

## **Quantenphysik als Teil gymnasialer Allgemeinbildung FACETTEN für Nicht-MINT-Gymnasiast/innen**

### **Ausgangslage: meist wenig Motivation für Physik**

In der Schweiz müssen auch die 70% Nicht-MINT-Lernenden in der gymnasialen Oberstufe Physik belegen. Nur ein kleiner Teil von ihnen wird ein Studium ergreifen, das spezifische Vorkenntnisse in Physik erfordert. Gymnasiale Quantenphysik (QP) ist für diese Zielgruppe ein Teil der Allgemeinbildung und kann insbesondere zum Weltbild im Kleinen beitragen. Angesichts der Bedeutung des Gebiets scheint ein Anteil von 10% der Unterrichtszeit gerechtfertigt. In den kantonal unterschiedlichen Lehrplänen spielt aber QP gar keine oder nur eine geringe Rolle (Einblick in moderne Physik, Lichtquant ...). Andererseits setzt der schweizerische Rahmenlehrplan (RLP) anspruchsvolle Ziele (EDK, 1994): „Der Physikunterricht (...) weist aber gleichzeitig physikalisches Denken als wesentlichen Bestandteil unserer Kultur aus.“ Derartige, auf der Ebene NOS anzusiedelnde Elemente können mit einem Gebiet aus der modernen Physik eher erreicht werden als mit newtonscher Mechanik.

Erhebungen (EDK, 2004) zeigen, dass in dieser Population das Interesse für Physik mehrheitlich gering ist. Eine differenziertere Erhebung (Dreyer, 2015) bestätigt, dass vor allem die Gymnasiastinnen ein sehr geringes Interesse zeigen, obwohl in Schwerpunkten wie Spanisch oder Musik ein Fünftel ein hohes Interesse an MINT-Fächern äussert. Unterricht zur QP muss vor allem versuchen, die Interessen der Gymnasiastinnen zu wecken, aber auch Binnendifferenzierung ermöglichen. Eine Hypothese für die FACETTEN DER QUANTENPHYSIK ist, dass Menschen und Grundsatzfragen interessieren. In der Pilotphase (N = 40) bestätigten folgende Items diese Annahmen (auf einer Skala von 5 = klar JA und 1 = klar NEIN):

*Es tröstet mich, dass berühmte Physiker auch Probleme mit der Veranschaulichung von Quanten hatten.* (Ideal = 5.0; vorher / nachher = 3.5 / 4.4)

*Die Diskussion der Grundlagen der Physik gehört in den Philosophie- nicht in den Physikunterricht.* (Ideal = 1.0; vorher / nachher = 1.6 / 1.9)

### **Einzelne Charakteristika der FACETTEN DER QUANTENPHYSIK**

Welche Rolle soll Geschichte der Physik spielen? Einerseits verlangt der RLP „Der Physikunterricht vermittelt exemplarisch Einblick in frühere und moderne Denkmethode und deren Grenzen.“ „[Er] zeigt, dass sich physikalisches Verstehen dauernd entwickelt und wandelt (...).“ Schon der alte Berkeley Physik Kurs fand (Wichmann, 1975): „Es ist sicher interessant, den historischen Ablauf (...) zu verfolgen, da dadurch unsere physikalischen Kenntnisse entscheidend erweitert werden.“ Andererseits wird von fachdidaktischer Seite besonders im Zusammenhang mit dem gymnasialen Unterricht zur QP schon früh der historische Weg kritisiert (Brachner & Fichter, 1977): „Eine Hauptschwierigkeit (...) liegt wahrscheinlich darin, dass man bisher meist dem historischen Werdegang der Theorie zu folgen versuchte. Dadurch werden viele oft nicht mehr aktuelle Schwierigkeiten aus der Vorgeschichte der Quantentheorie in die Schule getragen.“ Die kontroverse Einschätzung besteht bis heute. Angesichts der Ausgangslage lassen sich die FACETTEN vom historischen Werdegang leiten, denn die NOS-Elemente benötigen historische Belege, wenn sie nicht blosse Thesen bleiben sollen. Aus Sicht der Fachwissenschaft überwundene Schwierigkeiten können helfen, aktuelle Lernschwierigkeiten zu überwinden. Gymnasiale QP muss ebenso ohne Quantenfeldtheorien entstehen wie gymnasiale Mechanik ohne Hamilton-Jacobi-Formalismus.

Quantenphysik umfasst aus Gymnasialperspektive die Theorien zum Licht und zur Materie. Das Licht wird in der Quantenelektrodynamik (QED) beschrieben, deren konzeptionelle und mathematische Anforderungen so hoch sind, dass sie erst in den vorgerückten Semestern des universitären Physikstudium gelehrt wird (Schmüser, 2012). Die Frage von Kapitel 1 „Was ist Licht?“ kann im Gymnasium also nur aus der Sicht der Frühen Quantenphysik (Hund, 1984) beantwortet werden. Die Lichtquantenhypothese wird von den Lernenden akzeptiert, weil ihre Präkonzepte meist gemischt und noch nicht gefestigt sind. Der angestrebte Konzeptwechsel zum Sowohl-als-auch von „wellig“ und „körnig“ und damit zum Begriff des Quantenobjekts scheint nach der Piloterprobung zu gelingen. Dazu trägt bei, dass mit dem neuen Konzept sowohl verschiedene Phänomene des Schüleralltags (Klimafrage, Sonnenschutz ...) als auch Anwendungen in technischen Geräten (Solarzellen, Laser ...) verstanden werden können. Dabei taucht die Frage nach der Rolle des Dualismus' auf. Er ist von Einstein beim Licht entdeckt und erst durch die QED aufgelöst worden. Den Lernenden begegnet er direkt in der zentralen Gleichung  $E = hf$ , wo links der Teilchenaspekt und rechts der Wellenaspekt steht. Im Gegensatz zu einem auf Brachner und Fichter (1977) zurückgehenden physikdidaktischen Trend „Quantenphysik ohne Dualismus“ wird in den FACETTEN der Dualismus reflektiert und betont. Hingegen wird der Begriff „Photon“, der dem Licht auf der Sekundarstufe faktisch einen reinen Teilchenaspekt zuschreibt, nur am Rand verwendet.

An der Universität wird die Materie zuerst im Rahmen der nichtrelativistischen Quantenmechanik als Lösung  $\psi$  der Schrödinger-Gleichung beschrieben (Straumann, 2012). Das kann erst am Schluss aufscheinen. Die Frage von Kapitel 2 „Materie – Teilchen oder Welle?“ spricht bereits im Titel die verbreitete und sehr tief verankerte Schülervorstellung an, Materie sei rein teilchenartig. (R. Müller & H. Schecker, 2018). Die Hinführung zur QM beginnt aus didaktischen Gründen dort, wo die historische Entwicklung ihren Anfang nahm: bei der Kritik an den semiklassischen Modellen der frühen QP, insbesondere des Planetenmodells. Dabei kommt Bohrs ad hoc Annahme, auf den stationären Bahnen sei das Strahlungsgesetz der Elektrodynamik ausser Kraft zu setzen, eine besondere Bedeutung zu. Vor dem QP-Unterricht glauben die Lernenden, dass nur Atome mit umlaufenden Elektronen stabil sein könnten, die Quantisierungsforderung für den Drehimpuls akzeptieren sie, wenn sie überhaupt erwähnt wird. Von Strahlungsverlusten haben sie keine Ahnung, weil dies nie Unterrichtsthema war.

Der Konzeptwechsel erfordert die Erschütterung der Präkonzepte und anschliessend den schrittweisen Aufbau (de Broglie => Schrödinger => Born) des quantenmechanischen Atommodells. Eine „Roadmap“ zeigt den Lernenden auf, dass de Broglies Materiewellen und Schrödingers kontinuierliche Ladungsdichten nur Zwischenstufen sind auf dem Weg zum Orbitalmodell, in dem die Quantenobjekte „körnig“ und „wellig“ und auch „zufällig“ in Erscheinung treten. Das Atom, mit dem die Lernenden auch in Chemie- und Biologieunterricht oft arbeiten, steht Zentrum des Unterrichts und nicht die abstrakten Grundprinzipien der QM wie das Überlagerungsprinzip. Realexperimente und Simulationen mit Elektronen, Neutronen und anderen freien Quantenobjekten bestätigen den Wellenaspekt ebenso der mit Beispielen erläuterte Tunneleffekt.

### **Einige Ergebnisse aus dem Pilottest**

Stunden überall zumindest 6 Lektionen für Kapitel 1 zur Verfügung, wäre das schon eine Verbesserung gegenüber dem Istzustand. Weil die Zustandsfunktion  $\psi$  und das Atom traditionell dem Chemieunterricht zugeteilt werden, scheint es vielen Physik-Lehrpersonen unmöglich, weitere 12 Lektionen in den überfüllten Lehrplänen für Kapitel 2 zu gewinnen, obwohl Schrödingers Katze erstaunlich vielen Lernenden aus der Populärliteratur bekannt ist, aber unverständlich bleibt. Aus diesen Gründen konnten bisher Kapitel 1 und 2 in nur zwei Klassen mit 40 Lernenden systematisch erprobt werden.

Die zwei auf Rainer Müller (2003) zurückgehenden Items zeigen, wie gut, das Planetenmodell mit den FACETTEN überwunden werden kann:

*Im Atom bewegen sich Elektronen auf bestimmten Bahnen mit hoher Geschwindigkeit um den Kern.* Ideal = 1.0; vorher / nachher = 3.2 / 1.7; Effektstärke = 1.5.

*Das Elektron stürzt nicht in den Atomkern, weil es sehr klein ist und sich schnell bewegt.* Ideal = 1.0; vorher / nachher = 3.5 / 2.1; Effektstärke = 1.1.

Wie gut aber das Neue, das Orbitalmodell, verankert und wie belastbar es ist, blieb bisher offen, ebenso die veränderte Rolle der Stochastik in der Physik. Hingegen wurden zwei NOS-Elemente untersucht. D. Höttecke & M. Hopf (2018) karikieren eine verbreitete NOS-Schülervorstellung: „Physik und Technik sind das Gleiche.“ Sie wird im Kapitel 1 aufgegriffen und im Ergänzungsmaterial „Nachdenken über Physik“ vertieft; analog die Frage nach dem Verhältnis zwischen Theorie und Experiment in der Physik im Kapitel 2. Folgende Items aus dem Pilottest liefern ein gedämpft positives Resultat mit begrenzter Aussagekraft:

*Für jede technische Neuheit muss zuerst die physikalische Grundlage erarbeitet werden.* Ideal = 1.0; vorher / nachher = 3.9 / 2.3; Effektstärke = 1.1.

*In der Physik liefert zuerst ein Experiment neue Daten. Diese kann man anschließend theoretisch erklären.»* Ideal = 1.0; vorher / nachher = 3.1 / 2.1; Effektstärke = 0.7.

### **Zwischenbilanz zu den FACETTEN und Ausblick**

Der Pilottest mit verschiedenen Lehrpersonen an verschiedenen Schulen zeigt die Praxis-Tauglichkeit dieses Produkts fachdidaktischer Entwicklungsforschung (Prediger & Link, 2012). In weiteren Unterrichtstests soll erprobt werden, ob in Kleingruppen geführte Lern-tagebücher den Austausch zwischen den Lernenden über die Konzeptwechsel fördern, wie es schon M. Lichtfeldt (1992) gefordert hatte. Lerntagebücher könnten auch eine qualitative Ergänzung zur praktisch wichtigen Leistungsbeurteilung liefern, die in der QM wegen der geringen Anzahl quantitativer Prüfungsaufgaben schwierig ist. Mit Lerntagebüchern und mit einer Verbesserung der Fragebogen würde die empirische Basis für Urteile über die verschiedenen Wege der physikalischen und NOS-Konzeptwechsel besser.

Wichtige Fragen bleiben noch zu beantworten: Wie entwickeln sich die Konzepte der Lernenden längs der Roadmap vom Planetenmodell zum Orbitalmodell, und wie tragfähig ist dieses Modell ohne die Verbindung zu Schrödingergleichung und komplexwertigen Wellenfunktionen? Wie verändern sich bei diesen physikalischen Entwicklungen das mathematische Werkzeug „Statistik“ und das philosophische Konzept „Zufall“ respektive „Determinismus“? Diesen Fragen soll in einem mixed-methods Ansatz nachgegangen werden. In Leitfadengestützten Interviews sollen die Entwicklungen mehrerer unterschiedlich leistungsfähiger Lernenden erhoben und dokumentiert werden (Niebert, 2014). Die Ausarbeitung kann aus Ressourcengründen nicht so fein sein wie bei der Fallstudie von J. Petri (2014) beim Schüler Carl. Weil aber die Rahmenbedingungen des Unterrichts (Voraussetzungen vom Kapitel 1 und enge Orientierung am Kapitel 2) besser bekannt sind als beispielsweise bei den Untersuchungen von M. Lichtfeldt (1992), dürften im Spektrum der Lernwege die häufigsten deutlich zum Vorschein kommen.

Obwohl nach so kurzer Unterrichtszeit Veränderung des Interesses für Physik kaum nachweisbar oder gar signifikant sein werden (Busker, 2014), bedeutet Unterricht mit den FACETTEN für die Nicht-MINT-Lernenden eine Phase mit wenig Rechnungen und vielen Konzeptfragen, also zumindest eine willkommene Abwechslung.

**Literatur**

- Brachner, A. und Fichter, R., (1977): Quantenmechanik für Lehrer und Studenten. Hannover: Schroedel
- Busker, M. (2014) Entwicklung eines Fragebogens zur Untersuchung des Fachinteresses. In D. Krüger et al. (Eds). Methoden in der naturwissenschaftsdidaktischen Forschung. Berlin: Springer. 269-281
- Dreyer, H.P. (2015). MUPET Mathematik- und Physikentwicklung am Gymnasium unter Berücksichtigung der Technik. Zürich: ETH. <http://www.math.ch/mupet/MUPET.html> (01.10.2019)
- EDK (1994). Rahmenlehrplan für Maturitätsschulen. Bern: Konferenz der kantonalen Erziehungsdirektoren.
- EDK (2004). EVAMAR I. Bern: Konferenz der kantonalen Erziehungsdirektoren.
- Fischler, H. (Ed.) (1992). Quantenphysik in der Schule. Kiel: IPN
- Höttecke, D. & Hopf, M. (2018). Schülervorstellungen zur Natur der Naturwissenschaft. In: H. Schecker et al. (Eds.). Schülervorstellungen und Physikunterricht. Berlin: Springer. 271-285
- Hund, F. (1984). Geschichte der Quantentheorie. Mannheim: Bibliographisches Institut
- Krijtenburg-Lewerissa, K. et al (2017). Insights into teaching quantum mechanics in secondary and lower undergraduate education. Phys. Rev. Phys. Ed. Research 13, 0101009
- Lichtfeldt, M. (1992). Schülervorstellungen in der Quantenphysik und ihre Veränderungen durch Unterricht. Essen: Westarp
- Müller, R. (2003). Quantenphysik in der Schule. Berlin: Logos
- Müller, R. & Schecker, H. (2018). Schülervorstellungen zur Quanten- und Atomphysik. In: H. Schecker et al. (Eds.). Schülervorstellungen und Physikunterricht. Berlin: Springer. 209-224
- Niebert, K. et al. (2014) Leitfadengestützte Interviews. In D. Krüger et al. (Eds). Methoden in der naturwissenschaftsdidaktischen Forschung. Berlin: Springer. 121-132
- Petri, J. (2014) Fallstudien zur Analyse von Lernpfaden. In D. Krüger et al. (Eds). Methoden in der naturwissenschaftsdidaktischen Forschung. Berlin: Springer. 95-105
- Prediger, S. & Link, M. (2012). Die Fachdidaktische Entwicklungsforschung – Ein lernprozess-fokussierendes Forschungsprogramm mit Verschränkung fachdidaktischer Arbeitsbereiche. In: Vorstand der Gesellschaft für Fachdidaktik (GFD) (Hrsg.): Formate Fachdidaktischer Forschung. Münster: Waxmann
- Schmüser, P. (2012). Theoretische Physik für Studierende des Lehramts I. Berlin: Springer
- Straumann, N. (2012): Quantenmechanik. Berlin: Springer
- Wichmann, H. (1975). Quantenphysik Berkeley Physik Kurs 4. Braunschweig: Vieweg + Sohn