

Die Quantenphysik im Spannungsfeld zwischen Fachlichkeit, empirischer Forschung und Schulpraxis

Die Quantenphysik ist ein Teilgebiet der Physik, das für die Fachdidaktik schon immer besondere Herausforderungen bereithielt. Dies hat mehrere Gründe. Erstens ist sie unbestritten eines der fachlich schwierigeren Gebiete der Physik; in ihrem Abstraktionsgrad vielleicht nur noch von der Thermodynamik übertroffen. Zweitens galt sie über viele Jahrzehnte als in wesentlichen Teilen begrifflich unverstanden, und zwar gerade in den Bereichen (wie z. B. dem Messprozess), die für eine Auseinandersetzung in der Schule besonders interessant sind. Und schließlich ist die Anbindung an die Erfahrungswelt der Schülerinnen und Schüler schwierig: Es fehlen anschauliche Erfahrungen aus dem Alltag, an die man anknüpfen könnte, und quantenmechanische Experimente für die Schule sind rar, weil sie in der Regel ein Vakuum oder tiefe Temperaturen erfordern. Trotz dieser pessimistischen Zustandsbeschreibung besteht jedoch Anlass zu Hoffnung. Wie im vorliegenden Beitrag dargelegt werden soll, befindet sich die Didaktik der Quantenphysik gerade in einer Umbruchsituation, in der durch das neue Paradigma der Quanteninformation viele der beschriebenen Probleme gelindert werden können.

Ausgangspositionen

Ein bis heute ungelöstes fachdidaktisches Problem besteht darin, dass keine Einigkeit darüber erzielt werden konnte, welches die Inhalte und Kompetenzen sein sollten, die im Quantenphysik-Unterricht der Oberstufe vermittelt werden sollen (zur Legitimation des Quantenphysik-Unterrichts vgl. Müller, 2016). In den veröffentlichten Unterrichtsvorschlägen lassen sich im Wesentlichen vier verschiedene Zugangstypen identifizieren (vgl. Müller, 2003):

(1) *Historischer Zugang*. Hier ist hauptsächlich der „traditionelle Quantenphysik-Unterricht“ zu nennen, der sich über viele Jahre in der Schulpraxis tradiert hat und auf historischen Experimenten wie dem Photoeffekt aufbaut.

(2) *Konzentration auf die Prinzipien des quantenmechanischen Formalismus*. Der von Feynman (1992) vorgestellte Zeigerformalismus hat mehrere Versuche nach sich gezogen, diesen relativ einfach handhabbaren Formalismus auch für die Schule nutzbar zu machen (Küblbeck, 1997, Schön & Werner, 1998, Gehrman & Rode, 1999). Auch das Berliner Unterrichtskonzept (Fischler & Lichtfeldt, 1994), das einen „Minimalzugang“ zur Quantenphysik bereitstellen will, ist am ehesten in diese Kategorie einzuordnen.

(3) *Quantenmechanik als Kontext*. Hier wird die Quantenmechanik in Kontexten, z. B. aus Technik oder Chemie, betrachtet. Zu nennen ist in diesem Zusammenhang vor allem das Visual Quantum Mechanics Project von Zollman (Zollman, Rebello & Hogg, 2002). Auch das Bremer Unterrichtskonzept (Niedderer, 1992), das einen starken Bezug zu Atommodellen und damit zur Chemie herstellt, fällt in diese Kategorie.

(4) *Beschäftigung mit den begrifflichen Fragen der Quantenphysik*. Schließlich kann man in einem Unterrichtsgang zur Quantenphysik das Augenmerk auf die Interpretationsfragen legen – ein Unterfangen, das dadurch erschwert wird, dass die Interpretation der Quantenphysik auch in der Fachphysik noch heftig und kontrovers diskutiert wird. Hier setzt das Münchener Unterrichtskonzept (milq) an, dessen Entwicklung in den vergangenen fast 20 Jahren im Folgenden nachgezeichnet werden soll.

milq – Stationen eines Unterrichtskonzepts

Das milq-Konzept wurde seit Mitte der 1990er Jahre in München entwickelt und später an verschiedenen Standorten weiterentwickelt. Im Sinne eines Design-Based-Research-Ansatzes wurde es in verschiedenen Zyklen immer wieder neu überarbeitet und empirisch erprobt. Mit seiner Entstehung verknüpfte Namen sind Wiesner, Müller und Schorn in München, Engelhardt in Frankfurt, Küblbeck in Ludwigsburg, Dammaschke und Strahl in Braunschweig. Im milq-Konzept stehen die begrifflichen Fragen der Quantenphysik im Mittelpunkt. Den Schülerinnen und Schülern soll die Möglichkeit gegeben werden, sich mit dem Weltbild der modernen Physik auseinanderzusetzen. Das Konzept bezieht sich damit auf das Legitimationsargument für Physikunterricht, das im BLK-Gutachten von 1997 ausgesprochen wird: *„[Die] naturwissenschaftlichen Fächer [beziehen] ihre Daseinsberechtigung aus dem Umstand, dass sie unterschiedliche, wechselseitig nicht ersetzbare Wege des Weltverstehens ermöglichen. [...] Die Physik hat wie keine andere Naturwissenschaft unsere Vorstellung von der Welt beeinflusst, [...] von dem, was ‚die Welt zusammenhält‘“* (BLK, 1997). Dieser Grundansatz – eine wesentliche Aufgabe des Physikunterrichts darin zu sehen, die Begegnung mit der Physik als einer kulturellen Errungenschaft, die unser Verständnis der Welt prägt, zu ermöglichen – ist allen der folgenden Ausprägungen und Stationen gemeinsam, die das Konzept im Laufe der Zeit erfahren hat.

Station 1: Das Münchener Unterrichtskonzept zur Quantenphysik

Aus heutiger Perspektive ist es nötig, darauf hinzuweisen, dass die Entwicklung des Münchener Unterrichtskonzepts unter dem Paradigma der fachdidaktischen Forschung zu *Schülervorstellungen* stattfand. Das bedeutet: Im Vordergrund stand nicht allein der Gedanke des Kompetenzerwerbs (der natürlich auch immer angestrebt wurde), sondern die Auseinandersetzung mit den Vorstellungen, die die Schülerinnen und Schüler in den Unterricht bereits mitbringen und die durch den Unterricht in Richtung auf physikalisch angemessene Vorstellungen verändert werden sollen. Es liegt auf der Hand, dass Schülerinnen und Schüler aus ihrem Alltag keine Erfahrungen mit Quantenobjekten mitbringen und dass ihr Weltbild weitgehend von der klassischen Physik geprägt ist. Im Münchener Unterrichtskonzept (Müller & Wiesner, 2002) werden daher diejenigen Aspekte der Quantenphysik herausgestellt, die gegenüber diesen klassischen Vorstellungen das „ganz Neue“ darstellen (z. B. das inhärent statistische und nichtdeterministische Verhalten von Quantenobjekten und das Nichtbesitzen von klassisch wohlbestimmten Eigenschaften wie Ort und Bahn).

Im Einklang damit wurde bei der Entwicklung des Konzepts großer Wert darauf gelegt, eine klare Deutung der Quantenphysik zu vermitteln. Begriffliche Klarheit stand im Vordergrund – schon allein deshalb, weil die Vermittlung quantenmechanisch adäquater Vorstellungen unter weitgehendem Verzicht auf den mathematischen Formalismus erfolgen muss. Die Leitlinien des Münchener Unterrichtskonzepts waren die folgenden:

- Es wird von bekannten Schülervorstellungen ausgegangen.
- Es werden Begriffe zur Verfügung gestellt werden, die ein qualitatives Verständnis der neuartigen Phänomene ermöglichen (z. B. Präparation von Eigenschaften).
- Es wird mit Simulationsprogrammen zu prototypischen Experimenten der Quantenphysik (Doppelspalt, Mach-Zehnder-Interferometer) gearbeitet.

Anlage und Evaluation des Münchener Unterrichtskonzepts sind in (Müller, 2003) umfassend dokumentiert. An dieser Stelle soll deshalb nur ein kurzer Überblick gegeben werden. Kernstück des Unterrichtskonzepts ist der qualitative Basiskurs, in dem die Grundprinzipien der Quantenmechanik anhand von interaktiven Simulationen vermittelt werden, die den Schülerinnen und Schülern auf ihren Computern zur Verfügung stehen.



Abb. 1: Aufbau des qualitativen Basiskurses

Im Sinne einer didaktischen Spirale werden die Grundprinzipien der Quantenphysik zweimal auf sich steigendem begrifflichen Niveau durchlaufen (Abb. 1): zuerst mit Photonen im Mach-Zehnder-Interferometer, dann noch einmal mit Elektronen im Doppelspaltexperiment. Darauf aufbauend enthält der etwa 100-seitige Schülertext einen quantitativen Aufbaukurs, der für Leistungskurse gedacht war und der eine erste Einführung in die Grundzüge des quantenmechanischen Formalismus enthält. Dieser Teil des Konzepts wurde später nicht weiterverfolgt.

Um die Verbreitung des Unterrichtskonzepts zu erleichtern, wurde mit „milq“ eine umfangreiche Internetseite geschaffen, auf der die Materialien und die Simulationsprogramme zur Verfügung gestellt werden sowie eine „Führung“ durch den Kurs angeboten wird, bei der an zahlreichen Stellen durch ergänzende Links Hinweise zu fachlichen und unterrichtlichen Aspekten gegeben werden. Das inzwischen noch weiter ausgebauten Angebot ist unter www.milq-physik.de verfügbar.

Evaluation des Münchener Unterrichtskonzepts

Die zentrale empirische Frage bei der Entwicklung eines Unterrichtskonzepts lautet: Werden die angestrebten Ziele erreicht? Im Fall der Quantenphysik ist diese Frage besonders schwierig zu beantworten, weil es – anders als in anderen Gebieten der Physik – bis heute keine gemeinsamen Standards gibt, auf die sich eine nationale oder internationale fachdidaktische Community geeinigt hätte. Es sind also selbstgesteckte Ziele, die in der Evaluation geprüft werden, und damit wird der Vergleich mit anderen Zugängen schwierig. Natürlich lässt sich mit qualitativen oder quantitativen Methoden feststellen, ob ein Erwerb von Wissen, Kompetenzen oder Vorstellungen stattgefunden hat. Dies ist aber eine recht banale Feststellung: Unterricht, der ganz ohne Wirkung auf die Lernenden bleibt, erscheint nur schwer vorstellbar. Das Ausmaß des Wissens-, Vorstellungs- oder Kompetenzerwerbs

soll also quantifiziert werden, und dies bedeutet immer Vergleichen – entweder mit einem akzeptierten Standard oder mit einer Vergleichsgruppe. Da es in der Quantenphysik keinen akzeptierten Standard gibt und im vorliegenden Fall jede Vergleichsgruppe nach anderen Zielsetzungen unterrichtet wurde, erscheint die Situation schwierig. Allenfalls eine qualitative oder quantitative Experten-Einschätzung der Schülerleistungen scheint möglich.

In der Evaluation des Münchener Unterrichtskonzepts wurde ein Mix aus qualitativen und quantitativen Methoden eingesetzt, um dieser Problematik zu begegnen. Mit Schülerinnen und Schülern aus Bayern, Hessen und Baden-Württemberg, die Grund- und Leistungskurse der Jahrgangsstufe 13 besuchten, wurden folgende Untersuchungen durchgeführt (dokumentiert in Müller, 2003):

- Akzeptanzbefragungen (Teaching Experiments; N = 8)
- Interviews zu Vorstellungen über Quantenphysik (N = 23)
- Fragebogen zu Vorstellungen (N = 60)
- zusätzlich Klausurergebnisse, mündliche Noten etc.

In den Akzeptanzbefragungen, die während der Entwicklung des Konzepts stattfanden, wurde überprüft, inwieweit die Argumentation am Doppelspaltexperiment (statistisches Verhalten, Welle-Teilchen-Problematik, Nichtbesitzen der Eigenschaft Ort) für Schülerinnen und Schüler verständlich ist. Den Probanden wurden in Einzelinterviews mit Hilfe des Simulationsprogramms Erklärungen zu den genannten Themen angeboten, die sie im Anschluss wiedergeben und erläutern sollten. Die Ergebnisse waren in hohem Maße erfreulich. Ernsthafte Verständnisschwierigkeiten konnten praktisch nicht festgestellt werden. Auf eine systematische Auswertung der Befragungen wurde daher verzichtet.

In der eigentlichen Erprobungsphase, die mit zwei Grundkursen und drei Leistungskursen durchgeführt wurde, kamen teilstrukturierte Interviews, zum Einsatz, um die von den Schülerinnen und Schüler aufgebauten Vorstellungen nach Abschluss der Unterrichtseinheit qualitativ zu erfassen. Die Interviews umfassten die Themen *Wahrscheinlichkeitsdeutung*, *Atomvorstellung*, *Unbestimmtheitsrelation*, *Präparationsbegriff*, *Ortseigenschaft*, *Messpostulat* und *Überlagerungszustände*. Wie die Auswertung zeigt (Müller, 2003) konnten die Schülerinnen und Schüler zu fast allen der untersuchten Themen als gut zu bewertende quantenmechanische Argumentationen und Begründungen geben (mit einer Einschränkung im Bereich Ortseigenschaft, wo etwa ein Drittel der Probanden keine adäquate Argumentation geben konnte). Details der Auswertung mit Interviewauszügen finden sich in (Müller, 2003).

Um die Vorstellungen der Schülerinnen und Schüler auch quantitativ zu untersuchen, wurde ein Vorstellungs-Fragebogen entworfen, der nach Abschluss der Unterrichtseinheit ausgefüllt wurde. Neben Fragen mit offener Antwortmöglichkeit enthielt er Aussagen zu den Themen *Atomvorstellung*, *Determinismus*, *Eigenschaftsbegriff* und *Unbestimmtheitsrelation*, die auf einer fünfstufigen Likert-Skala von 1 (trifft ganz genau zu) bis 5 (trifft gar nicht zu) beurteilt werden sollten. Um der oben angesprochenen Problematik des fehlenden Konsenses über die Zielsetzungen des Quantenphysik-Unterrichts zu begegnen, wurden 13 von 29 der Items aus Tests *anderer* Autoren übernommen. Damit sollte sichergestellt werden, dass auch diejenigen Inhalte abgebildet werden, die von einem größeren Kreis fachdidaktischer Autoren als wesentliche Aussagen der Quantenmechanik angesehen werden. Im Einzelnen wurden Items aus Arbeiten von Ireson (Ireson, 2000) und Leisen (Leisen, 1999) übernommen, die zu den im Münchener Unterrichtskonzept behandelten Inhalten kompatibel waren.

	Versuchsgruppe	Vergleichsgruppe	Effektstärke
Atomvorstellung (6 Items)	+60,9	+40,8	0,65**
Determinismus (9 Items)	+51,6	+37,4	0,47*
Eigenschaftsbegriff (3 Items)	+71,6	+41,9	0,83***
Unbestimmtheitsrelation (10 Items)	+51,5	+30,2	0,92***
Gesamtindex (29 Items)	+55,8	+35,2	0,97***

Tabelle 1: Ergebnisse des Vorstellungsfragebogens für Versuchsgruppe und studentische Vergleichsgruppe

Wie weit die Ansichten über die in der Quantenphysik zu vermittelnden Inhalte dennoch auseinandergehen, zeigt der Vergleich mit dem mehrere Jahre später entwickelten „Quantum Mechanics Conceptual Survey“ (McKagan, Perkins & Wiemann, 2010), der auf völlig andere Aspekte der Quantenphysik (wie den Verlauf von Wellenfunktionen oder Energieniveaus) eingeht. Zwischen diesem Test und dem milq-Vorstellungsfragebogen existiert nur eine sehr geringe Schnittmenge an vergleichbaren Items.

Der Vorstellungsfragebogen wurde von 60 Schülerinnen und Schülern aus Bayern, Hessen und Baden-Württemberg der Jahrgangsstufe 13 (GK und LK) ausgefüllt, die nach dem Münchener Unterrichtskonzept unterrichtet worden waren. Aus den insgesamt 29 Items des Fragebogens wurden vier Indizes gebildet, entsprechend den vier genannten Themenbereichen. Zusätzlich wurde durch Mittelung über alle 29 Items ein Gesamtindex berechnet, der die quantenmechanische Adäquatheit der Vorstellungen der Schülerinnen und Schüler mit einer einzigen Zahl erfassen und so ein Beurteilungskriterium für den Erfolg des Unterrichtskonzepts darstellen soll (Details in Müller, 2003). Sowohl der Gesamtindex als auch die Teilindizes wurden so skaliert, dass der Wert +100 für vollkommen adäquate quantenmechanische Vorstellungen steht, während –100 für gänzlich inadäquate Vorstellungen steht. In der Auswertung ergab sich für den Mittelwert des Gesamtindex für die untersuchte Schülergruppe ein Wert von +55,8 mit einer Standardabweichung von 19,5. Ein solch hoher Wert kann als Anzeichen dafür interpretieren werden, dass die Schülerinnen und Schüler im Verlauf des Unterrichtes erfolgreich die erwünschten quantenmechanischen Vorstellungen aufgebaut haben.

Trotz der nun schon mehrfach angesprochenen Vergleichbarkeitsproblematik wurde zur quantitativen Einschätzung der im Unterricht erzielten Resultate die Versuchsgruppe mit einer Gruppe von „Lernenden mit guten Physikkenntnissen“ verglichen. Dabei handelte sich um 35 Studierende der LMU München (hauptsächlich Diplomstudiengang Physik), die die Vorlesung Physik II besuchten, noch keine universitäre Quantenphysik gehört hatten und in der Schule Physik in Grund- oder Leistungskurs besucht hatten. Es handelte es sich somit um eine selektierte Gruppe, bei denen man zumindest nicht unterdurchschnittliche Leistungen erwarten konnte. Die Vorstellungen dieser Gruppe wurden mit denen der nach dem Münchener Unterrichtskonzept unterrichteten Schülerinnen und Schüler verglichen. Der Mittelwert des Vorstellungs-Gesamtindex lag in dieser Vergleichsgruppe bei +35,2, also um 20,6 Punkte niedriger als bei der Erprobungsgruppe. Der Unterschied ist statistisch höchst signifikant ($p < 0,1\%$). Die Effektstärke d beträgt 0,97; es handelt sich also um einen ausgesprochen großen Effekt. Auch die Unterschiede in den Einzelbereichen sind durchweg signifikant bis höchst signifikant mit mittleren bis großen Effektstärken (Tabelle 1).

Station 2: Wesenszüge der Quantenphysik

Eine nächste Entwicklungsstufe des milq-Konzepts war die Formulierung der „Wesenszüge der Quantenphysik“. Josef Küblbeck wies aus der Praxis des Umgangs mit milq darauf hin, dass es vorteilhaft wäre, den Schülerinnen und Schülern die Kernaussagen des Konzepts in prägnanter Form – gewissermaßen als Merksätze – zur Verfügung zu stellen. Küblbeck und Müller identifizierten daraufhin die folgenden vier Wesenszüge, die dem milq-Konzept zugrunde liegen und die nach unserer Auffassung auch tatsächlich das „Wesentliche“ der Quantenmechanik wiedergeben (Küblbeck & Müller, 2002):

- *Wesenszug 1 (Statistisches Verhalten)*: In der Quantenmechanik sind im Allgemeinen nur statistische Vorhersagen möglich.
- *Wesenszug 2 (Fähigkeit zur Interferenz)*: Einzelne Quantenobjekte können zu einem Interferenzmuster beitragen, wenn es für das Versuchsergebnis mehr als eine klassisch denkbare Möglichkeit gibt. Keine dieser Möglichkeiten wird dann im klassischen Sinn „realisiert“.
- *Wesenszug 3 (Eindeutige Messergebnisse)*: Auch wenn ein Quantenobjekt in einem Zustand keinen festen Wert der gemessenen Größe hat, findet man immer ein eindeutiges Messergebnis (dies ist das Messpostulat der Quantenmechanik).
- *Wesenszug 4 (Komplementarität)*: Beispielhafte Formulierungen sind: „Welcher Weg-Information und Interferenzmuster schließen sich aus“ oder „Quantenobjekte können nicht auf Ort und Impuls gleichzeitig präpariert werden.“

Nicht im milq-Konzept integriert, aber aus heutiger Sicht ebenfalls „wesentlich“ in der Quantenmechanik ist das Auftreten von verschränkten Quantenzuständen bei Systemen aus mehreren Quantenobjekten. In neueren didaktischen Konzeptionen, die die Quantenphysik über den Aspekt der Quanteninformation erschließen wollen, ist die Verschränkung von zentraler Bedeutung.

Station 3: Milq in der 10. Jahrgangsstufe

Seit 2004 ist das Thema „Wellenlehre und Einblick in die Quantenphysik“ im bayerischen Lehrplan für Gymnasien in der Jahrgangsstufe 10 verankert. Als Reaktion auf diese Neuerung wurde eine Abwandlung des milq-Konzepts für diese Jahrgangsstufe von Bernadette Schorn an der Universität München entwickelt und umfassend evaluiert (Wiesner & Schorn, 2015; Schorn, 2015). Das Ziel war, den Schülerinnen und Schülern der Sekundarstufe I erste Einblicke in die Unterschiede zwischen klassischer und Quantenphysik zu vermitteln. Im Mittelpunkt stand dabei der quantenmechanische Eigenschaftsbegriff, und zwar speziell die Einsicht, dass man Quantenobjekten nicht permanent (unabhängig von einer Messung) klassisch wohldefinierte Eigenschaften wie Ort oder Geschwindigkeit zuordnen kann.

Da in der Sekundarstufe I die Wellenlehre noch nicht vorausgesetzt werden kann, wird vor der Quantenphysik eine kurze Einführung in dieses Thema gegeben. Die Unterrichtseinheit von Schorn folgt damit der folgenden Gliederung: Wellen – Doppelspaltexperiment – Messen und Besitzen von Eigenschaften – Unbestimmtheitsrelation.

Der Kurs wurde an fünf bayerischen Gymnasien mit insgesamt 351 Schülerinnen und Schülern im Alter von 15 bis 18 Jahren evaluiert. Dabei wurden Fragebögen (Wissenstests sowie Fragen zu Interessantheit und Verständlichkeit der Inhalte) und Interviews eingesetzt (Schorn, 2015). Wegen der mangelnden Vergleichbarkeit wurde auf ein Kontrollgruppendesign verzichtet. Die Vorkenntnisse der Schülerinnen und Schüler wurden in einem Vortest erhoben; während des Kurses wurden in regelmäßigen Abständen insgesamt fünf Fragebögen mit inhaltlichen Fragen zu den behandelten Themen bearbeitet. Im letzten

Fragebogen sowie in den Interviews, die sich an die Unterrichtseinheit anschlossen, wurden Wissensdaten über die behandelten Themen, Interesse und Einschätzung des eigenen Lernerfolgs erhoben. Fünf Monate nach dem Unterricht wurde ein unangekündigter Nachtest durchgeführt.

Die Untersuchungsergebnisse sind erfreulich: Im Wissenstest erreichten die Schülerinnen und Schüler im Durchschnitt 73% der Höchstpunktzahl (und immerhin noch 56% im Nachtest). Bei der Beurteilung von Interessantheit und Verständlichkeit der Unterrichtseinheit wurden mittlere bis leicht positive Werte erreicht (Schorn, 2015).

Station 4: Schülerprogramm zur Quantenreflexion (SPQR)

In den zuvor dargestellten Entwicklungsstationen war das milq-Konzept in der Hauptsache an den Inhalten, also an der didaktisch rekonstruierten Sachstruktur der Quantenphysik, orientiert. Methodische Aspekte blieben fast völlig außer Acht. Deshalb sollte in einem weiteren Schritt auch dieser Bereich didaktisch einbezogen werden. Das „Schülerprogramm zur Quantenreflexion (SPQR)“, das von Thomas Dammaschke seit 2010 an der TU Braunschweig entwickelt wurde, verfolgte zwei Zielsetzungen: (1) *Schulpraktische Anpassung*: Die Inhalte von milq sollten an die Erfordernisse des niedersächsischen Kerncurriculums und der EPA angepasst werden. (2) *Methodische Anreicherung*: Das Augenmerk wurde stärker als bisher auf methodische Aspekte gelegt. Die Unterrichtseinheit wurde als Blended E-Learning mit Partnerarbeit und Plenumsphasen konzipiert und im Unterricht erprobt. Die Materialien zum Unterrichtskonzept sind auf der milq-Plattform abrufbar.

Die Schülerinnen und Schüler arbeiteten in der Unterrichtseinheit selbständig und in Partnerarbeit am Computer. In einzeln einsetzbaren Modulen setzten sie sich mit strukturierten Online-Aufgaben auseinander, oft im Umgang mit Simulationsprogrammen. Dabei wurden Merksätze, gestufte Hilfen und Anregungen zu Selbstevaluation zur Verfügung gestellt. Die erarbeiteten Ergebnisse wurden in Plenumsphasen vorgestellt und diskutiert. Lernprodukt der Unterrichtseinheit war ein individuelles Quanten-Portfolio.

An der Evaluation des Konzepts nahmen insgesamt 110 Schülerinnen und Schüler aus Braunschweiger Gymnasien teil, davon 3 Kurse auf erhöhtem Niveau (N=60) in der Erprobungsgruppe und 3 Kurse (gemischt, N=50) in der traditionell unterrichteten Kontrollgruppe. Untersucht wurden die quantenmechanischen Vorstellungen der Schülerinnen und Schüler (milq-Vorstellungsfragebogen), die intrinsische Motivation (KIM, Kurztest intrinsische Motivation (Wilde et al., 2009)) sowie die Selbstwirksamkeitserwartung (Schwarzer & Jerusalem, 1999). In keiner der untersuchten Variablen konnte ein signifikanter Unterschied zwischen Erprobungs- und Kontrollgruppe festgestellt werden. Offenbar ist diese Variante des milq-Konzepts dem traditionellen Unterricht weder in Bezug auf Motivation noch auf Lernerfolg überlegen.

Reflexion: Cognitive Load

Treten wir an dieser Stelle zurück und reflektieren das letzte Ergebnis. In SPQR wurde ein inhaltlich vielfach erfolgreich erprobtes Konzept um methodische Aspekte angereichert, die – nach allem was wir zu wissen glauben – lernförderlich sein sollten. Es mutet schon überraschend an, wenn die Kombination aus beidem sich empirisch als *nicht* erfolgreicher erweist als traditioneller Unterricht.

Aus einer umfassenderen Perspektive ergibt sich ein differenzierteres Bild. Der Befund steht nämlich nicht alleine. In einer ganzen Reihe von (wegen mangelnden Erfolgs oft unveröffentlichten) Untersuchungen ist zu beobachten, dass die Hinzunahme intuitiv hilf-

reicher und pädagogisch begründeter methodischer Maßnahmen den Lernerfolg nicht im erwarteten Ausmaß steigert. Man muss dazu nicht nur auf die in Teilen doch überraschenden Ergebnisse der Hattie-Studie verweisen. Allein in der Braunschweiger Arbeitsgruppe zeigte sich ein solcher Effekt in mehreren Untersuchungen (meist Masterarbeiten): neben SPQR bei bestimmten Arten von kontextorientierten Aufgaben sowie beim Einsatz unterstützender Zusatzfragen beim Aufgabenlösen.

Auffallend ist, dass sich in den erwähnten Studien ein gemeinsames Muster finden lässt: Zwei Maßnahmen, die jeweils für sich genommen vorteilhaft sind, wirken nachteilig, wenn sie kombiniert werden. Es gilt gleichsam: „Gut + gut = schlecht“. In dieser Gemeinsamkeit der empirischen Befunde scheint sich ein allgemeiner Zusammenhang abzuzeichnen.

Nach meiner Meinung liefern die psychologischen Theorien von Cognitive Load und begrenztem Arbeitsgedächtnis einen vielversprechenden Rahmen zur Interpretation dieses allgemeinen Zusammenhangs. Nach der Cognitive Load Theory (Sweller 1994; Schnotz & Kürschner, 2007) wird der Wissenserwerb durch die begrenzte Kapazität des Arbeitsgedächtnisses bei der Informationsverarbeitung und -speicherung behindert. Diese Begrenzung der Arbeitsgedächtnis-Kapazität ist schon in den 1950er Jahren durch eine Arbeit von Miller (Miller, 1956) als „magical number seven“ bekannt geworden (die Zahl der unabhängigen Informationseinheiten, die man kurzzeitig gleichzeitig im Gedächtnis behalten kann). In unserem Zusammenhang, in dem es weniger um Speicherung als um Verarbeitung von Information geht, ist die Metapher der Bälle, die ein Jongleur gleichzeitig in der Luft halten kann, treffender. Während er wenige Bälle mit Leichtigkeit in der Luft halten kann, misslingt die gesamte Aufgabe, wenn er mit zu vielen Bällen gleichzeitig umgehen muss. Eine analoge Situation liegt in einer Unterrichtssituation vor, in der z. B. eine Aufgabe gelöst werden soll. Die Schwierigkeit der eigentlichen Aufgabe erzeugt eine gewisse kognitive Belastung (Intrinsic Cognitive Load). Andere Faktoren, die hinzukommen, erzeugen eine zusätzliche kognitive Belastung (Extrinsic Cognitive Load). Übersteigt die Summe aus beiden einen individuellen Grenzwert, kann die Aufgabe nicht mehr gelöst werden.

Im fachdidaktischen Zusammenhang kann die extrinsische kognitive Belastung auf eine Vielzahl von Faktoren zurückgehen, insbesondere auch – und das ist der zentrale Punkt – auf „eigentlich vorteilhafte“ Faktoren: Unterstützende Hinweise zur Metakognition beim Lösen von Aufgaben können ebenso dazugehören wie authentizitätserzeugende zusätzliche Informationen in kontextorientierten Zugängen. Insbesondere moderne kompetenzorientierte Methoden erzeugen erhebliche extrinsische kognitive Belastung, weil dabei ein hohes Maß an Selbstorganisation und Kommunikation mit Mitschülern erforderlich ist.

Die Cognitive Load Theory erscheint in diesem Licht als eine Rahmentheorie, die – ähnlich wie die spezielle Relativitätstheorie in der Fachphysik – Grenzen und Leitlinien für die fachdidaktische Forschungs- und Entwicklungsarbeit vorgibt (für einen verwandten Ansatz vgl. (Redish, 2014)). Damit stünde ein theoriegeleiteter Ansatz für Untersuchungen offen. Generell rücken in diesem Paradigma nichtlineare Effekte, wie Sättigungs- oder Schwelleneffekte, die im fachdidaktischen Denken bisher keine große Rolle spielen, stärker ins Zentrum des Interesses. Auch Entwicklungseffekte (Lernen) können beschrieben werden. Durch Routinebildung können Schemata erlernt werden, so dass z. B. das Auflösen einer quadratischen Gleichung oder das Anwenden des Energiesatzes für einen geübten Problemlöser weniger kognitive Belastung erzeugt als für einen Anfänger. Dieser Prozess wird als „Chunking“ bezeichnet (Miller, 1956). Dieser Mechanismus betont noch einmal die im Physikunterricht allzusehr vernachlässigte Rolle des Übens und der Routinebildung.

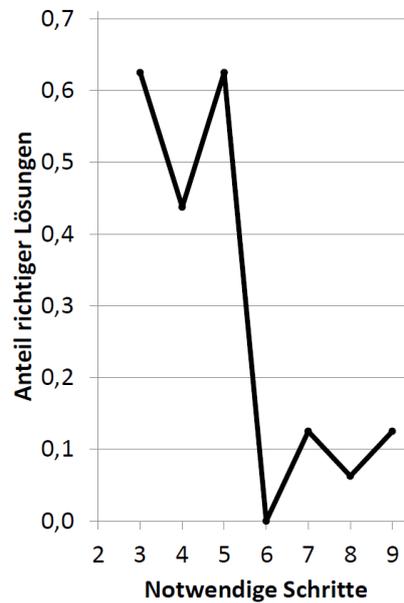


Abb. 2: Einfluss der Komplexität beim Lösen von Physikaufgaben: Häufigkeit richtiger Lösungen in Abhängigkeit von der Zahl der notwendigen Lösungsschritte

Eine Vorhersage des Cognitive-Load-Ansatzes ist etwa das Folgende: Wenn man sich für Zugänge mit hoher extrinsischer kognitiver Belastung entscheidet (z. B. weil man kompetenzorientiert oder in authentischen Kontexten unterrichten möchte), so sollte die intrinsische kognitive Belastung so niedrig wie möglich gehalten werden. Einfach ausgedrückt: Kontext- oder kompetenzorientierter Unterricht sollte dann am besten funktionieren, wenn die zugrundeliegende Aufgabe sehr einfach ist. Bezeichnenderweise liegen z. B. der Studie, die im Bereich der kontextorientierten Aufgaben die höchsten Lernerfolge vorweisen konnte (Kuhn, 2010), äußerst einfache Aufgabenstellungen zugrunde.

Einen ganz ähnlichen Ansatz wie den hier geschilderten verfolgten Johnstone und El-Banna bereits 1986 in der Chemiedidaktik (Johnstone & El-Banna, 1986). Ihre empirische Studie wurde in einer Masterarbeit in die Physikdidaktik übertragen (Stindt, Strahl & Müller, 2014). In einer Untersuchung mit 16 Lehramtsstudierenden wurde der Einfluss der begrenzten Kapazität des Arbeitsgedächtnisses auf den Erfolg beim Lösen physikalischer Aufgaben ermittelt. Die Studierenden bearbeiteten mehrere Aufgaben unterschiedlicher Komplexität. Ermittelt wurde die Anzahl der richtigen Lösungen in Abhängigkeit von der Komplexität der Aufgabe. Als einfachst denkbare Maß für die Komplexität wurde die Zahl der Lösungsschritte Z gewählt. Trotz dieses denkbar kruden Komplexitätsmaßes ist das Ergebnis aufschlussreich (Abb. 2): Während bei geringer Komplexität die Lösewahrscheinlichkeit relativ hoch ist (50%–60%), bricht sie bei Erreichen einer gewissen Schwelle ($Z = 6$) drastisch ein und liegt darüber nur bei ca. 10%. Das bedeutet: Schon kleine Veränderungen der Komplexität einer Aufgabe können ihre Lösungswahrscheinlichkeit drastisch verändern. Die Existenz solcher Schwelleneffekte ist im Cognitive-Load-Paradigma auf natürliche Weise erklärbar.

Quanteninformation

Wie sieht die Zukunft in der Didaktik der Quantenphysik aus? Viele Anzeichen sprechen dafür, dass die Quanteninformation eine wesentliche Rolle spielen wird. Dabei handelt es sich um ein modernes Forschungsthema, das in der Fachwissenschaft etwa Mitte der 1990er Jahre aktuell wurde. Die Schlagworte Quantencomputer, Qubit und Quantenkryptographie haben den Weg in die breite Öffentlichkeit gefunden und tauchen immer wieder in Zeitungsartikeln und populärwissenschaftlichen Büchern auf. In Deutschland gibt es inzwischen mehrere physikdidaktische Arbeitsgruppen, die sich mit Themen aus der Quanteninformation beschäftigen. Einen guten Überblick gibt das im Januar 2016 erscheinende Themenheft „Quanteninformation“ der Zeitschrift „Praxis der Naturwissenschaften – Physik in der Schule“.

Die Methoden, Ansätze und Ergebnisse der Quanteninformation sind ein Beleg für den Paradigmenwechsel, der sich in den vergangenen drei Jahrzehnten – allmählich und daher von vielen unbemerkt – in unserer Sichtweise auf die Quantenmechanik vollzogen hat. Dabei ist die Theorie ganz unverändert geblieben, nur unsere Perspektive hat sich gewandelt.

Vor dreißig Jahren, also 1985, hätte ein beträchtlicher Teil der Experten der Aussage zugestimmt, dass grundlegende Aspekte der Quantenmechanik unverstanden seien, insbesondere der Messprozess. Das Feynman-Zitat „I think I can safely say that nobody understands quantum mechanics“ (Feynman, 1965) ist nur der berühmteste Beleg für diese Einschätzung. In der Einleitung zu einem damaligen Standardwerk über den quantenmechanischen Messprozess heißt es: „Why there is no textbook on the measurement side of quantum theory is clear to anyone who participates in a seminar on the subject, and even clearer to one who gives a course on it: puzzlement!“ (Wheeler & Zurek, 1983). Auch waren Begriffe wie Verschränkung oder Bell'sche Ungleichung zwar geläufig, galten aber als randständige Themen, mit denen sich am ehesten Philosophen und Esoteriker beschäftigten.

Diese Situation hat sich gründlich geändert. Sowohl experimentelle als auch begriffliche Fortschritte haben dazu geführt, dass die Effekte, die früher als irritierend und geheimnisvoll angesehen wurden, heutzutage nicht nur als verstanden gelten, sondern sogar in technischen Anwendungen genutzt werden. Einsteins „spukhafte Fernwirkungen“ sind in ein „Ingenieurs-Stadium“ eingetreten und werden in realen, kommerziellen Geräten genutzt. In experimenteller Hinsicht waren für diese Entwicklung die Experimente mit einzelnen Quantenobjekten verantwortlich, die früher nur als Gedankenexperimente vorstellbar waren und die verstärkt seit etwa 1990 realisiert werden konnten. In begrifflicher Hinsicht haben vor allem die Theorie der Dekohärenz und die Quanteninformation zu einer veränderten Sichtweise der Quantenmechanik beigetragen.

Die Quanteninformation hat in didaktischer Hinsicht mehrere Vorzüge:

- Sie setzt direkt an den nichtklassischen Merkmalen der Quantenphysik – was für die oben genannten Ziele förderlich ist.
- Sie erfordert begrifflich saubere Formulierungen (z. B. in Bezug auf Präparation, Messung oder die Unbestimmtheitsrelation) und kann daher als fruchtbare Ausgangsbasis für die didaktische Entwicklungsarbeit dienen.
- Sie beschäftigt sich mit den einfachst denkbaren Systemen: Physikalisch wird ein Qubit durch ein quantenmechanisches Zwei-Zustands-System realisiert.
- Sie ist experimentell zugänglich. Viele Experimente basieren auf den Polarisationszuständen des Lichts, für die man weder ein Vakuum noch tiefe Temperaturen benötigt. Einzelphotonen-Detektoren sind derzeit noch teuer, aber auch hier sind vielversprechende Entwicklungen zu beobachten.

- Verzichtet man auf den Anspruch, mit einzelnen Photonen zu experimentieren, so kann man sogar mit Material experimentieren, das in jeder Schulsammlung vorhanden ist, d. h. mit optischen Bänken, Polarisationsfiltern etc. (Reisch & Franz, 2016).

Auf Hochschulebene wurde zur Quanteninformation an der TU Braunschweig von Torsten Franz das Projekt *quanth* realisiert (www.quanth-physik.de), das sich an Lehramts- und Fachstudierende richtet. Es enthält Online-Lektionen zu vier Themenbereichen: (1) Quantenphysik von Einzelsystemen (statistische Interpretation, Unschärferelation), (2) Quantenphysik von Mehrteilchensystemen (Verschränkung, Bell'sches Theorem), (3) Quantenkryptographie und (4) Quantencomputer. Insbesondere der Themenbereich Quantenkryptographie entpuppt sich dabei als vielversprechender und motivierender Inhaltsbereich – nicht zuletzt wegen der Verknüpfung mit der aktuellen Geheimdienst-Abhörproblematik. Ein erster Versuch, das Thema für den Unterricht der Jahrgangsstufe 11 aufzubereiten (in vier Einzelstunden), verlief sehr erfolgreich (Reisch & Franz, 2016).

Für die Zukunft des Quantenphysik-Unterrichts lässt sich also der folgende Ausblick geben:

- Die Quantenphysik bleibt die gleiche wie früher. Aber sie wird unter einer neuen Perspektive gesehen – der Perspektive der Quanteninformation.
- Die Quantenphysik des 21. Jahrhunderts scheint einfacher zu sein als die des 20. Jahrhunderts. Sowohl begrifflich als auch experimentell beschäftigt sie sich mit einfacheren Systemen. Statt der physikalisch komplizierten Atomphysik rücken einfachere Systeme in den Fokus, vor allem die Polarisationszustände des Lichts.
- Damit eröffnen sich neue experimentelle Möglichkeiten, die zunehmend auch finanzierbar werden.
- Im Zusammenhang mit der Quanteninformation werden neue sinnvolle und authentische Aufgabenstellungen für Schülerinnen und Schüler erkennbar – nicht mehr nur die sattsam bekannten Variationen von Photoeffekt und Franck-Hertz-Versuch. Einen Vorgeschmack (auf Universitätsniveau) bieten die „Challenges“ in den interaktiven Simulationen von Antje Kohnle an der University of St Andrews (www.st-andrews.ac.uk/physics/quvis/).
- Andere Verknüpfungen zu verwandten Fächern als bisher zeichnen sich ab. Statt der Chemie (wie bisher in der Atomphysik) werden sich künftig eher Bezüge zur Informatik (Informationsbegriff, Kryptographie) und Mathematik (Stochastik) anbieten.

Alles in allem zeichnet sich mit der Quanteninformation ein vielversprechendes Forschungs- und Entwicklungsfeld ab. Es ist zu hoffen, dass die Physikdidaktik die Herausforderung annimmt und sie in fruchtbare Angebote für den Quantenphysik-Unterricht umsetzt.

Literatur

- BLK (Bund-Länder-Kommission für Bildungsplanung und Forschungsförderung) (1997). Heft 60: Gutachten zur Vorbereitung des Programms „Steigerung der Effizienz des mathematisch-naturwissenschaftlichen Unterrichts“. Bonn: BLK. Online verfügbar unter: www.blk-bonn.de/materialien.htm.
- Feynman, R. P. (1992). *QED – die seltsame Theorie des Lichts und der Materie*. München: Piper.
- Feynman, R. P. (1965). *The Character of Physical Law*. Boston: MIT Press, S. 129.
- Fischler, H., & Lichtfeldt, M. (1994). Ein Unterrichtskonzept zur Einführung in die Quantenphysik. *Physik in der Schule* 32, 276-280.
- Gehrmann, K., Rode, M., (1999). Welcher-Weg-Information, Quantenradierer und quantenmechanisches Fundamentalprinzip – Analogieversuche für den Unterricht. *Praxis der Naturwissenschaften/Physik in der Schule*, 48 (8), 28-33.
- Ireson, G. (2000). The Quantum Understanding of Pre-University Physics Students. *Phys. Educ.* 35, 15-21.

- Johnstone, A. H., & El-Banna, H. (1986). Capacities, demands and processes – a predictive model for science education. *Education in Chemistry*, 23, S. 80-84.
- Leisen, J. (1999). Sinnstiftung und Verstehen: Motivation und Interesse als eine unterrichtspraktische Daueraufgabe. In: Brechel R. (Hrsg.): *Zur Didaktik der Physik und Chemie*, Alsbach: Leuchtturm-Verlag, 45-64.
- Küblbeck, J. (1997). *Modellbildung in der Physik*. Landesinstitut für Erziehung und Unterricht Stuttgart.
- Küblbeck, J., & Müller, R. (2002). *Die Wesenszüge der Quantenphysik – Modelle, Bilder, Experimente*. Köln: Aulis. Abrufbar unter www.quantenphysik-schule.de/literatur.htm oder www.milq-physik.de.
- Kuhn, J. (2010). Authentische Aufgaben im theoretischen Rahmen von Instruktions- und Lehr-Lern-Forschung: Effektivität und Optimierung von Ankermedien für eine neue Aufgabenkultur im Physikunterricht. Wiesbaden: Vieweg+Teubner.
- McKagan, S. B., Perkins, K. K., & Wieman, C. E. (2010). Design and validation of the Quantum Mechanics Conceptual Survey, *Phys. Rev. ST Phys. Educ. Res.* 6, 020121.
- Miller, G. A. (1956). The magical number seven, plus or minus two: some limits on our capacity for processing information. *Psychological review*, 63 (2), 81.
- Müller, R., & Wiesner, H. (2002). Teaching quantum mechanics on an introductory level. *Am. J. Phys.* 70, 200-209.
- Müller, R. (2003). *Quantenphysik in der Schule*. Berlin: Logos-Verlag.
- Müller, R. (2008). Das Münchener Unterrichtskonzept zur Quantenphysik. *Praxis der Naturwissenschaften/Physik in der Schule* 57 (6), 19-25.
- Müller, R. (2016). Legitimation des Quantenphysik-Unterrichts. *Praxis der Naturwissenschaften/Physik in der Schule (in Vorbereitung)*.
- Niedderer, H. (1992). Atomphysik mit anschaulichem Quantenmodell, in: Fischler H. (Hrsg.): *Quantenphysik in der Schule*. Kiel: IPN, 88-113.
- Schön, L., & Werner, J. (1998). Vom Licht zum Atom. In: Brechel, R. (Hrsg.): *Zur Didaktik der Physik und Chemie*. Alsbach: Leuchtturm-Verlag, 304-306.
- Redish, E. F. (2014). Oersted Lecture 2013: How should we think about how our students think?. *Am. J. Phys.* 82, 537-551.
- Reisch, C., & Franz, T. (2016). Quantenkryptographie. *Praxis der Naturwissenschaften/Physik in der Schule* 65 (1), S. 11-16.
- Schorn, B. (2015). *Quantenphysik in der Schule. Eine Unterrichtskonzeption zur Einführung in die Quantenphysik für die 10. Jahrgangsstufe*. Dissertation, TU Dresden.
- Schnotz, W., & Kürschner, C. (2007). A reconsideration of cognitive load theory. *Educational Psychology Review*, 19 (4), 469-508.
- Schwarzer, R. & Jerusalem, M. (Hrsg.) (1999). *Skalen zur Erfassung von Lehrer- und Schülermerkmalen. Dokumentation der psychometrischen Verfahren im Rahmen der Wissenschaftlichen Begleitung des Modellversuchs Selbstwirksame Schulen*. Berlin: Freie Universität Berlin.
- Stindt, F., Strahl, A., & Müller, R. (2014). Chunks in Chemie- und Physikaufgaben-Zusammenhang zwischen Gedächtniskapazität und Aufgabenkomplexität. *PhyDid B – Beiträge zur DPG-Frühjahrstagung*.
- Sweller, J. (1994). Cognitive load theory, learning difficulty, and instructional design. *Learning and Instruction*, 4 (4), 295-312.
- Wiesner, H., & Schorn, B. (2015). Das Münchener Internetprojekt – zur Lehrerfortbildung (milq) in der 10. Jahrgangsstufe, *Praxis der Naturwissenschaften/Physik in der Schule* 64 (4), 22-29.
- Wheeler, J. A., & Zurek, W. H. (1983). *Quantum theory and measurement*. Princeton: Princeton University Press.
- Wilde, M., Bätz, K., Kovaleva, A., & Urhahne, D. (2009). Überprüfung einer Kurzskala intrinsischer Motivation (KIM). *Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften*, 15, 31–45.
- Zollman, D. A., Rebello, N. S., & Hogg, K. (2002). Quantum mechanics for everyone: Hands-on activities integrated with technology. *American Journal of Physics*, 70, 252-259.