEtVfi
- [2] S. Staaks, H. Heinke und Ch. Stampfer, *Smarte Experimente*, *Physik Journal*, November 2018 S. 35
- [3] R. Matzdorf, Quantum Analogs, Acoustic Experiments Modeling Quantum Phenomena, bit.ly/2UmJ7EX (PDF)
- [4] S. Bornholdt und G. Kopperschmidt, Genregulation: Versuche mit dem LECTRON Experimentierkasten (2015), bit.ly/2GFSXck (PDF)
- [5] Gütesiegel für innovative Physikexperimente, bit.ly/2D39G7n
- [6] DPG-Schulen Physikalische Praktika, bit.ly/2YXqTID
- [7] AG Physikalische Praktika, Lehrmittelkommission, bit.ly/2Vv1MdZ
- [8] Patent Snellius, DE 10 2006 015 436.3
- [9] I. Rückmann und P. Schaller, MINT-Zirkel, Klett-Verlag, September/Oktober 2013, S. 10

Die Autoren



Ilja Rückmann (FV Didaktik der Physik) ist Festkörperphysiker und Spektroskopiker. Von 1999 bis 2017 war er an der U Bremen in der fs-Spektroskopie von Halbleitern tätig und hat als Leiter der physikalischen Praktika mit seinem Team über 25 Praktikumsexperimente modernisiert und entwickelt. Von 2006 bis 2012 war er Sprecher der AG Physikalische Praktika und Mitglied im Vorstand des FV Didaktik. 2007 erhielt er den Berninghaus-Preis für Innovationen in der Lehre und ist seit 2018 WE-Heraeus-Seniorprofessor.

Peter Schaller (FV Didaktik der Physik) war Schutzrechts- und Lizenzbeauftragter im Konzern Möbelkombinat Zeulenroda und danach Dozent für Physik und Optik in der Jenaer Weiterbildungsakademie. Ab 2003 war er an der U Marburg für die Organisation der Grund- und Fortgeschrittenenpraktika sowie für die Entwicklung von Experimenten zuständig. Seit 2016 leitet er die Lehrmittelkommission.

Prof. Dr. Ilja Rückmann, WE-Heraeus-Seniorprofessor, Universität Bremen, Otto-Hahn-Allee 1, 28359 Bremen und **Dr. Peter Schaller**, Sprecher der Lehrmittelkommission, 07937 Zeulenroda-Triebes