

## Förderung eines funktionalen Modellverständnisses Lernender in der Quantenphysik

### Ausgangslage

Die Kenntnis darüber, welche Vorstellungen Lernende zu verschiedenen Konzepten und Phänomenen entwickeln, ist anerkanntes Forschungsziel der Physikdidaktik. Bezogen auf die Quantenphysik zeigen sich mechanistische Denkweisen als zentrale Lernbarriere (Petri & Niedderer, 1998; Müller, 2003; Taber, 2005; Krijtenburg-Lewerissa et al. 2017). Dies führt dazu, dass Lernende gerade in der Quantenphysik oft kein elaboriertes Modellverständnis entwickeln, sondern Schwierigkeiten haben bei der Abstraktion weg von der durch ein Modell zu beschreibenden Realität: In der Quantenphysik werden Modelle von Lernenden dann oft insofern gedeutet, als dass sie Replikaten der Wirklichkeit entsprechen

Ubben und Heusler (2019) studierten den Übergang mentaler Modelle Lernender von einer Konkretheit hin zu der oben beschriebenen Abstraktheit am Beispiel der Atomhülle genauer. Im Rahmen einer Fragebogenstudie (N = 3108) extrahierten sie faktorenanalytisch zwei unabhängige Faktoren zur Beschreibung mentaler Modelle der Teilnehmenden an der Studie: die Gestalt und die Funktionalität. Unter der Gestalttreue verstehen die Autoren der Arbeit dabei, „inwieweit physikalische Modelle als gestalttreue Abbilder der Realität gesehen werden“ (Ubben, 2020). Mit der Funktionalität soll hingegen zum Ausdruck kommen, dass eine Funktion bzw. eine Menge von Funktionen des Modells als realitätstreu betrachtet werden. Die Unabhängigkeit dieser beiden Faktoren ermöglichte Ubben und Heusler die Unterscheidung von vier Verständnistypen mentaler Modelle, jeweils in Abhängigkeit der Ausprägung von Gestalt- und Funktionalitätstreue. Die Beschreibungen zu den einzelnen Verständnistypen wurden von Ubben (2020) detailliert dargelegt.

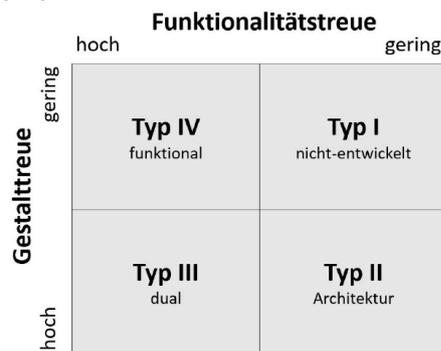


Abb. 1: Trägt man die beiden Faktoren Funktionalitätstreue und Gestalttreue gegeneinander auf, so ergeben sich vier mögliche Verständnistypen mentaler Modelle.

### Forschungsdesign und Forschungsfragen

Es verbleibt unter anderem die Klärung der Frage, inwiefern die extrahierten Verständnistypen mentaler Modelle (vgl. Abb. 1) über die Atomhülle hinaus auf weitere Aspekte der Quantenphysik verallgemeinert werden können. Zur Annäherung an die Klärung dieser Frage wurde eine Fragebogenstudie mit N = 118 Schülerinnen und Schüler der gymnasialen Oberstufe durchgeführt. Als Fragebogen konnte auf einen Vorstellungsfragebogen von Müller (2002) zurückgegriffen werden; dieser ermöglicht die Erhebung von Schülervorstellungen zu verschiedenen Konzepten der Quantenphysik mit Hilfe von Aussagen, welche die Teilnehmenden auf einer fünfstufigen Ratingskala (1 = stimmt völlig, ..., 5 = stimmt gar nicht) bewerten (z.B. „In der Quantenphysik ist es möglich, dass ein Quantenobjekt klassisch wohldefinierte Eigenschaften, wie den Ort, nicht besitzt.“). Die Ergebnisse hierzu berichten wir weiter unten.

Außerdem stellt sich aus unterrichtspraktischer Sicht die Frage, wie die Förderung und Unterstützung der Entwicklung mentaler Modelle hin zu einem funktionalen Modellverständnis gelingen kann – gerade in der Quantenphysik. Dazu wurden  $N = 25$  Schülerinnen und Schüler (ohne Vorwissen in Quantenphysik) zu verschiedenen Aspekten der Quantenphysik interviewt, nachdem sie zur Einführung in die Quantenphysik das Erlanger Unterrichtskonzept zur Quantenoptik erlebt haben. Es gibt nämlich eine begründete Hoffnung, dass mit diesem Konzept eine Förderung des funktionalen Modellverständnisses erfolgreich sein kann: großer Wert wird nämlich auf die Unterscheidung zwischen dem gelegten Modell aussieht und dem, was es repräsentiert (Ubben & Heusler, 2019).

**Infobox** Das Erlanger Unterrichtskonzept zur Quantenphysik für die gymnasiale Oberstufe dient der Einführung in die Quantenphysik in vier Unterrichtsstunden. Das Experiment aus der bahnbrechenden Publikation „Experimental evidence for a photon anticorrelation effect on a beamsplitter“ von Grangier et al. (1986) liegt dem Konzept inhaltlich zu grunde. Anhand von technischen Aspekten und Ergebnissen quantenoptischer Realexperimente gelangen die Lernenden auf direktem Wege zu den Wesenszügen der Quantenphysik.

Abb. 2: Infobox zum Erlanger Unterrichtskonzept zur Quantenoptik (Bitzenbauer & Meyn, 2020a). Details zum Konzept findet man bei (Bitzenbauer & Meyn, 2020b).

### Ergebnisse der Fragebogenuntersuchung

Das Kasser-Mayer-Olkin-Kriterium als Maß der Stichprobeneignung liegt bei .71 und damit oberhalb des kritischen Werts von .50 (Field, 2013). Auch der Bartlett-Test auf Sphärizität spricht dafür, dass die erhobenen Daten für eine explorative Faktorenanalyse geeignet sind ( $\chi^2(45) = 198.86, p < .001$ ). Die explorative Faktorenanalyse mit anschließender Varimax-Rotation wurde mit SPSS 25 durchgeführt und impliziert die Extraktion zweier Faktoren, die zusammen 44.4% der Gesamtvarianz aufklären. Die einzelnen Items weisen hohe Faktorladungen auf. Nur ein Item besitzt eine Sekundärladung, die betragsmäßig oberhalb von .30 liegt. Inhaltlich findet man in den beiden Faktoren diejenigen aus der Studie von Ubben und Heusler wieder. Dies spricht dafür, dass sich diese beiden unabhängigen Faktoren mentaler Modelle auf weitere Konzepte der Quantenphysik – also über die Atomhülle hinaus – verallgemeinern lassen. Auch eine konf. Faktorenanalyse bestätigt gute Modellpassung ( $\chi^2/df = 1.380, CFI = 0.934, RMSEA = 0.048, SRMR = 0.057$ ).

Ein Beispiel für ein Item, das dem Faktor Gestalttreue zugeordnet ist, ist Item 2: „Die augenblickliche Position eines Photons zwischen Quelle und Detektor ist nicht prinzipiell unbestimmt, sondern dem Experimentator unbekannt.“ Item 6 stellt ein Beispiel für eines aus dem Faktor Funktionstreue dar: „Wenn das Photon im Interferometer zum Detektor fliegt, nimmt es einen ganz bestimmten Weg, auch wenn ich ihn nicht bestimmen kann.“

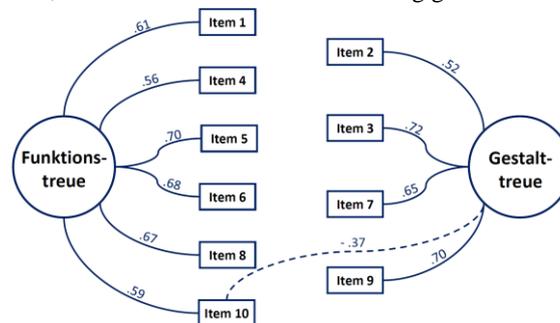


Abb. 3: Die beiden extrahierten Faktoren sowie die Faktorladungen der jeweiligen Items.

### Ergebnisse der Interviewstudie

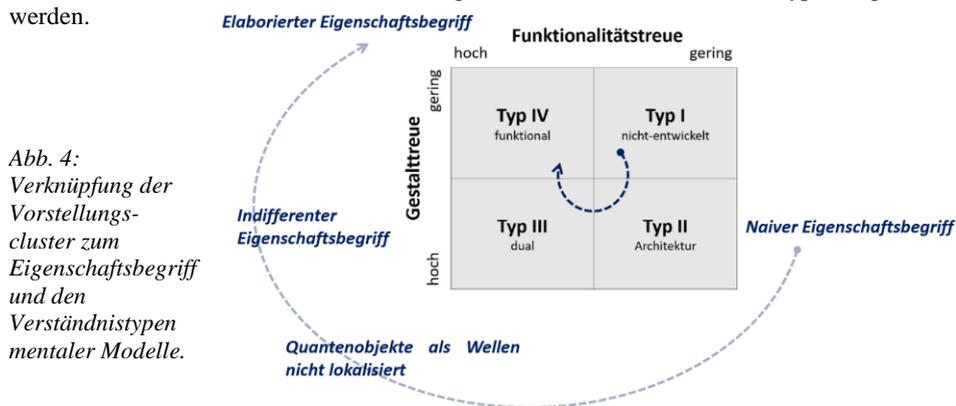
In den 25 - 45 Minuten dauernden leitfadengestützten Interviews wurden die Probanden zu den Wesenszügen der Quantenphysik (Küblbeck & Müller, 2003) befragt. Die Schülerantworten wurden mit Hilfe deduktiv und induktiv gebildeter Kategorien mittels qualitativer Inhaltsanalyse ausgewertet. In diesem Beitrag wird beispielhaft auf die Ergebnisse

zur Eigenschaft Ort in der Quantenphysik eingegangen. Die Schülervorstellungen wurden u.a. mit Fragen, wie der Folgenden erhoben, welche von Müller (2003) übernommen wurde: „Jemand behauptet, dass ein Photon im Doppelspalt-Experiment immer entweder durch den rechten oder durch den linken Spalt geht. Wie würdest du ihn widerlegen?“ Mittels hierarchisch-agglomerativer Clusteranalyse unter Verwendung der Linkage-Methode von Ward (Strauss & Maltzitz, 2017) mit Manhattan Distanz konnten hinsichtlich der Eigenschaft Ort in der Quantenphysik vier primäre Vorstellungstypen identifiziert werden. Ohne auf statistische Details einzugehen, sollen diese vier Vorstellungstypen nachfolgend kurz beschrieben werden.

1. Cluster *Elaborierter Eigenschaftsbegriff* (5/25): Schülerinnen und Schüler dieses Clusters besitzen eine sehr elaborierte Vorstellung zum Eigenschaftsbegriff in der Quantenphysik. Alle Befragten dieses Clusters lehnen eine permanente Lokalisierung von Quantenobjekten ab und betonen die Bedeutung der Präparation.
2. Cluster *Indifferenter Eigenschaftsbegriff* (8/25): Zwar ist die Präparation von Eigenschaften in der Quantenphysik den Lernenden bewusst, allerdings gibt es auch Äußerungen, die für indifferente Vorstellungen sprechen: Drei Viertel der Befragten dieses Clusters nutzen nämlich Trajektorien von Quantenobjekten mehr oder weniger explizit, um quantenphysikalische Phänomene oder Experimente zu beschreiben.
3. Cluster *Naiver Eigenschaftsbegriff* (6/25): Bei den Befragten in diesem Cluster sind mechanistische Denkweise hartnäckig, denn alle 6 Befragten dieses Clusters nutzen Trajektorien von Quantenobjekten mehr oder weniger explizit, um quantenphysikalische Phänomene oder Experimente zu beschreiben oder behaupten, dass eine permanente Lokalisierung von Quantenobjekten daran scheitert, dass eine Ortsbestimmung schwierig
4. Cluster *Quantenobjekte als Wellen nicht lokalisiert* (6/25): Die Präparation von Eigenschaften in der Quantenphysik wird aber von allen Befragten erwähnt. Allerdings spricht keiner der Befragten dieses Clusters über die Zustandsänderung bei Messung. Oft wird die fehlende Lokalisierbarkeit mit Argumenten des Dualismus begründet; Quantenobjekte wären demnach als Wellen nicht lokalisierbar.

### Diskussion

Die in der Interviewstudie gefundenen Vorstellungstypen können mit den eingangs vorgestellten Verständnistypen mentaler Modelle von Ubben (2020) identifiziert werden (vgl. Abb. 4). Dies liefert ein Indiz dafür, dass eine Einführung Lernender in die Quantenphysik mittels des Erlanger Konzepts dazu geeignet ist, um das funktionale Modellverständnis Lernender zu fördern: immerhin ein Fünftel der Lernenden kann nach einer gerade einmal vier Unterrichtsstunden umfassenden Einführung dem funktionalen Verständnistypen zugeordnet werden.



**Literatur**

- Bitzenbauer, P., Meyn, J.-P. (2020a). A new teaching concept on quantum physics in secondary schools. In: *Physics Education* **55** 055031
- Bitzenbauer, P., Meyn, J.-P. (2020b). Inhaltsvalidität eines Testinstruments zur Erfassung deklarativen Wissens zur Quantenoptik. Erscheint in: *PhyDid B, Beiträge zur Frühjahrstagung Bonn 2020*.
- Field, A. P. (2013). *Discovering statistics using IBM SPSS statistics: And sex and drugs and rock 'n' roll* (4. Auflage). Los Angeles: Sage.
- Krijtenburg-Lewerissa, K., Pol, H. J., Brinkman, A., Joolingen, W.R. (2017). Insights into teaching quantum mechanics in secondary and lower undergraduate education. In: *Physical Review Physics Education Research*, **13**, 010109.
- Müller, R., Wiesner, H. (2002). Teaching quantum mechanics on an introductory level. In: *American Journal of Physics*, **70**, 200ff.
- Müller, R. (2003). *Quantenphysik in der Schule*. Berlin: Logos Verlag.
- Petri, J., Niedderer, H. (1998). A learning pathway in highschool level quantum atomic physics. In: *International Journal of Science Education*, **20**, 1075-1088.
- Strauss, T., Maltitz, M. J. (2017). Generalising Ward's Method for Use with Manhattan Distances. In: *PLoS ONE* **12**(1).
- Taber, K. S. (2005). Learning Quanta: barriers to stimulating transitions in student understanding of orbital ideas. In: *Science Education*, **89**, 94-116.
- Ubben, M., Heusler, S. (2019). Gestalt and Functionality as Independent Dimensions of Mental Models in Science. In: *Research in Science Education*. <https://doi.org/10.1007/s11165-019-09892-y>
- Ubben, M. (2020). *Typisierung des Verständnisses mentaler Modelle mittels empirischer Datenerhebung am Beispiel der Quantenphysik*. Berlin, Logos Verlag.