

Jochen Scheid¹
 Alexander Kauertz¹
 Stefan Heusler²
 Rainer Müller³
 Wolfgang Dür⁴
 Torsten Franz³
 Susanne Heinicke²

¹Universität Landau

²Universität Münster

³TU Braunschweig

⁴Universität Innsbruck

Kompetenzentwicklungsmodell zur Quantenphysik

Hintergrund und Forschungsziele

Quantenphysik (QP) ist ein Schlüssel zu einem modernen physikalischen Weltverständnis, sowie zu einer Vielzahl bereits existierender Technologien wie etwa dem Laser, bildgebenden Verfahren in der Medizin und der gesamten Elektronik, aber auch zu einer neuen Ära der Quantentechnologie wie z.B. abhörsicherer Kommunikation mit Quantenkryptographie. QP ist als Teil der modernen Physik in der gymnasialen Oberstufe bereits etabliert, jedoch handelt es sich begrifflich und bezüglich der Formalismen um einen der anspruchsvollsten Themenbereiche der Schulphysik (Müller & Wiesner 2000).

Eine typische Schwierigkeit beim Lernen von QP ist z.B. die Unterscheidung von verwandten Konzepten (Singh, 2001) oder ein Verbleiben der Lernenden in einer deterministisch-mechanistischen Weltansicht (Fischler & Lichtfeldt, 1994). QP widerspricht einem klassisch-mechanistisch geprägten Weltbild, welches am Ende der Sekundarstufe 1 vorherrscht. Auch nach Unterricht in QP bevorzugen Lernende klassische Perspektiven an Stellen, an denen quantenphysikalische Perspektiven angemessen wären (Baily & Finkelstein 2009). Voraussetzung für eine Entwicklung des Konzeptverständnisses in QP ist eine Weiterentwicklung des Weltbildes der Lernenden (NOS, Lederman, 2007) von einem deterministischen zu einem probabilistischen Weltbild. In der Schule sollte daher eine Weiterentwicklung zu einem probabilistischen Weltbild am Ende der Sekundarstufe 2 angestrebt werden. Auch wenn diese Weiterentwicklung exemplarisch besonders gut und besonders klar am Beispiel der QP möglich ist, ist diese Weiterentwicklung auch bei der Bewertung von komplexen Fragestellungen in anderen Themengebieten wie etwa komplexen Klimamodellen oder auch ökonomischen Modellen von Bedeutung.

Bezüglich QP existiert für Oberstufenschüler eine Vielzahl von Lehrideen (z.B. Münchner Modell, Müller, 2003, Spin First, Sadaghiani & Munteanu, 2015, oder das Qubit als einfachstes Quantenobjekt mit bestimmten Eigenschaften, Dür und Heusler, 2012) sowie Supportsysteme mit potentiellen Entlastungsstrategien (Visualisierungen, Heusler, 2013, Dür & Heusler, 2012), deren Wirksamkeiten jedoch empirisch wenig beforscht sind. Ebenso ist wenig beforscht, wie stark die Effekte potentieller Einflussfaktoren auf die Entwicklung des Konzeptverständnisses in QP und damit auf die Entwicklung eines quantenphysikalischen Weltbildes sind. Folgende Faktoren sind denkbar:

- mathematische Kompetenzen,
- klassisch-physikalische Kenntnisse,
- Wissen über Experimente,
- Interpretationen von QP und kritisches Reflektieren darüber,
- Repräsentationskompetenz und
- schlussfolgerndes Denken

Mittelfristiges Ziel des Projekts ist es daher, ein empirisch fundiertes Kompetenzentwicklungsmodell für den Übergang von einem klassisch-deterministischen zu einem probabilistischen Weltbild zu erstellen. Hierzu fokussieren wir inhaltlich auf die fünf Wesenszüge der QP, bei denen dieser Übergang besonders klar modelliert und getestet werden kann. Aufbauend auf empirisch geprüfte Supportsysteme, wie z.B. kognitive Aktivierung in Bezug auf Repräsentationen (Scheid, 2013), werden systematisch unterschiedliche Repräsentationen (Kanäle) zur Vermittlung von QP genutzt, wie etwa Visualisierungen (Dür & Heusler 2013), Experimente und auch mathematische Modelle.

Hypothesen und Design

Bei der Kompetenzentwicklung ist denkbar, dass die Kanäle untereinander wechselwirken und die Entwicklung dadurch beeinflussen. Dies beschreiben die folgenden drei Hypothesen:

- Die Schwellen-Hypothese drückt aus, dass erst ein bestimmtes Level einer Kompetenz A es ermöglicht, dass sich Kompetenz B weiterentwickeln kann.

Forschungsfrage 1: Welche Schwellen in welchen Kanälen sind Voraussetzung für eine Weiterentwicklung in anderen Kanälen?

Im weiter unten dargestellten Flussdiagramm ist dies z.B. durch die beiden oberen Kanäle beschrieben, die zeitlich aufeinander folgen: Hier müsste die Kompetenz in Stochastik einen bestimmten Schwellenwert übersteigen, bevor die Teilkompetenz „QP-Experimente verstehen“ weiterentwickelt werden kann.

Flussdiagramm: Prinzip des Kompetenz-Entwicklungsmodells

Konzept- & NOS-Kompetenzstufe	Kanal	Kanal	Konzept- & NOS-Kompetenzstufe
Sekundarstufe 1 (z.B. Messbarkeit aller Eigenschaften)	Mathematik (z.B. Stochastik)	Verstehen von QP-Experimenten	Sekundarstufe 2 (z.B. Komplementarität von Eigenschaften)
	Vorstellungen / Visualisierungen von Stochastik	Interpretation von QP	

zeitlicher Verlauf 

- Die Reihenfolge-Hypothese beschreibt, dass die Reihenfolge der Entwicklung von Subkompetenzen einen Einfluss auf die Kompetenzentwicklung haben kann.

Forschungsfrage 2: Welche Reihenfolge ist förderlich und welche hinderlich für die Kompetenzentwicklung?

Dies kann im Flussdiagramm wieder mit den oberen Kanälen erklärt werden: Wenn hier kein Schwellenwert in der Teilkompetenz Stochastik für eine Entwicklung der Teilkompetenz „Verstehen von QP-Experimenten“ gefunden wird, sondern ein linearer Zusammenhang, spräche das für die Reihenfolgehypothese (im Versuchsdesign werden die Reihenfolgen variiert, bedeutsame Aussagen zur Reihenfolge können erst im Zusammenhang der Ergebnisse aller Variationen gemacht werden).

- In der Gleichzeitigkeits-Hypothese wird formuliert, dass zeitgleiches Unterrichten von Denkweisen der QP und Experimenten evtl. Lernende hemmt, klassische Vorstellungen für QP zu verwenden.

Forschungsfrage 3: Welche Paare von Kompetenzen entwickeln sich miteinander am besten, sind also Folge und Voraussetzung füreinander?

Im Flussdiagramm ist dies durch die untereinander stehenden Kanäle dargestellt. Zum Beispiel kann untersucht werden, wie gut sich die Teilkompetenzen „Verstehen von QP-

Experimenten“ und „Interpretation von QP“ zeitgleich entwickeln lassen. Zum Vergleich sieht ein anderes Untersuchungsdesign vor, die vorgenannten Teilkompetenzen nacheinander zu entwickeln.

Das Design des Kompetenz-Entwicklungsmodells ist dem ESNaS-Kompetenzmodell angelehnt (Kauertz et al., 2010) und hat die folgenden drei Dimensionen:

1. Definition von Konzepten, auf welche die Weltsicht angewendet wird (inkl. der fünf Wesenszüge, Müller, 2003)
2. Denk-Operationen für abstrakte Modellbildung
3. Komplexität (Fakt bis übergeordnetes Konzept)

Das Modell wird zurzeit an die Anforderungen der Entwicklung des quantenphysikalischen Weltbildes angepasst.

Geplante Methoden und Ausblick

Als Stichprobe werden Oberstufenlernende bzw. Studierende in Deutschland und Österreich genutzt ($N_{\text{Gesamt}} = 600$). Die vorgenannten Lehrkonzepte „Münchener Modell“, „Visualisierungen“ und QP-Experimente (insbesondere „aktuelle Einzelphotonenexperimente“) behandeln thematisch die „fünf Wesenszüge der QP (Müller, 2003)“ und werden zur Kompetenzmodellierung eingesetzt. Basis für die Intervention ist ein neu zu entwickelnder online-Kurs zu den fünf Wesenszügen, der auf den oben genannten Lehrkonzepten fußt. Hierbei werden die Erklärungen zu den fünf Wesenszügen systematisch jeweils in unterschiedlichen Repräsentationen (Kanälen) vorgenommen. So kann z.B. das stochastische Verhalten durch Visualisierungen, durch interaktive Simulationen oder durch mathematische Gleichungen dargestellt werden. Für die Intervention werden jeweils unterschiedliche Kanäle „an-“ bzw. „abgeschaltet“.

Innerhalb der Online-Lehrgänge finden die Variationen der Kanalreihenfolgen statt, mit denen die Hypothesen und Forschungsfragen untersucht werden können. Damit dies möglich ist, müssen weiterhin folgende Messinstrumente angepasst bzw. neuentwickelt werden:

- Konzeptverständnis QP (basierend auf fünf Wesenszügen, Müller 2003)
- physikalische Weltsicht auf Niveau der Sekundarstufe 1 und Sekundarstufe 2 (deterministisch bzw. probabilistisch)
- bezogen auf QP: Repräsentationskompetenz, Mathematik, Fachwissen, Experimente und Interpretation

Zur Analyse der Unterschiede in der Kompetenzentwicklung zwischen den Lehrgängen und der Einflussfaktoren der Kanäle bieten sich Strukturgleichungs- oder regressionsanalytische Modelle an, mit deren Ergebnissen das Kompetenzentwicklungsmodell erstellt werden kann.

Literaturverzeichnis

- Baily, C., & Finkelstein, N.D. (2009). Development of quantum perspectives in modern physics. *Physical Review Special Topics - Physics Education Research*, 5 (1), 010106
- Dür, W., & Heusler, S. (2013). What we can learn about quantum physics from a single qubit [http://arxiv.org/abs/1312.1463, 14.10.2016]
- Fischler, H., & Lichtfeldt, M. (1994). Ein Unterrichtskonzept zur Einführung in die Quantenphysik, *Physik in der Schule*, 32
- Heusler, S. (2013). Visualisierungen – ein Schlüssel zu moderner Physik im Schulunterricht. Habilitationsschrift zur Erlangung der *venia legendi* für das Fachgebiet Didaktik der Physik. Westfälische Wilhelms-Universität Münster. [online verfügbar unter: https://www.uni-muenster.de/imperia/md/content/fachbereich_physik/didaktik_physik/publikationen/visualisierungen-physik.pdf; Zugriff am 13.10.2016]
- Lederman, N.G. (2007). Nature of Science: Past, Present, and Future. In S.K. Abell & N.G. Lederman (Eds.), *Handbook of research on science education*. Mahwah, NJ: Erlbaum, 831–879
- Kauertz, A., Fischer, H., Mayer, J., Sumfleth, E., & Walpuski, M. (2010). Standardbezogene Kompetenzmodellierung in den Naturwissenschaften der Sekundarstufe I. *Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften*, 16, 135-153
- Müller, R. (2003). *Quantenphysik in der Schule*. Berlin: Logos-Verlag
- Müller, R., & Wiesner, H. (2000). Das Münchener Unterrichtskonzept zur Quantenmechanik. In: *Physik in der Schule*, 38 (2), 126–134
- Sadaghiani, H.R., & Munteanu, J. (2015). Spin First instructional approach to teaching quantum mechanics in sophomore level modern physics courses. Edited by Churukian, Jones, and Ding. *Physics Education Research Conference*. Published by the American Association of Physics Teachers doi:10.1119/perc.2015.pr.067
- Scheid, J. (2013). *Multiple Repräsentationen, Verständnis physikalischer Experimente und kognitive Aktivierung: Ein Beitrag zur Entwicklung der Aufgabenkultur*. Berlin: Logos-Verlag
- Singh, C. (2001). Student understanding of quantum mechanics. *American Journal of Physics*, 69 (8), 885-895