

Quantenphysik: Trends und Herausforderungen

Torsten Franz und Rainer Müller

Quantenphysik als Thema für die Schule

Quantenphysik ist die physikalische Theorie, die das Verhalten von Materie und Licht im Kleinen beschreibt. Sie erfasst die Prozesse, die bei der Bildung von Atomen, Molekülen und Festkörpern wichtig sind, ebenso wie das Verhalten von Licht und die Wechselwirkung von Licht und Materie. Die Quantenphysik ist die Grundlage unseres heutigen Verständnisses der Natur und ohne sie wären Technologien wie der auf Halbleitern basierende Computerchip, der Laser oder die verschiedenen medizinischen Anwendungen (wie das NMR) nicht denkbar.

Gleichzeitig ist die Quantenphysik ein Gebiet der Physik, auf dem auch noch in jüngerer Zeit (zumindest in den letzten 50 Jahren) grundlegende Erkenntnisse gewonnen wurden. Dies unterscheidet die Quantenphysik von den Themen der klassischen Physik (also der Mechanik und der Elektrodynamik), bei denen in den letzten hundert Jahren eher wenig neue Erkenntnisse gewonnen wurden. Insbesondere durch das Aufkommen der Quanteninformation in den letzten 30 Jahren hat sich der Blick der Wissenschaft auf die Quantenphysik gewandelt. Wo man in den Gründungsjahren der Theorie die speziellen Eigenschaften von Quantensystemen vielleicht noch als etwas „Mysteriöses“ ansah, können wir heute diese Eigenschaften praktisch nutzbar machen, um Aufgaben zu bewältigen, die mit den Mitteln der klassischen Physik nicht lösbar sind.

Im Hinblick auf die Schule stellt sich hier aber die Frage, ob und in wieweit die Quantenphysik überhaupt Thema sein sollte. Es ist zum Benutzen eines Computers ja nicht notwendig, auch nur das Prinzip einer Halbleiterdiode zu verstehen, oder das Prinzip eines Lasers, um einen CD Spieler zu bedienen. Diese Überlegungen führen aber auf die Frage, welche Aufgaben der Physikunterricht an der Schule im Bezug auf die physikalische Bildung überhaupt haben sollte. Das BLK-Gutachten, das 1997 in Reaktion auf die TIMS-Studie erstellt wurde, gibt dazu ein heute noch gültiges Argument [1]:

„Für junge Menschen, die keinen naturwissenschaftlichen Beruf wählen, ist der mathematisch-naturwissenschaftliche Unterricht in der Schule praktisch die einzige Chance zur systematischen Begegnung mit einem zentralen Teil unserer Kultur.“

Dr. Torsten Franz, Institut für Fachdidaktik der Naturwissenschaften, TU Braunschweig, E-Mail: torsten.franz@tu-braunschweig.de
Prof. Dr. Rainer Müller, Leiter der Abt. Physikdidaktik am Institut für Fachdidaktik der Naturwissenschaften, TU Braunschweig
E-Mail: rainer.mueller@tu-braunschweig.de

Gerade im Hinblick auf diesen kulturellen Aspekt scheint es hierbei wichtig, sich in der Lehre zunächst auf die Vermittlung von Übersichtswissen zu fokussieren, während die Vermittlung von Verfügungswissen eher einer möglichen weiteren Ausbildung an der Universität vorbehalten bleiben kann. Da die Schule jedoch für viele Schülerinnen und Schüler der einzige Kontakt mit dem Thema ist, sollte ein besonderes Augenmerk auf die Vermeidung von Fehlvorstellungen gelegt werden, die leider gerade bei einem in den populären Medien oft recht faktenfremd diskutierten Thema wie der Quantenphysik häufig vorkommen.

Herausforderungen beim Lernen von Quantenphysik

Die fundamentale Eigenschaft der Quantenphysik stellt gleichzeitig die größte Herausforderung beim Lernen dar: Quantenphysik ist keine klassische Physik. Da wir Menschen aus unseren Alltagserfahrungen aber nur die Gesetze der klassischen Physik kennen, muss die Quantenphysik unanschaulich bleiben. Und dies nicht, weil uns vielleicht noch keine gute Beschreibung eingefallen ist, sondern weil prinzipiell keine gute Beschreibung in klassischen Bildern existieren kann.

Der Nobelpreisträger Richard Feynman hat dies mit folgenden Worten beschrieben: „Die eigentliche Schwierigkeit ist psychologischer Natur und entsteht, wenn man sich mit der Frage quält „Wie kann das denn so sein?“, welche nur ein Ausdruck eines unkontrollierten aber vergeblichen Wunsches danach ist, es als etwas Vertrautes ansehen zu wollen.“ (im Original: „The difficulty really is psychological and exists in the perceptual torment that results from your saying to yourself „But how can it be like that?“ which is a reflection of uncontrolled but utterly vain desire to see it in terms of something familiar.“[2])

Im selben Text bespricht Feynman die Vorstellung von einem Elektron und stellt fest, dass es sich weder als Masse in einem Oszillator noch als kleiner Planet, der eine Sonne umkreist, noch als Gas oder Wolke von irgendeinem Stoff korrekt beschreiben lässt. Als Feynman dies im Jahr 1964 gesagt hat, entsprach es zwar eher seiner Sichtweise auf die Quantenphysik, aber heute wissen wir, dass diese Sichtweise korrekt ist. Seit den Arbeiten von John Bell [3] und den experimentellen Bestätigungen der Verletzung der

Bell'schen Ungleichung ist klar, dass es keine Beschreibung der Natur in vertrauten klassischen Bildern geben kann. Ein älterer Übersichtsartikel zur Bedeutung der Verschränkung ist [4], eine aktuelle Übersicht der sogenannten schlupflochfreien Realisierung findet sich in [5].

Entwicklungen in der Quantenphysik der letzten 30 Jahre

Die wohl größte praktische Entwicklung der experimentellen Quantenphysik ist die Kontrolle von Verschränkung. Während in den 1980er Jahren Verschränkung ein gänzlich unerforschtes Phänomen war, ist es heute zur Alltagstechnologie in physikalischen Laboren geworden. Einige Firmen bieten bereits Verschränkungsexperimente als Demonstrationsexperimente für Schule und Hochschule an [z.B. 6].

Die zweite große Entwicklung betrifft die Grenze zwischen klassischer und Quantenphysik. In den letzten Jahren wurden quantenphysikalische Effekte mit immer größeren, makroskopischen Massen nachgewiesen. So konnten Interferenzen am Doppelspalt mit Makromolekülen (mit mehr als 800 Atomen) nachgewiesen werden (vgl. [7]). Gleichzeitig ist die Theorie der Dekohärenz weiter entwickelt worden. Sie beschreibt, wie zufällige unkontrollierbare Wechselwirkungen dazu führen, dass Systeme ihre Quanteneigenschaften verlieren. Diese Entwicklung führt dazu, dass viele fundamentalen Fragen aus der Anfangszeit der Quantenphysik heute gut verstanden sind. Themen wie Schrödingers Katze sollten daher heute eher als historische Beispiele verstanden werden. (vgl. z.B. [8])

In der Quanteninformation gibt es zwei große Themen: Quantenkryptographie und Quantencomputer. Die Quantenkryptographie hat sich in verschiedenen Realisierungen als umsetzbar erwiesen und erste Firmen bieten auch schon einzelne Lösungen an. Jedoch scheitert eine praktische Nutzung heute noch am unpraktischen Ausbau der Kommunikationsnetze, die zum Verwenden von Quantenkryptographie deutlich umgestaltet werden müssten.

Der Quantencomputer hat andererseits in den letzten Jahren wieder viel Aufmerksamkeit erhalten, besonders nachdem kürzlich eine amerikanische Internetfirma mitgeteilt hat, einen ersten lauffähigen Quantencomputer einzusetzen (vgl. z.B. [9]). Gleichzeitig wurden in letzter Zeit einige Durchbrüche bei der Konstruktion von Bauteilen erzielt, welche die Konstruktion der nächsten Generation von Quantencomputern deutlich erleichtern könnten (z.B. [10]).

Wesenszüge der Quantenphysik

Für das Verstehen ist es wichtig, die scheinbar widersprüchlichen Aussagen der Quantenphysik in möglichst prägnante Eigenschaften zu ordnen. Ein erster Versuch einer solchen Ordnung erschien in [11] unter dem Titel „Wesenszüge der Quantenphysik“. Hierbei war das Ziel, eine Liste von Eigenschaften zu finden, die einerseits als Orientierung beim

Lernen dienen können und gleichzeitig so fundamental sind, dass sie in ihren Aussagen nicht später zurückgenommen werden müssen. In den folgenden Jahren ist die Formulierung der Wesenszüge weiter ausgeschärft wurden, so dass wir heute bei folgender Formulierung angelangt sind:

1. Statistisches Verhalten

Der vielleicht wichtigste Unterschied zur klassischen Physik zeigt gleich am ersten Wesenszug: Quantenphysik ist eine fundamental statistische Theorie. Im Allgemeinen können Einzelergebnisse von Messungen nicht vorhergesagt werden, nur in Spezialfällen ist dies möglich.

In der Quantenphysik sind die Ergebnisse von Experimenten immer die stochastischen Wahrscheinlichkeitsverteilungen verschiedener möglicher Messergebnisse. Dieses Verhalten lässt sich auch, im Gegensatz zur klassischen Physik, nicht durch reines Unwissen des Experimentators oder eine Unvollständigkeit der Beschreibung auflösen, sondern ist eine intrinsische Eigenschaft der Theorie.

2. Fähigkeit zur Interferenz

Dieses Prinzip besagt, dass Quantenobjekte zu einem Interferenzmuster beitragen können, falls es für das Eintreten eines Ergebnisses mehr als eine klassisch denkbare Möglichkeit gibt. Diesen Wesenszug kann man auch als Fähigkeit zur Superposition bezeichnen. Er zeigt, dass es in der Quantenphysik andere Möglichkeiten gibt, klassisch unterscheidbare Situationen zu realisieren. Das bedeutet auch, dass bestimmte Zuordnungen, wie „Ort“ oder „Bahn“, die bei einem klassischen Teilchen immer möglich sind, bei Quantenobjekten im Allgemeinen nicht vorgenommen werden können.

3. Messergebnisse

Das dritte Prinzip beschäftigt sich mit den möglichen Ergebnissen einer Messung. Jede Messung kommt mit einem bestimmten Bereich möglicher Messergebnisse, die durch das Spektrum des der Messung zugeordneten Operators gegeben ist. Für eine wichtige Klasse von Messungen gilt außerdem, dass eine erneute (nachfolgende) Messung derselben Eigenschaft immer das gleiche Ergebnis liefert.

Ein weiterer Aspekt des Prinzips besagt, dass es in der Quantenphysik keine Messung gibt, die alle (statistischen) Eigenschaften eines Quantensystems mit nur einem Messereignis bestimmen kann. Praktisch bedeutet dies beispielsweise, dass man den Schirm beim Doppelspaltexperiment nicht durch eine „Supermessung“ ersetzen kann, welche das vollständige Interferenzmuster schon anhand eines einzelnen Detektionsereignisses bestimmen kann.

4. Komplementarität

Dies beschreibt die Eigenschaft der Quantenphysik, dass für bestimmte Größen keine gemeinsame Zuschreibung zu individuellen Quantenobjekten möglich ist. Quantitativ

wird dieses Prinzip durch die Heisenberg'sche Unbestimmtheitsrelation ausgedrückt. Diese liefert eine Schranke für die Genauigkeit, mit der an einem Quantensystem die Größen „Ort“ und „Impuls“ gemeinsam präpariert werden können.

Neben der Präparations-Unbestimmtheit gibt es in der Quantenphysik noch weitere Unbestimmtheitsrelationen. Relevant für die Schule ist vor allem die Mess-Stör-Unbestimmtheit, die besagt, dass es nicht möglich ist, z.B. den Ort eines Quantensystems zu messen, ohne das Ergebnis einer nachfolgenden Impulsmessung zu stören.

All diese Unbestimmtheitsrelationen gelten für jeden Satz von komplementären Operatoren, nicht nur für „Ort“ und „Impuls“ eines freien Teilchens. Ein weiterer bekannter Satz von komplementären Operatoren sind die drei Komponenten des Spins oder der Polarisation.

5. Verschränkung

Der wohl entscheidende Punkt bei der Unterscheidung von klassischer und Quantenphysik bildet die Verschränkung, bzw. die Verletzung der Bell'schen Ungleichung. Diese besagt, dass es in der Quantenphysik bestimmte Zustände geben kann, deren Verhalten nicht mit den Vorstellungen einer klassischen lokalen Physik beschrieben werden kann. Solche „verschränkten“ Zustände können jedoch erst dann beobachtet werden, wenn man verschiedene räumlich getrennte Quantensysteme betrachtet.

Ein didaktisch wichtiger Punkt dieses Prinzips ist, dass man es experimentell testen kann. Während die anderen Punkte prinzipiell immer Aussagen über eine Unmöglichkeit (einer genauen Beschreibung, Präparation oder Messung) machen, welche so nicht experimentell getestet werden kann, kann die Verletzung der Bell'schen Ungleichung gezeigt werden. Gerade in jüngster Vergangenheit hat das Thema der experimentellen Überprüfung der Ungleichung wieder die Aufmerksamkeit der physikalischen Öffentlichkeit auf sich gezogen, als verschiedene Arbeitsgruppen (kurz nacheinander) die ersten schlupflochfreien Experimente vorgestellt haben (für eine Einführung in das Thema siehe [5]).

Der milq-Online Kurs

Die milq Internetseite [12] bietet eine moderne Einführung in die Quantenphysik, die sich didaktisch an bestehenden Schülervorstellungen orientiert und eine große begriffliche Klarheit bietet. Das Kernstück der Seite bildet der milq-Lehrgang mit 13 Kapiteln, welche die Grundzüge der Quantenphysik am Beispiel von Photonen und Elektronen erklärt. Hierbei ist es Teil des Konzeptes, wenige zentrale Experimente und Kernprinzipien zu besprechen um eine möglichst klare Sprache von vornherein zu etablieren (vgl. [13]).

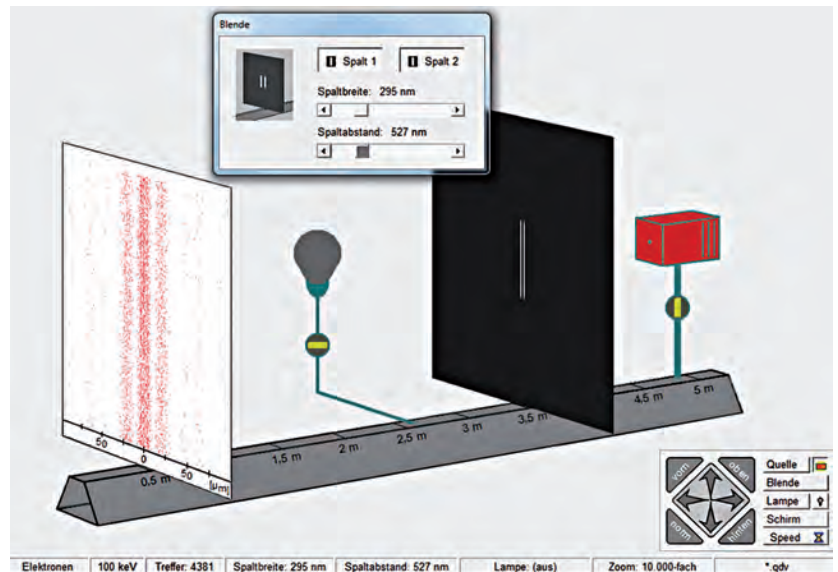


Abb. 1: Mit dem Doppelspaltexperiment lassen sich die Wesenszüge der Quantenphysik nachvollziehen.

Teil des Kurses sind Bildschirmexperimente zum Doppelspalt und zum Mach-Zehnder Interferometer, an denen das Verhalten von Quantensystemen nachvollzogen werden kann. Der Kurs wird ergänzt durch einen ausgearbeiteten Unterrichtsvorschlag (S.P.Q.R., vgl. [14], [15]) sowie eine Sammlung von ergänzendem Material zu speziellen Themen der Quantenphysik.

Der quanth-Online Kurs

Der quanth-Kurs [16] bietet einen modernen, informationsbasierten Zugang zur Quantenphysik. Zielgruppe des Kurses sind Studierende (vor allem des Lehramts). Im quanth-Kurs werden die Ideen von milq weiterentwickelt, so erfolgt die Einführung ebenfalls entlang von wenigen Kernprinzipien. Der Kurs soll den Lernenden zeigen, dass die speziellen Eigenschaften der Quantenphysik dazu benutzt werden können, Aufgaben zu lösen, die mit den Mitteln der klassischen Physik unlösbar sind. Hierzu werden die beiden großen Themen der Quanteninformation „Quantenkryptographie“ und „Quantencomputing“ vertieft besprochen.

Der Kurs ist in vier Kapitel aufgeteilt, die im Umfang einer Vorlesung mit 2 SWS über ein Semester entsprechen. Es gibt zunächst einen einführenden Kurs, bei dem die Grundeigenschaften der Quantenphysik wiederholt und aus der Sicht der Informationsverarbeitung vertieft werden. Der zweite Kurs beschäftigt sich mit dem Phänomen der Verschränkung und der Verletzung der Bell'schen Ungleichung sowie den Folgerungen, die man daraus für die Physik ziehen kann. Dies entspricht also gerade dem fünften der oben benannten Grundprinzipien. Am Ende dieses Kurses soll es den Lernenden möglich sein, zu erklären, wie man experimentell den Unterschied zwischen klassischer und Quantenphysik untersuchen kann. In zwei weiteren Kapiteln wird dann dieser Unterschied praktisch angewendet, um Quantenkryptographie sowie die Grundlagen des Quantenrechnens zu diskutieren.

In der Praxis wird der Online-Kurs in einem Just-in-Time-Lehrkonzept verwendet. Dabei haben die Studierenden drei Wochen Zeit, sich in ihrer eigenen Geschwindigkeit mit den Inhalten jeweils eines Kapitels zu beschäftigen, woraufhin ein Präsenztermin zur Besprechung des Gelernten stattfindet. Hierzu nutzen die Studierenden ein Online-Forum, um zu den Inhalten des jeweiligen Kurses Fragen zu stellen bzw. Themen zu benennen, die bei der Besprechung vertieft werden sollen. So kann der Dozent die Vorlesung an die Bedürfnisse der Studierenden anpassen. Untersuchungen mit Studierenden an der Universität Braunschweig und der Universität Hannover haben hierbei ergeben, dass die Kursstruktur grundsätzlich geeignet ist, um Wissen über Quantenphysik zu vermitteln. Weiterhin ergab sich bei einer Untersuchung der intrinsischen Motivation (nach [17]) in einem Prä-Post-Design, dass Studierende bei der Bearbeitung des Kurses signifikant mehr Wahlfreiheit erleben, wohingegen die Skalen zu Vergnügen, wahrgenommener Kompetenz und wahrgenommenem Druck sich nicht signifikant unterscheiden [18].

Zusammenfassung und Ausblick

Wir haben in diesem Artikel die aktuelle Arbeit an der TU Braunschweig zur Lehre von Quantenphysik zusammengefasst und eine Übersicht der didaktischen Herausforderungen gegeben. Hierbei haben wir die Inhalte der Kurse milq und quanth zusammengefasst und eine Variante der Grundprinzipien der Quantenphysik besprochen.

Eine zukünftige Richtung von Untersuchungen wird der Einsatz von Quanteninformation im schulischen Kontext sein. In einer ersten Pilotstudie wurde im letzten Jahr ein Konzept für den Einsatz von Quantenkryptographie mit Einzelphotonen als Einführung in das Thema Quantenphysik mit einer Klasse der 10. Jgst. in Braunschweig getestet [19]. Die erfreulichen Ergebnisse der Untersuchung deuten darauf hin, dass sich das Thema auch für den Einsatz in der Schule eignet und die (Quanten-)Kryptographie als einer der wenigen authentischen Kontexte wirksam wird, die die moderne Physik anzubieten hat.

Literatur

- [1] Bund-Länder-Kommission für Bildungsplanung und Forschungsförderung (1997): Materialien zur Bildungsplanung und zur Forschungsförderung, Heft 60, online: <http://www.blk-bonn.de/papers/heft60.pdf>
- [2] Feynman, R.P. (1964): The character of physical law, The Messenger Lectures, Cornell University
- [3] Bell, J.S. (1964): On the Einstein-Podolski-Rosen Paradox. *Physics*, 1(3), 195
- [4] Duhme, J., Franz, T., Schmidt, S. & Werner, R.F. (2010): Quanteninformationstheorie Teil 1: Grundlagen, Verschränkung – Schlüssel zur Quantenwelt. *Physik in unserer Zeit*, 41(5):236
- [5] Miller, J.L. (2016): Three groups close the loopholes in tests of Bell's theorem. *Physics Today* 69(1), 14–16

- [6] <http://www.qutools.com/qued/> (Stand: Februar 2016)
- [7] Arndt, M. & Hornberger, K. (2014): Insight review: Testing the limits of quantum mechanical superpositions, *Nature Physics* 10, 271–277
- [8] Ludwig, G. (1990): Die Katze ist tot. In: J. Audretsch & M. Mainzer (Hrsg.): *Wieviele Leben hat Schrödingers Katze?* BI-Wiss.-Verlag: Mannheim
- [9] Schulz, T. (2015): Rechner-Revolution: Google und Nasa präsentieren Quantencomputer, Spiegel-Online: <http://www.spiegel.de/netzwelt/web/google-und-nasa-praesentieren-ihren-quantencomputer-a-1066838.html> [9.12.2015]
- [10] Wang, J. et al. (2015): Quantum Photonic Interconnect, Preprint online: <http://arxiv.org/abs/1508.03214>
- [11] Kueblbeck, J. & Müller, R. (2002): Die Wesenszüge der Quantenphysik, Praxis Schriftreihe, Band 60, Aulis Verlag
- [12] www.milq-physik.de (Stand: Februar 2016)
- [13] Müller, R. (2003): *Quantenphysik in der Schule, Studien zum Physiklernen*, Band 26, Logos-Verlag Berlin
- [14] Dammaschke, T.: S-P-Q-R – Schülerprogramm zur Quantenreflexion, http://milq-physik.de/U-Einheit_S-P-Q-R
- [15] Dammaschke, Th. & Müller, R. (2011): Modelle beim Lernen der Quantenphysik, *Naturwissenschaft im Unterricht Physik*, Nr. 122, 37–42
- [16] www.quanth-physik.de [Februar 2016]
- [17] Wilde, M. et al. (2009): Überprüfung einer Kurzskala intrinsischer Motivation (KIM). In: *Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften*, 15 (2009), 31–45.
- [18] Franz, T.: Learning Quantum Information with Online Resources, In: L. J. Thoms & R. Girwitz (Hrsg.): *Proceedings of the 20th MPTL conference*, 205–212.
- [19] Reisch, C. & Franz, T. (2016): *Quantenkryptographie, PdN - Physik in der Schule*, 1/65, 11–16