

Interaktive und aktivierende Lehrkonzepte in der Theoretischen Physik

Philipp Scheiger^{**}, Ronny Nawrodt^{*}, Holger Cartarius⁺

^{*}Physik und ihre Didaktik, Universität Stuttgart, 70569 Stuttgart,

⁺AG Fachdidaktik der Physik und Astronomie, Friedrich-Schiller-Universität Jena, 07743 Jena
p.scheiger@physik.uni-stuttgart.de

Kurzfassung

In den letzten Jahrzehnten wurden viele interaktive sowie aktivierende Lehrkonzepte für den Schulunterricht oder für universitäre Einführungsvorlesungen in der Physik konzipiert und etabliert. Eine Verbesserung des Lernerfolgs bei Schüler*innen, bzw. bei Studierenden mithilfe solcher Lehrkonzepte ist hinreichend belegt. In fortgeschritteneren Themenfeldern wie der Theoretischen Physik in den Gebieten Mechanik, Quantenmechanik, Elektrodynamik, Thermodynamik und der statistischen Physik gibt es jedoch im deutschsprachigen Raum noch kaum konkrete Umsetzungen dieser Konzepte. Wir beschreiben in diesem Artikel Beispiele, wie interaktive und aktivierende Lehrkonzepte in Universitätsvorlesungen zur Theoretischen Physik mit einem hohen mathematischen Anteil aufgebaut und angewendet werden können und möchten alle Dozierenden ermutigen, diese Konzepte in eigenen Vorlesungen ebenfalls einzubauen. Die vorgestellten Beispiele werden seit dem Wintersemester 2018/19 in einem Seminar begleitend zur Vorlesung für Theoretische Physik für das gymnasiale Lehramt erprobt und weiterentwickelt. Diese Vorlesung hat die oben genannten inhaltlichen Schwerpunkte Mechanik, Quantenmechanik, Elektrodynamik, Thermodynamik und statistische Physik. Im Seminar werden die neuen Konzepte folglich in diesem Themenspektrum umgesetzt.

1. Einleitung

Kognitive Aktivierung von Lernenden werden schon seit vielen Jahrzehnten als ein vielversprechendes Thema in der Bildungsforschung angesehen (Sweller et al., 1999). Unter anderem in der Physik- oder Mathematikdidaktik wurden Konzepte entwickelt, deren aktivierender Charakter auf Lernende nachgewiesen ist. Als Beispiel seien hier Worked Examples (Renkl, 2002) (Renkl & Schworn, 2002), Diskussionen in Kleingruppen (Springer et al., 1999) oder die Peer Instruction (Mazur et al., 1997) genannt.

Während diese Konzepte in Schulen und in Grundlagenvorlesungen an Hochschulen und Universitäten erfolgreich umgesetzt werden, scheinen sie noch keinen Einzug in Theorie-Kursvorlesungen an deutschen Universitäten gefunden zu haben. Wir untersuchen, ob solche Methoden auch in Universitätsvorlesungen zur Theoretischen Physik eingesetzt werden können und stellen in diesem Beitrag Beispiele vor, wie solche Umsetzungen, unterstützt durch die didaktische Reduktion (zur Übersicht Girwidz & Berger, 2011) und externe Repräsentationen (Krey & Schwanewedel, 2018), aussehen können.

Unser Schwerpunkt liegt dabei auf der Arbeit oder Diskussion in Kleingruppen (Springer et al., 1999), der Peer Instruction nach Mazur (1997 & 2017), Worked Examples nach Renkl & Schworn (2002), die Didaktische Reduktion (Girwidz & Berger, 2011), externe Repräsentationen (Krey & Schwanewedel,

2018) und als spezielle Form der externen Repräsentation die Versprachlichung von Formeln nach Janßen & Pospiech (2016).

Im Folgenden werden diese Methoden kurz vorgestellt (Kapitel 2) sowie Beispiele für unsere Umsetzung in Kontext einer Theorie-Kursvorlesung an der Universität Stuttgart für Studierende des Lehramts an Gymnasien genannt (Kapitel 3).

2. Rahmen für die Entwicklungsarbeit

2.1. Kognitive Aktivierung

Wir betrachten Lehre als aktivierend, wenn es zu einer aktiven Auseinandersetzung der Lernenden mit Stoffinhalten auf angemessenem Niveau kommt. Genauer ist nach Hugener et al. (2007) Lehre aktivierend, wenn Lernende mit Aufgaben zum Denken auf einem hohen kognitiven Niveau angeregt werden, an das Vorwissen der Lernen angeknüpft wird, dieses aktiviert wird, Lernende eigene Lösungen, Ideen und Konzepte entwickeln und diese im nächsten Schritt erklären müssen. In der Literatur wird dies häufig als „kognitive Aktivierung“ bezeichnet (siehe unter anderem Hugener et al. (2007), Leuders & Holzäpfel (2011) und Rubitzko et al. (2018))

Diskussion in Kleingruppen

Die Arbeit und Diskussion in Kleingruppen kann nach Springer et al. (1999) im Mittel zu einem erhöhten Wissenserwerb führen. Da hier Erklärungen und Lösungsvorschläge sprachlich produziert werden

müssen, ordnen Lernende ihre Gedanken und Vorstellungen. Zusätzlich wird das verständliche, fachlich korrekte Formulieren physikalischer Zusammenhänge trainiert, was ein lohnenswertes Lernziel sein kann (Rubitzko et al., 2018).

Peer Instruction

Bei der Peer Instruction nach Mazur (2017) werden Schüler*innen oder Studierenden Verständnis- oder Konzeptfragen gestellt, meist im Multiple-Choice-Format. Die Lernenden haben etwas Zeit, sich ihre Antwort zu überlegen. Anschließend findet eine erste Abstimmung über die richtige Antwort statt, die idealerweise anonym ist.

Das Gesamtergebnis der ersten Umfrage wird den Lernenden präsentiert und anschließend sollen diese sich in Kleingruppen gegenseitig von der eigenen Antwortwahl überzeugen. Nach der Diskussion wird ein weiteres Mal abgestimmt. Sind Fragen und Antworten gut gewählt, so ist hier ein Trend zur richtigen Antwort zu erkennen, auch ohne Zutun des Lehrenden. Abschließend sollte in der gesamten Runde die richtige Antwort enthüllt und erklärt werden, bzw. Unklarheiten der Studierenden. Auch die Peer Instruction kann den Wissenserwerb steigern (Mazur, 2017 und Mazur & Hilborn, 1997).

Worked Examples

Die Idee hinter Worked Examples besteht darin, dass den Lernenden mehrere Probleme mit Lösungsbeispielen zur Verfügung gestellt werden. Nach Renkl & Schworm (2002) können mehrere Beispiele dem üblichen Schema, dass erst eine Erklärung erfolgt, anschließend ein Beispiel präsentiert wird und darauf eine Rechenaufgabe folgt, überlegen sein. Ein zusätzlicher Lerneffekt kann erzielt werden, wenn sich die Studierenden die Lösungsbeispiele selbst erklären müssen und sie sich klar machen, welcher Sinn bzw. Zweck hinter den einzelnen Rechenschritten steckt. Auch bei Worked Examples gilt die Wirksamkeit der kognitiven Aktivierung als belegt (Sweller et al., 1998 und Renkl, 2002).

2.2. Didaktische Reduktion

Die Elementarisierung oder didaktische Reduktion ist ebenfalls eine Disziplin aus der Schul-Physikdidaktik (Girwidz & Berger, 2011). Doch Rubitzko et al. (2018) und John & Staraschek (2017) halten dies vor allem im Blick auf die Lehrerbildung für gewinnbringend. Natürlich sollten die Gütekriterien eingehalten werden und die Reduktion fachgerecht und anschlussfähig sein, nur eben an das Niveau an Hochschulen angepasst.

Dabei ist nicht nur die Reduktion von physikalischen Objekten gemeint. In der Theoretischen Physik könnte vor allem die didaktische Reduktion von physikalischen Methoden (Kircher, 2015) das Verständnis und den Zugang von Studierenden an die Physik verbessern.

2.3. Externe Repräsentationen

Multiple Externe Repräsentationen, also die Darstellung derselben Sache durch verschiedene Repräsentationen, z.B. Text, Formel und Bild, können den Lernerfolg steigern (Krey & Schwanewedel, 2018) und sind in der naturwissenschaftlichen Bildung gängige Praxis. In der theoretischen Physik ist der mathematische Formalismus die gängige Repräsentation. Dieser kann und sollte aber für ein besseres Verständnis durch erklärende Texte und logische Bilder (Schnotz & Bannert, 1999) ergänzt werden.

Versprachlichung von Formeln

Der Wechsel zwischen verschiedenen Repräsentationsformen ist nicht ohne weiteres von Studierenden zu erwarten, kann aber trainiert werden. Einen Ansatz zur Versprachlichung von Formeln verfolgen Janßen & Pospiech (2016). Zentrale Idee dieses Konzepts ist, Formeln nicht als reines Kalkulationswerkzeug zu behandeln, sondern mit anderen Inhalten zu verknüpfen. Dies kann nach Janßen & Pospiech (2016) in semantischen Netzwerken ausgedrückt werden und durch einen Fragenkatalog unterstützt, bzw. angeregt werden.

Durch den sehr hohen Mathematikanteil in der Theoretischen Physik ist der Ansatz, Formeln physikalisch zu interpretieren und zu verstehen, durchaus lohnenswert. Wird dies aktiv von Lernenden geübt, sollte sich das fachliche Niveau in Kleingruppen (siehe Abschnitt 2.1.) steigern.

3. Anwendung in einem Begleitseminar zur theoretischen Physik

Die nun aufgeführten Beispiele werden in einem Begleitseminar eingesetzt, das unterstützend zu einer Vorlesung der theoretischen Physik an der Universität Stuttgart angeboten wird. Die zweisemestrige Kursvorlesung ist die Theorieausbildung der Lehramtsstudierenden und mit vier Semesterwochenstunden plus zwei Semesterwochenstunden für Übungsaufgaben angesetzt. Im Wintersemester werden die klassische Mechanik und die Quantenmechanik behandelt, im Sommersemester die Elektrodynamik, die Thermodynamik und die statistische Physik. Das Begleitseminar orientiert sich an den Inhalten der Vorlesung, hat aber keinen direkten Einfluss auf die Benotung des Moduls, der Besuch ist freiwillig. Die einzelnen Übungen und Aufgaben werden im Sinne einer didaktischen Rekonstruktion (Kattmann & Duit, 1997) überarbeitet, wobei diese ähnlich wie bei Engemann (2019) auf Studierende angepasst wurde.

3.1. Arbeit in Kleingruppen/Peer Instruction

Arbeit in Kleingruppen

Die Arbeit in Kleingruppen lässt sich in eigentlich jedem Themengebiet umsetzen und die Aufforderung zur Arbeit und Diskussion in Kleingruppen ist in vielen der hier aufgeführten Beispiele enthalten, so auch in der Peer Instruction.

Peer Instruction

Wir sind der Meinung, dass sich die Peer Instruction im Sinne von Eric Mazur in der Theoretischen Physik sehr gut umsetzen lässt. Dies wurde z.B. in den Vereinigten Staaten an der University of Colorado Boulder in mehreren Disziplinen umgesetzt (als Beispiel seien Chasteen et al., (2009), Goldhaber et al., (2009) und Pollock et al., (2010) genannt).

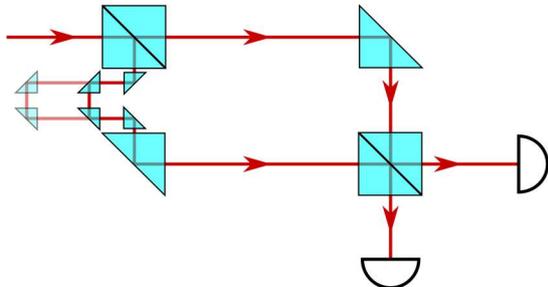


Abb.1: Mach-Zehnder Interferometer mit verstellbaren Weglängen. Die roten Pfeile stellen den möglichen Photonenweg dar. Die optischen Elemente wie Strahlteiler oder Spiegel sind hellblau dargestellt und die Detektoren sind die Halbkreise.

Doch auch in deutschsprachigen Vorlesungen lässt sich dieses interaktive Element der Diskussion und Abstimmung über Handzeichen, universitäre online-Plattformen wie ILIAS oder Moodle oder mit elektronischen Abstimmgeräten einsetzen. Im Wintersemester 19/20 wurden in einem Begleitseminar zur Theorie-Kursvorlesung über die klassische Mechanik und die Quantenmechanik Verständnisfragen im Sinne von Mazur getestet.

In der Theorie der klassischen Mechanik und der Quantenmechanik bieten so gut wie alle Themen Möglichkeiten, das Verständnis mit gezielten Fragen von Studierenden abzufragen oder zu steigern. Es erfordert lediglich ein höheres Maß an Vorbereitung der Dozierenden, nützliche Verständnisfragen vorherzusagen und dazu passende Antwortmöglichkeiten zu finden.

In unserem Seminar werden Verständnisfragen am Beispiel des Stern-Gerlach-Versuchs oder bei Gedankenexperimenten mit Einzelphotonen und Strahlteilern gestellt, da hier die Wesenszüge der Quantenmechanik, wie das statistische Verhalten, die Fähigkeit zur Interferenz aber auch die Eindeutigkeit von Messergebnissen am deutlichsten aufgezeigt werden können und diese in einfacher Weise grafisch unterstützt werden können. Abbildung 1 zeigt als Beispiel ein Mach-Zehnder-Interferometer. Bei diesem Thema können den Studierenden anhand von verstellbaren Weglängen Fragen zu unterschiedlichen Kombinationen von Interferenzmustern an den Detektoren gestellt werden.

Beispiel: Bei der ursprünglichen Einstellung der Weglängen wurde an Detektor 1 nie ein Photon gemessen. Nun wird der untere Weg um ein Vielfaches der Wellenlänge der Photonen verlängert. Wie viele

von 1000 ausgesendeten Photonen werden dann in Detektor 1 gemessen?

Verständnisfragen lassen sich aber auch bei anderen für die Theoretische Physik typischen Themen stellen, wie z.B. bei gefangenen Teilchen in Potentialen.

In der klassischen Mechanik wurde ergänzend der Versuch unternommen, den Charakter der Peer Instruction auf offene Fragen im Grenzbereich zwischen Mathematik und Physik zu übertragen. Aufgabe war es, eine mathematische Formulierung für Zwangsbedingungen im Lagrange-Formalismus zu finden.

Wie bei gewöhnlichen Peer Instruction-Fragen wurde das Problem mit einer Skizze veranschaulicht (Abbildung 2). Aufgabe der Studierenden war es, eine mathematische Formulierung der Zwangsbedingung zu finden. Anschließend sollte der Sitznachbar/die Sitznachbarin von der eigenen Lösung überzeugt und zum Schluss das korrekte Ergebnis im gesamten Kurs diskutiert werden.

Obwohl das Aufstellen von mathematischen Zwangsbedingungen Teil der Vorlesung und einer Übungsaufgabe war, hatten die Studierenden vermutlich zu wenig Erfahrung im Umgang mit der Formulierung von Zwangsbedingungen und die meisten konnten in fünf Minuten Bearbeitungszeit kein Ergebnis produzieren, über das diskutiert werden konnte. An dieser Stelle scheinen daher mehr Beispiele und eine Ausarbeitung der Studierenden ohne Wettbewerbscharakter, wie Worked Examples es darstellen, die bessere Wahl zu sein.

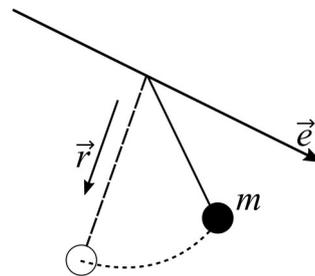


Abb.2: Grafische Darstellung einer Masse an einem Pendel (\vec{r}), das eine Stange (\vec{e}) hinunterrutscht. Aufgabe der Studierenden war es, die Zwangsbedingungen mathematisch auszuformulieren, die die Bewegung der Masse einschränken.

Die Studierenden schätzen laut Eigenaussagen sehr, den aktivierenden Charakter und können durch entsprechende Fragen auf kognitive Konflikte aufmerksam gemacht werden.

3.2. Worked Examples

Die Methode der Worked Examples bietet sich bei Übungsaufgaben für Studierende im Lehramt besonders an, wenn die Studierenden im Zweifach keine Mathematik belegen. Bei dieser Fächerwahl geht automatisch sehr viel Arbeitszeit in das Nacharbeiten mathematischer Methoden und kann nicht der Physik gewidmet werden. Neben der ursprünglich vorgesehenen Anwendung der Worked Examples bei

Rechenaufgaben ist diese Methode daher ein spannender Kandidat, den Studierenden das Wechselspiel Physik-Mathematik näher zu bringen.

Insbesondere nachdem wir negative Erfahrungen mit verfrühten offenen Peer Instruction-Fragen gesammelt haben, lohnt es aus unserer Sicht, verstärkt auf Worked Examples zu setzen, wenn Studierende lernen sollen, physikalische Probleme mathematisch darzustellen. Dieser Ansatz bietet sich immer dann an, wenn mehrere simple Beispiele zu einem Thema existieren. Im Folgenden wollen wir ein Beispiel zum Noether-Theorem herausgreifen, da hier die Voraussetzung gut erfüllt ist.

Bei diesem Thema kann immer nach dem selben Schema vorgegangen werden, bei dem man zunächst den Wechsel von der physikalischen Ebene zur mathematischen vollzieht und dann wieder zur physikalischen zurückkehrt. Dies könnte so aussehen bzw. wurde beispielhaft im Seminar so umgesetzt:

1. Mathematische Beschreibung der kinetischen und potentiellen Energie aufstellen.
2. Aufstellen der Lagrange-Funktion.
3. Invarianzen (Symmetrien) der Lagrange-Funktion finden.
4. Physikalische Erhaltungsgrößen ableiten.

Begonnen wird zunächst mit einem einfachen Beispiel, einem Wagen auf einer Tischplatte. Dies wird gemeinsam mit den Studierenden durchgesprochen oder es wird eine kommentierte Musterlösung ausgehändigt. Auf diesem Weg wird die Translationssymmetrie mit der Impulserhaltung verknüpft.

Das zweite, deutlich komplexere Beispiel, für das die Studierenden eine Musterlösung erhalten, diese aber eigenständig durcharbeiten sollen, ist das reibungsfreie Federpendel (Abbildung 3.). Die kinetische (T) und potentielle (V) Energie werden bestimmt und zur Lagrange Funktion (L) zusammengeführt.

$$L = T - V = \frac{1}{2}m\dot{x}^2 + \frac{1}{2}Dx^2 \quad \{1\}$$

Diese Gleichung {1} ist invariant unter Translationen der Zeit und somit muss die Energie erhalten sein.

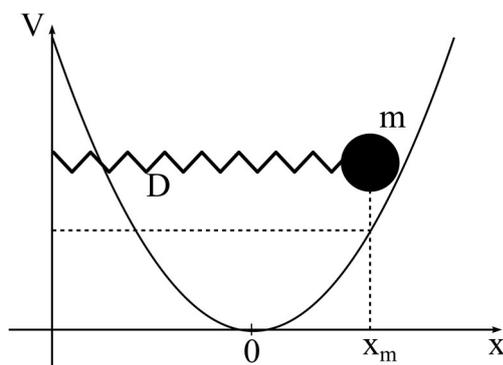


Abb.3: Federpendel und Potential des Pendels im Potential-Ort-Diagramm. Das zweite Beispiel der „Worked Examples“ zum Noether Theorem.

Das dritte Beispiel, das die Studierenden komplett selbst bearbeiten sollen, ist das gravitative Zweikörper-

problem. Hier können die Studierenden die Impuls- und Energieerhaltung erneut nachweisen. Der Drehimpuls und der Runge-Lenz-Vektor sind ebenfalls Erhaltungsgrößen, die eine Zusatzaufgabe und Herausforderung für die fachlich stärksten Studierenden sein können.

3.3. Elementarisierung/Didaktische Reduktion

In der Theoretischen Physik können der hohe Grad an Formalismus und Mathematisierung das Bestreben nach einer grundlegenden, möglichst simplen Theorie verschleiern. Ein Ziel des Seminars ist deshalb, dass die Studierenden didaktische Reduktionen selbst finden oder durchführen, um zum eigenen Denken aktiviert zu werden und so das eigene Verständnis zu steigern. Dabei sind Elementarisierungen physikalischer Objekte aber auch physikalischer Methoden gemeint.

Inhalte, die zuvor in der zugehörigen Kursvorlesung besprochen wurden, werden auf diesem Weg wiederholt und von den Studierenden selbst eingeordnet und strukturiert. Um diesen Vorgang selbst etwas Struktur zu geben, wird den Studierenden ein Fragenkatalog zur Seite gestellt:

1. Wie ist der Abschnitt/das Kapitel aufgebaut?
 - Herleitung, Erklärung, Auflistung, ...
2. Was ist das Thema des Abschnitts/Kapitels?
3. Welches physikalische Problem wird hier behandelt?
4. Was ist die zentrale physikalische Idee? (Was wird hier quantisiert?)
5. Was ist die mathematische Formulierung der zentralen Idee?
 - Welche Formeln kommen vor und was beschreiben sie?
 - Wie hängen die Formeln zusammen?
6. Lässt sich die zentrale Idee auch grafisch darstellen?
 - Skizze, Graph, Plot, Mindmap, ...
7. Wofür benötigt man das behandelte Thema?
8. Nehmen die Inhalte Bezug auf vorherige Vorlesungen/Inhalte?

Abschließend werden die studentischen Ergebnisse in der Gruppe vorgestellt, diskutiert und eingeordnet.

3.4. Versprachlichung von Formeln

Damit das Niveau bei Diskussionen in Kleingruppen kontinuierlich steigt, muss der Umgang mit Formeln und dem Formalismus geübt werden. Wir haben dazu Ansätze aufgegriffen, die von Janßen & Pospiech (2016) für den Schulunterricht entwickelt wurden, und die Umsetzung auf Studierende angepasst. Diese Herangehensweise und der Umgang mit Formeln könnten aus unserer Sicht gerade für Studierende einen Mehrwert besitzen, wenn grundlegende Definitionen oder Formeln besprochen werden, die aufeinander aufbauen oder Abhängigkeiten aufweisen. Mit

dem folgenden nach Janßen & Pospiech (2016) adaptierten Fragenkatalog sollen die Studierenden zum Nachdenken angeregt werden.

1. Unter welchen Bedingungen gilt die Formel?
2. Welchen physikalischen Vorgang beschreibt die Formel?
3. Was passiert mit einer Variablen der Formel, wenn eine andere variiert wird?
4. Wie sieht ein Graph/Plot aus, der den Zusammenhang zwischen den Größen der Formel darstellt?
5. Wie wurde die Formel in der Vorlesung eingeführt?
 - Definiert sie z.B. eine neue physikalische Größe?
 - Woraus wurde sie abgeleitet?
6. Für welche Anwendung wird diese Formel gebraucht?

Teilt man Studierenden verschiedene Formeln in Gruppen zu, kommt der aktivierende Charakter der Arbeit in Kleingruppen hinzu, bzw. die Studierenden können sich ihre Ergebnisse gegenseitig vorstellen.

Ein offensichtliches Anwendungsgebiet der Versprachlichung von Formeln sind die Maxwell-Gleichungen der Elektrodynamik. Aus unserer Sicht lohnt die Methode umso mehr, je abstrakter die physikalischen Größen werden. Gerade wenn eine bildliche Vorstellung kaum möglich ist, sollte sie den Zugang zum Formalismus deutlich unterstützen können. Dies ist bei unsichtbaren elektrischen und magnetischen Feldern schon der Fall, tritt aber noch deutlicher bei den abstrakten Begriffen der Quantenmechanik zu Tage.

Wir greifen z.B. die Definition des Erwartungswertes,

$$\langle \hat{A} \rangle = \langle \psi | \hat{A} | \psi \rangle, \quad \{2\}$$

die Unschärferelation für zwei nicht-kommutierende Observablen,

$$\Delta \hat{A} \cdot \Delta \hat{B} = \frac{1}{2} |\langle [\hat{A}, \hat{B}] \rangle|^2, \quad \{3\}$$

die Kontinuitätsgleichung,

$$\partial_t \rho(\vec{r}, t) + \nabla \cdot \vec{j} = 0, \quad \{4\}$$

und für die fachlich stärksten das Ehrenfest-Theorem,

$$\hat{A} \frac{d}{dt} \langle \hat{p} \rangle = \frac{1}{m} \frac{d^2}{dt^2} \langle \hat{r} \rangle = -\langle \nabla V \rangle \equiv \langle \vec{F} \rangle, \quad \{5\}$$

heraus und lassen es in einer Gruppenarbeit durchsprechen. Jede Zweiergruppe soll mithilfe des Fragenkatalogs die eigene Formel charakterisieren und anschließend dem gesamten Kurs vorstellen. In der Vorstellungsrunde werden dann Abhängigkeiten und Verknüpfungen der Formeln herausgearbeitet.

3.5. Externe Repräsentationen

Externe Repräsentationen können Studierenden das Nachvollziehen anspruchsvoller Inhalte und Themen erleichtern und sollten deshalb so oft wie möglich in Vorlesungen oder Aufgabenstellungen Anwendung finden. In der Quantenmechanik bietet sich dies an,

um Quantenzahlen, Zustände, Messungen und den Hilbertraum zu veranschaulichen.

Im Seminar wird dies beim Beweis von Verschränkung und Nichtlokalität nach Hardy (1993) durchgeführt. Spinzustände lassen sich im zweidimensionalen Hilbertraum sehr einfach über Vektoren als logisches Bild darstellen und ermöglichen so einen grafischen Zugang zum Dirac-Formalismus.

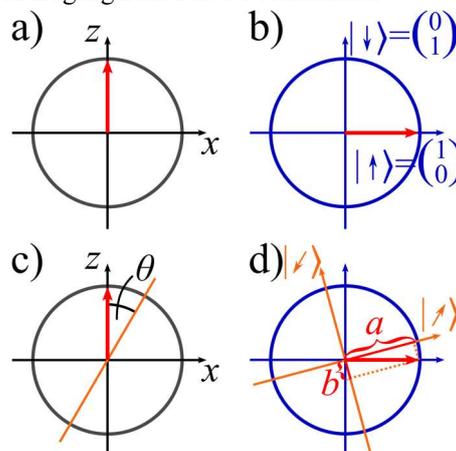


Abb.4: Ein Spin-„up“ (roter Pfeil) im Ortsraum (a) und Hilbertraum (b). Die Abbildungen (c) und (d) zeigen, wie dieser Spin-„up“-Zustand in einer um den Winkel θ verkippten Basis (orange) ausgedrückt werden kann, wobei seine zugehörigen Komponenten hier a und b genannt werden.

Da die Benennung von Zuständen in Bra- und Ket-Vektoren willkürlich ist, werden hier Pfeile verwendet, um die Verknüpfung zur grafischen Darstellung noch deutlicher zu machen. Die Spinzustände „up“ und „down“ können so in verschiedenen, um 45° , bzw. 90° zueinander verkippten Basen ausgedrückt werden:

$$|\uparrow\rangle, |\downarrow\rangle, |\nearrow\rangle, |\swarrow\rangle, |\rightarrow\rangle, |\leftarrow\rangle \quad \{6\}$$

Grafisch können nun der Orts- und der Hilbertraum voneinander abgegrenzt und verglichen werden.

Quantenmechanische Begriffe wie Zustand, Messung oder Wahrscheinlichkeit bekommen ein grafisches Äquivalent wie Vektor, Projektion und Vektorkomponente. Abbildung 4 zeigt dies anschaulich. Ein Spin-„up“ in z -Richtung kann in Orts- und Hilbertraum dargestellt werden oder sogar in einer um den Winkel θ verkippten Basis,

$$|\uparrow\rangle = a|\nearrow\rangle + (-b)|\swarrow\rangle \quad \{7\}$$

Die Pfeile als Kenngrößen im Dirac-Formalismus erleichtern die Verknüpfung zu den logischen Darstellungen wie in Abbildung 4, was den Zugang zum Formalismus erleichtern sollte. Basis (senkrecht, waagrecht und schräg) und Spinzustand (die Pfeilrichtung) sind auf einen Blick zu erkennen.

Zustände wie

$$|\Psi\rangle = N(AB|\nearrow\rangle_1|\swarrow\rangle_2 + AB|\swarrow\rangle_1|\nearrow\rangle_2 + |\swarrow\rangle_1|\swarrow\rangle_2) \quad \{8\}$$

können so einfacher ausgelesen und verstanden werden. N , A , B sind Vorfaktoren und die tiefgestellten Ziffern bestimmen das Teilchen eines verschränkten Spinpaars. Wenn die Spins eines verschränkten Paares im Zustand $|\Psi\rangle$ (Gleichung {8}) zu zwei Detektoren bei Alice und Bob geschickt werden und Alice das erste Spinteilchen im Zustand $|\nearrow\rangle_1$ misst, so ist vorherbestimmt, dass Bob, wenn er in derselben schrägen Basis misst, das zweite Teilchen im Zustand $|\swarrow\rangle_2$ detektieren wird. Denn dass Alice Teilchen sich im Zustand $|\nearrow\rangle_1$ befindet, beschreibt lediglich der erste Term in Gleichung {8}, Bobs Messung ist für diesen Fall und diese Basis eindeutig.

4. Lehrerfahrung und studentisches Feedback

Unsere Erfahrung aus dem Einsatz der verschiedenen Methoden in einem Begleitseminar zu den Theorie-Kursvorlesungen der theoretischen Physik zeigt, dass ihre Anwendung Erfolg verspricht. Insbesondere der Einsatz der Peer Instruction wird von den Studierenden generell gelobt. Diese schätzen den Spaß an dem Quizcharakter und fühlen sich zum Nachdenken herausgefordert. Einzelne Fragen können immer überarbeitet werden.

Da in mehreren Gesprächen mit verschiedenen Studierenden der Besuch der Vorlesung und das Bearbeiten der Übungsaufgaben als einzige Werkzeuge des Wissenserwerbs genannt wurden und das Nacharbeiten der Vorlesung kaum praktiziert wird, wurde der Anteil zur didaktischen Reduktion durch die Studierenden und zur Versprachlichung von Formeln intensiviert. Dies war oder ist auch deshalb notwendig geworden, da sich bei gezieltem Nachfragen Wissenslücken oder fehlendes Verständnis offenbart haben. Dies war sogar bei Themen der Fall, die in der eigentlichen Vorlesung und den zugehörigen Übungsaufgaben behandelt wurden. Der hohe Sprechanteil der Studierenden verursacht zu Beginn scheinbar einiges an Unbehagen. Doch nach ersten mündlichen Prüfungen wurde dieser explizit verstärkt gewünscht.

Im Allgemeinen fällt es Studierenden auf, wenn für die Lehre Aufwand betrieben wird und sie schätzen dies. Es bleibt allerdings aktuell noch die Frage offen, wie repräsentativ solche Aussagen sind, da es sich um ein freiwilliges Seminar handelt. Die Teilnehmer*innen zeigen schon von Anfang an ein hohes Engagement, decken aber nicht den gesamten Jahrgang ab. Die typischerweise kleinen Jahrgänge im Physik-Lehramt lassen eine repräsentative Evaluation als nicht lohnenswert erscheinen, sodass nur einfache Befragungen unter den Teilnehmer*innen existieren. Der erste Eindruck ist allerdings positiv.

5. Zusammenfassung

Kognitiv aktivierende Lehrmethoden lassen sich auch in der Theoretischen Physik sehr gut umsetzen. Wir haben uns auf die Diskussion in Kleingruppen, die Peer Instruction, Worked Examples, die didaktische Rekonstruktion, externe Repräsentationen, und spezi-

ell die Versprachlichung von Formeln in Kleingruppen konzentriert. In allen üblichen Themenfeldern der Theoretischen Physik (klassische Mechanik, Quantenmechanik, Elektrodynamik, Thermodynamik und statistische Physik) könnten sehr schnell Umsetzungen der Lehrmethoden gefunden werden. Die Ausarbeitung verlangt natürlich mehr Aufwand als eine klassische Vorlesung-Übungs-Kombination, doch wir sind uns sicher, dass sich dieser Aufwand lohnt.

Eine repräsentative Evaluation der neuen Lehransätze und ihrer Wirksamkeit kann in den typischerweise kleinen Gruppen im Physik-Lehramt nur schwer durchgeführt werden. Doch wir sind aufgrund der Vorerfahrungen bei der Lehre in Schulen und Grundvorlesungen positiv gestimmt und von der Wirksamkeit überzeugt.

6. Literatur

- Chasteen, S. V., Pollock, S. J., Sabella, M., Henderson, C. & Singh, C. (2009). A Research-Based Approach to Assessing Student Learning Issues in Upper-Division Electricity & Magnetism. In AIP Conference Proceedings (S. 7–10). AIP.
- Engelmann, P. (2019). Fächerübergreifende Naturwissenschaften in der Lehrerfortbildung: eine Didaktische Rekonstruktion. Dissertation, Friedrich-Schiller-Universität Jena.
- Girwidz, R. & Berger, R. (2011). Elementarisierung. In: Wiesner, H., Schecker, H. & Hopf, M. (Hg.). (2017). Physikdidaktik kompakt (3. Auflage). Aulis Verlag, 72-77
- Goldhaber, S., Pollock, S., Dubson, M., Beale, P., Perkins, K., Sabella, M., Henderson, C. & Singh, C. (2009). Transforming Upper-Division Quantum Mechanics: Learning Goals and Assessment. In AIP Conference Proceedings (S. 145–148). AIP.
- Hardy, L. (1993). Nonlocality for two particles without inequalities for almost all entangled states. *Physical Review Letters*, 71(11), 1665–1668.
- Hugener, I., Pauli, C. & Reusser, K. (2007). Inszenierungsmuster, kognitive Aktivierung und Leistung im Mathematikunterricht. Analysen aus der schweizerisch-deutschen Videostudie. In D. Lemmermöhle, M. Rothgangel, S. Bögeholz, M. Hasselhorn, R. Watermann (Hrsg.), *Professionell Lehren - Erfolgreich Lernen* (S. 109-121). Münster: Waxmann.
- Janßen, W. & Pospiech, G. (2016). Formeln physikalisch interpretieren und verstehen Methoden und Anregungen für den Unterricht. *Naturwissenschaften im Unterricht. Physik*, 27(153/154), 51–55.
- John, T. & Staraschek, E. (2017). Kumulatives Physiklehren und -lernen im Lehramtsstudium - Evaluation eines Lehrkonzepts. In C. Maurer (Ed.), *Qualitätvoller Chemie- und Physikunter-*

- richt - normative und empirische Dimensionen, 33, 150–153.
- Kattmann, U. & Duit, R. (1997). Das Modell der didaktischen Rekonstruktion. Zur Didaktik der Physik und Chemie, Tagung 1996, 122–124.
- Kircher, E. (2015). Elementarisierung und didaktische Reduktion. In: Kircher, E., Girwidz, R. & Häußler, P. (Hg.). Springer-Lehrbuch. Physikdidaktik: Theorie und Praxis (3. Aufl.) (S. 107–140). Springer Spektrum.
- Krey, O. & Schwanewedel, J. (2018). Lernen mit externen Repräsentationen. In D. Krüger, I. Parchmann & H. Schecker (Hg.), Theorien in der naturwissenschaftsdidaktischen Forschung (S. 159–175). Springer Berlin Heidelberg.
- Leuders, T. & Holzäpfel, L. (2011). Kognitive Aktivierung im Mathematikunterricht. Unterrichtswissenschaft, 39(3), 213–230.
- Mazur, E. (2017). Peer Instruction: Interaktive Lehre praktisch umgesetzt (G. Kurz & U. Harten, Hg.). Springer Spektrum.
- Mazur, E. & Hilborn, R. C. (1997). Peer Instruction: A User's Manual. *Physics Today*, 50(4), 68–69.
- Pollock, S. J., Chasteen, S. V., Dubson, M., Perkins, K. K., Singh, C., Sabella, M. & Rebello, S. (2010). The use of concept tests and peer instruction in upper-division physics. In AIP Conference Proceedings (S. 261–264). AIP.
- Renkl, A. (2002). Worked-out examples: instructional explanations support learning by self-explanations. *Learning and Instruction*, 12(5), 529–556.
- Renkl, A. & Schworn, S. (2002). Lernen, mit Lösungsbeispielen zu lehren. Beltz.
- Rubitzko, T., Laukenmann, M. & Starauschek, E. (2018). Kumulatives Lehren der Mechanik in der Lehramtsausbildung. Didaktik der Physik Frühjahrstagung Würzburg 2018. PhyDid B.
- Schnotz, W. & Bannert, M. (1999). Einflüsse der Visualisierungsform auf die Konstruktion mentaler Modelle beim Text- und Bildverstehen. *Experimental Psychology*, 46(3), 217–236.
- Springer, L., Stanne, M. E. & Donovan, S. S. (1999). Effects of Small-Group Learning on Undergraduates in Science, Mathematics, Engineering, and Technology: A Meta-Analysis. *Review of Educational Research*, 69(1), 21–51.
- Sweller, J., van Merriënboer, J. J. G. & Paas, F. G. W. C. (1998). *Educational Psychology Review*, 10(3), 251–296.