

Research-Based Report of Practice

Facetten der Quantenphysik für das Nicht-MINT-Gymnasium – Entwicklung und Evaluierung einer didaktisch rekonstruierten Lernumgebung

Hans Peter Dreyer¹

Received: 8. December 2023 / Revised: 13. September 2024 / Accepted: 22. November 2024

Strukturiertes Abstract

Hintergrund: Wenn gymnasialer Physikunterricht aktuelles Orientierungswissen vermitteln will, muss er auch Quantenphysik, das zentrale Gebiet der heutigen Physik, thematisieren. In der Schweiz ist dies im obligatorischen Grundlagenfach oft nicht der Fall, weil das abstrakte Thema ungeeignet scheint, besonders für Lernende mit wenig Affinität zu Mathematik, Informatik, Naturwissenschaft und Technik (MINT). Quantenphysik taucht aber im neuen Rahmenlehrplan der Erziehungsdirektorenkonferenz (EDK, 2024) auf.

Ziele: Primäres Ziel war, eine Unterrichtseinheit zum Einstieg in die Quantenmechanik spezifisch für Nicht-MINT-Lernende nach dem Modell der Didaktischen Rekonstruktion zu entwickeln und zu erproben. Anschliessend sollten die Lernwirkung auf verschiedene Weisen geprüft und die Fragen beantwortet werden, wie weit die Welle-Teilchen-Dualität das Lernen erleichtert, ob Konzepte wie der Aspekt-Charakter, die Nicht-Kausalität oder der Zustandsbegriff erfasst werden und wie biografische, technische und weitere Elemente aus 'Nature of Science' (NoS) wirken.

Stichprobe / Rahmen: Das nach dem Paradigma des Design-Based Research entwickelte Material wurde zwischen 2017 und 2022 im Rahmen des normalen Unterrichts an 4 verschiedenen Gymnasien der Deutschschweiz erprobt. 11 Lehrpersonen und 546 Lernende waren beteiligt. Die eigentliche Evaluierung mit Fragebogen startete mit 89 Lernenden. 149 Lernende schrieben vorstrukturierte Lerntagebücher. Beides waren opportunistische Stichproben.

Design und Methoden: Die Entwicklung der Lernumgebung orientierte sich am Modell der Didaktischen Rekonstruktion. Zur fortlaufenden Bewertung dienten einerseits konventionelle Klausuren und andererseits Prä-Post-Fragebogen mit 40 Items und 5 Zeichnungen. Zusätzlich wurden in Gruppen geschriebene Lerntagebücher inhaltsanalytisch ausgewertet. Eine eigentliche Referenzpopulation gab es nicht. Im schweizerischen Rahmen hätte sie diejenigen Nicht-MINT-Lernenden umfasst, die keinen Unterricht zur Quantenphysik erhalten.

Ergebnisse: (1) Die Lernumgebung FACETTEN DER QUANTENPHYSIK ist praxistauglich und ermöglicht im 10.- 12. Schuljahr in rund 16 Lektionen einen Einblick in die Quantenphysik, der Nicht-MINT-Lernende anspricht.

(2) Der Kompetenzerwerb liegt im üblichen Rahmen. Für die Verbesserung des «Anfänger-Quantenphysik-Konzepts» ergab die Evaluierung eine Cohen-Effektstärke von 0.75 auf dem 0.1% Signifikanz-Niveau. Die Lerntagebücher lieferten differenzierte und überwiegend positive Antworten auf die Forschungsfragen.

Fazit: Die FACETTEN ermöglichen Lernenden im Nicht-MINT-Gymnasium einen Einstieg in die Quantenphysik in kurzer Zeit. Während Aspekt-Charakter und Nicht-Kausalität der Quantenobjekte verstanden werden, bleibt der Zustandsbegriff ψ der Quantenphysik bei den Lernenden nach dem knappen Unterricht unsicher. Die grosse Mehrheit schätzt die integrierten Elemente von NoS mit biografischen, technischen, philosophischen usw. Querbezügen und Ergänzungen. Die Welle-Teilchen-Dualität ist fachwissenschaftlich korrekt und als Scaffolding-Element auch lernpsychologisch hilfreich.

Weitere Arbeiten müssten zeigen, wie weit das bereits ausgearbeiteten Modul 3 den Zustandsbegriff klären kann, wie stabil die NoS-Entwicklung ist, ob die angebotenen MINT-Vertiefungen eine effektive Binnendifferenzierung erlauben und in welchem Umfang die Welle-Teilchen-Dualität das Lernen von Quantenphysik erleichtert.

Berichterstattung: Dieser Bericht fokussiert bei der Didaktischen Rekonstruktion auf die Bedeutung der Rahmenbedingungen, auf die Analyse der Welle-Teilchen-Dualität und die Rolle der NoS-Elemente. Er illustriert die Lernumgebung anhand von vier Schwerpunkten und fasst die Ergebnisse der Evaluierung mit Klausuren, Prä-Post-Fragebogen, Zeichnungen und Lerntagebüchern zusammen.

Keywords: *Sekundarstufe II, Quantenphysik, Didaktische Rekonstruktion, Welle-Teilchen-Dualität, Nature of Science*

¹Universität Zürich und Kantonsschule Wattwil
✉ hp.dreyer@thurweb.ch

Facets of quantum physics for non-STEM-secondary II students – Development and evaluation of a didactically reconstructed learning environment

Structured Abstract

Background: If instruction in Gymnasium pretends to provide an education that helps students to orient in the actual world, it needs to deal with quantum physics which is the central part of modern physics. Unfortunately, this is often not the case in mandatory physics in Switzerland because this abstract topic doesn't seem to match learners with little affinity to science, technology, engineering and mathematics (STEM). But quantum physics will become a mandatory topic in Switzerland's new framework curriculum (EDK, 2024).

Purpose: The primary purpose was to develop a learning environment which provides an entry into quantum mechanics especially for non-STEM students following the model of didactical reconstruction. In addition, learning effects should be tested, the usefulness of wave-particle duality should be checked, and the questions answered how well abstract concepts such as the aspect character and the notion of state function are learned and how biographical, technical and other elements of Nature of Science (NoS) influence learning.

Sample / setting: The learning environment was developed between 2017 and 2022, following the paradigm of design-based research. 11 teachers and 546 students from 4 different Gymnasium-schools in German-speaking Switzerland cooperated. The evaluation by questionnaires started with 89 students. 149 students wrote pre-structured learning-diaries. Both samples were opportunistic.

Design and Methods: The design of the learning environment was guided by the model of didactical reconstruction with recursive development. Continuous evaluation used conventional performance-tests and questionnaires with drawings and items. In addition, learning-diaries which had been written in groups, were analyzed. No reference group existed, since under Swiss conditions it had no instruction on quantum physics at all.

Results: (1) The learning environment FACETTEN DER QUANTENPHYSIK is applicable in real school situation and provides a start in quantum physics for non-STEM-students from 10th to 12th grade within roughly 16 lessons.

(2) The acquisition of competences as measured with ordinary performance tests was within the usual range. The evaluation of the development of concepts by pre-post questionnaires showed an increase in the "beginner's quantum concept" with 0.75 Cohen effect on the 0.1% significance level. Learning diaries provided detailed and mostly positive answers to the research questions.

Conclusions: The learning environment gives non-STEM-students access to quantum physics in a short period of time. While the concepts 'aspect' and 'non-causality' are understood, the notion of the state function ψ remains vague. The great majority estimates the integrated nature of science elements with complimentary biographical, technical, philosophical etc. information. Wave-particle-duality is scientifically correct and from the point of view of learning psychology useful as an element for scaffolding.

Further work is needed to make clear whether the already existing module 3 allows students to better understand the concept of the state function, how stable the development of NoS is, whether the offered STEM supplements facilitate internal differentiation and to what extent wave-particle-duality eases the learning of quantum physics.

Reporting: The focus of this report lies on the adaptation of the model of didactical reconstruction, the analysis of wave-particle-duality and the role of NoS. It highlights the learning environment by four examples and summarizes the results of the evaluation with tests, pre-post questionnaires, drawings and learning diaries.

Keywords: *secondary II, quantum physics, didactical reconstruction, wave-particle-duality, nature of science*

1 Einführung

Quantenphysik bestimmt die Eigenschaften der DNA oder den radioaktiven Zerfall. Sie gilt vom subatomaren Bereich bis zu schwarzen Löchern. Eine prinzipielle Grenze nach oben gibt es zwar nicht, doch der Einbezug der Gravitation ist bisher nicht gelungen. Die klassische, auf Newton zurückgehende Mechanik ist nur der (wichtige) Sonderfall der Quantenmechanik für Systeme mit verschwindend kleiner de Broglie-Wellenlänge. Ebenso ist die klassische Elektrizitätslehre ein Sonderfall der Quantenelektrodynamik. Quantenphysik ist also kein weiteres Kapitel wie etwa Akustik, sondern eine neue «Naturphilosophie». Ihre Ergebnisse sind oft kontraintuitiv, weshalb ihre Einsichten, zum Beispiel die Welle-Teilchen-Dualität (vgl. 3.2.2) als skurril bezeichnet werden. Der Quantenphysik-Nobelpreisträger Haroche benennt das Problem: «This concept [quantum physics' complementarity] is difficult to comprehend and explaining it to the layman does not go without danger. To combine waves and particles in an apparently hybrid entity seems to evoke the monsters, halve-man halve-beasts, which appear on bas-reliefs of Romanesque churches» (Haroche & Raimond, 2006, S. 12). Quantenphysik bildet zusammen mit der Relativitätstheorie das Rückgrat der modernen Physik. Auch sie muss in adäquater Weise im Gymnasium unterrichtet werden. Was im Geschichts- und im Biologieunterricht offensichtlich ist, gilt auch für den obligatorischen, sich mehrheitlich an Nicht-MINT-Lernende richtenden, «allgemeinbildenden» Physikunterricht im Grundlagenfach des Gymnasiums: Kein Verharren auf dem Stand von 1900! Doch in Realität wird in der Schweiz wenig Quantenphysik unterrichtet. Viele Physiklehrkräfte machen im Grundlagenfach einen Bogen um das anspruchsvolle Gebiet, meist in Übereinstimmung mit kantonalen oder eidgenössischen (EDK, 2023) Lehrplänen, die Quantenphysik ganz weglassen oder nur in einer Liste von Wahlthemen aufführen. Neben vielen universitären und populärwissenschaftlichen Darstellungen der Quantenphysik ist immer wieder versucht worden, das sperrige Thema für die Sekundarstufe II aufzuarbeiten. Die klassische Darstellung geht auf Max Born zurück, der «The Restless Universe» schon 1936 für seinen Sohn schrieb (Born, 1951). Neu ist in Norwegen eine lernpsychologisch optimierte Lernumgebung entstanden (RELEQUANT, 2016). Alle in diesen 80 Jahren entstandenen Lehrgänge liegen zwischen den Polen, sich an MINT-Lernende zu richten, wie der PSSC-Kurs (PSSC, 1968), oder auf Allgemeinbildung zu zielen, wie der Harvard Projekt Kurs (Holton et al., 1970). Einen Überblick über die verschiedenen Lehrgänge zur Quantenphysik bieten Müller und Wilhelm (Müller & Wilhelm, 2021, S. 341). Sie zeigen, dass es im deutschen Sprachraum keine Lernumgebung gibt, die spezifisch für Gymnasiast:innen mit wenig Affinität zum MINT-Bereich konzipiert ist. In der vorliegenden Arbeit wird angestrebt, besonders für diese Lernenden die Einstellungen und Vorstellungen in ein Gleichgewicht zu bringen mit den Anforderungen und Konzepten der Fachwissenschaft, so wie es das Modell der Didaktischen Rekonstruktion von Kattmann et al. (1997) fordert.

2 Wissenschaftliche Hintergründe

Eine Basis dieser Arbeit ist die Physik. Dies ist einerseits die Quantenphysik der Materie, die nichtrelativistisch Quantenmechanik (QM), von der der Quantenchemiker Primas sagt: «Die Quantenmechanik ist eine vollständige und umfassende Theorie der Materie, sie ist in ihrer modernen Formulierung vom atomaren bis zum nichtkosmologischen makroskopischen Bereich universell gültig» (Primas, 1990, S. 229). Andererseits ist es die Quantenphysik des Lichts, die Quantenelektrodynamik (QED), die der Quantenhistoriker Hund beim «Komplizierten» auflistet (Hund, 1972). Diese Theorien führen zu überraschenden Vorhersagen, die experimentell bestens bestätigt werden, etwa, dass die Realität nicht lokal ist (z. B. Kiefer, 2015). Die Erkenntnisse der QM sind oft kontra-intuitiv (Bell, 1990). Ein Beispiel ist die Ununterscheidbarkeit der Quantenobjekte: Helium-Atome können zwar gezählt, aber nicht nummeriert werden. Solche Erscheinungen bloss als «Skurrile Quantenwelt» (Arroyo, 2007) zu bezeichnen, ist weniger hilfreich als ein Blick in die Entwicklungsgeschichte, wie er z. B. in «Quantenmechanik – Ein Grundkurs über nichtrelativistische Quantentheorie» zu finden ist (Straumann, 2013). Dort wird deutlich, dass die Grundkonzepte der Quantenphysik zu ungeklärten philosophischen Fragen führen, die auch im Gymnasium die Offenheit von Wissenschaft zeigen können: «Über Auswege aus dieser grundsätzlichen Schwierigkeit [mit dem Messproblem] ist unendlich viel geschrieben worden; weitere Beiträge dazu bewirken in der Regel nur eine Zunahme der allgemeinen Konfusion» (Straumann, 2013, S. 389). Eine grosse Hürde bildet die anspruchsvolle Mathematik. Haroche & Raimond (2006, S. 12) glauben: «In order to access this description [of Nature by quantum physics], one must abandon inadequate images and immerse oneself in the mathematical framework, which is elegant and simple.» Während es möglich scheint, Konzepte der Quantenphysik im Gymnasium vermitteln zu können ohne tief «in den eleganten Rahmen der Mathematik eintauchen zu müssen», bleibt die Herausforderung «nicht adäquate Bilder aufgeben zu müssen».

Die zweite Basis dieser Arbeit sind Erkenntnisse der Physikdidaktik hinsichtlich Schüler-Vor- und -Einstellungen. Die Entwicklung der vor dem Unterricht oft diffusen Schülervorstellungen in Richtung fachwissenschaftlicher Konzepte ist in der konstruktivistischen Lerntheorie zentral (Labudde, 2000, Fischler et al., 2018). Idealerweise könnten dazu Schülervorstellungen bewusst gemacht und als Ressource für Konzeptwechsel benutzt werden (Schecker et al., 2018). Der empirische Befund einer Metastudie zeigt die unterschiedliche Zugänglichkeit von Licht und Materie: «Students showed less difficulty assigning both wave and particle behaviour to light than to electrons» (Krijtenburg-Lewerissa et al., 2017, S. 3). Hintergrund dieser Eigenheit sind die unterschiedlich ausgeprägten Vorstellungen der Lernenden: diffus zum Licht einerseits, eindeutig festgelegt zur Materie andererseits, wie folgende Quellen belegen: «Auch in ihrer kognitiven Denkweise sind die Schüler durch den vorangegangenen Unterricht geprägt. (...) So lassen Schüler bei Fragen zum Licht (...) mehrere Erklärungsmuster widerspruchsfrei zu» (Lichtfeldt, 1992, S. 180). «The reviewed literature

showed that students have a range of different visualizations of photons (...). Research showed that many secondary and undergraduate students erroneously see (...) photons as bright spherical balls with a definite position» (Kritenburg-Lewerissa et al., 2017, S. 3). «Die Struktur und der Aufbau der Materie zeigt sich in den Vorstellungen der Schüler ganz von der mechanisch-materiellen Seite. Die täglich immer wieder erlebte makroskopische Welt wird bis in den Mikrokosmos übertragen», findet Lichtfeldt (Lichtfeldt, 1992, S. 141). Dazu passt der Befund von Müller und Schecker (Müller & Schecker, 2018, S. 212): «Das Bohr'sche Atommodell bzw. das Planetenmodell des Atomkerns [sic!] ist die eindeutig dominante Schülervorstellung zu Atomen». Viele Vorstellungen, die die Lernenden in die Sekundarstufe II mitbringen, sind aus Sicht der Fachwissenschaft zu korrigierende Fehlvorstellungen. Die Herausforderung, mehrstufige Konzeptwechsel in Gang zu bringen, wird erschwert durch das bei vielen Nicht-MINT-Lernenden geringe Interesse für Physik, das die MUPET-Studie «Mathematik- und Physikentwicklung unter Berücksichtigung der Technik» dokumentiert (Dreyer, 2015). Schon im 9./10. Schuljahr ($N = 4000$) ist das Interesse an Physik das tiefste von allen obligatorischen Fächern, und dies ausgeprägt bei den Mädchen und Frauen. Das ändert sich bis zum 12./13. Schuljahr nicht (loc. cit., $N = 2000$). Die Motivierung der Lernenden für Quantenphysik ist demnach neben den Konzeptwechseln eine grosse Herausforderung bei der Entwicklung einer praxistauglichen Lernumgebung.

Gelingt es, eine Brücke zu schlagen zwischen den zwei weit voneinander entfernten Grundlagen, der Quantenphysik einerseits und den Vorstellungen und Vorlieben der Lernenden andererseits? – Der Zürcher Quantenpionier Heitler war skeptisch: «Es ist ein Vergehen an jungen Menschen, ihnen etwas beibringen zu wollen, was sie unmöglich verstehen können, oder, um es verständlich zu machen, es falsch darzustellen» (Heitler, 1973, S. 256). Dass kaum Quantenphysik im Grundlagenfach unterrichtet wird, scheint Heitler Recht zu geben. Andererseits fordert das neue Maturitätsreglement in Artikel 6, Abs. 4 unverändert: «[Maturandinnen und Maturanden] finden sich in ihrer natürlichen, technischen, ökonomischen, gesellschaftlichen und kulturellen Umwelt zurecht, in Bezug auf die Gegenwart, die Vergangenheit und die Zukunft und auf schweizerischer und internationaler Ebene.» (MAR, 2023). Auch die Absolvierenden der Nicht-MINT-Schwerpunkte werden mit Quantensprüngen und Quantencomputern, mit «Quantenreligionen» oder «Quantenheilungen» konfrontiert. Eine Auseinandersetzung mit Quantenphysik trägt demnach sowohl zur Hochschulpropädeutik als auch zur Orientierung in der kulturellen Umwelt bei. (Mehr in Dreyer, 2022.)

In dieser Arbeit wird davon ausgegangen, das Modell der Didaktischen Rekonstruktion (Kattmann et al., 1997) ermögliche den Brückenschlag zwischen der Physik und den Lernenden. Es sei geeignet, folgende Ziele zu erreichen:

- *Ziele:* Erstens die Entwicklung und zweitens die Evaluierung einer didaktisch rekonstruierten Lernumgebung zur Quantenphysik für das gymnasiale Grundlagenfach in den Klassenstufen 10 bis 12. Für den Weg zu diesem Ziel, der im Kapitel 4 dargelegt wird, ist die folgende *Arbeitshypothese* bedeutsam: Das historisch erfolgreiche, heuristische Prinzip der Welle-Teilchen-Dualität bietet eine Sprech- und damit eine Lernhilfe.

Durch das Entwicklungsergebnis und seiner Evaluierung sollen die drei Forschungsfragen geklärt werden.

- *Forschungsfrage 1:* Welche Strukturen und welche Elemente besitzt eine didaktisch rekonstruierte Lernumgebung zur Quantenphysik, die sich spezifisch an Nicht-MINT-Lernende richtet?

- *Forschungsfrage 2:* Wie verändern sich die Vorstellungen von Gymnasiastinnen und Gymnasiasten zum Licht, zum Atom und zu NoS-Elementen beim Arbeiten mit dieser Lernumgebung?

- *Forschungsfrage 3:* Wie weit hilft das heuristische Prinzip der Welle-Teilchen-Dualität beim Lernen von Quantenphysik?

3 Didaktische Rekonstruktion von Quantenphysik für das Gymnasium

Die Fachwissenschaft liefert nicht ohne Weiteres den Zugang. Pais (1986, S. 141) klagt: «Es scheint mir, diese Kinematik [Relativitätstheorie, wie sie Einstein 1905 publizierte], könnte und sollte in der Sekundarstufe II unterrichtet werden als das einfachste Beispiel dafür, wie die Wege der modernen Physik die Alltagsvorstellungen überschreiten. Wenn ich nur eine ähnliche Empfehlung für den Fall der Quantentheorie machen könnte ...» – Hier beginnt die Didaktik.

3.1 Das Modell der Didaktischen Rekonstruktion und seine Umsetzung

Bei den «Methoden in der naturwissenschaftsdidaktischen Forschung» wird die didaktische Rekonstruktion als ein Beispiel für «Designforschung» und als «langfristiges Forschungsprogramm» vorgestellt (Wilhelm und Hopf, 2014, S. 34). Hier wird gezeigt, dass Didaktische Rekonstruktion auch im knappen Rahmen einer Dissertation sowohl zu einem konkreten Produkt als auch zu Beiträgen zur Didaktik führen kann.

Ausgangspunkt der Didaktischen Rekonstruktion nach Kattmann, Duit, Gropengiesser und Komorek ist das fachdidaktische Triplet «fachliche Klärung – Erfassen von Schülerperspektiven – didaktische Strukturierung» mit der Zusatzforderung: «Im Modell der Didaktischen Rekonstruktion werden fachliche Konzepte und Schülervorstellungen gleichwertig behandelt. Die Vermittlung von Wissensbeständen und die damit verbundenen pädagogischen Aspekte werden in ein Gleichgewicht gebracht.» (Kattmann et al., 1997, S. 6). Zum Prozess einer Didaktischen Rekonstruktion gehören demnach drei unterschiedliche Aufgaben mit drei unterschiedlichen Arbeitsweisen:

- (1) Die analytische Klärung und didaktische Reduktion des massgeblichen Wissens der Fachwissenschaft;
- (2) die empirische Untersuchung von Vorwissen und Vorstellungen der Lernenden und der Lernprozesse;
- (3) das konstruktive Zusammenbringen von anschlussfähigen Elementen der Wissenschaft mit Vorstellungen und Vorwissen der Lernenden und das kreative Verschmelzen zu einer Lernumgebung (loc. cit. S. 10).

Diese drei Arbeiten sollen nicht sukzessive, sondern in Wechselwirkung durchgeführt werden: Die Analyse der Quantenphysik muss unter dem Gesichtspunkt erfolgen, dass es um Allgemeinbildung für Nicht-MINT-Lernende im Gymnasium geht. Die Untersuchung der Perspektive der Lernenden soll sich nicht auf den Physikunterricht beschränken, sondern auch Nachbarfächer einbeziehen und die schulischen Rahmenbedingungen beachten. In 3.1.1 werden die Schritte skizziert, die in dieser Synthese durchlaufen werden. In 3.1.2 werden die systemischen Randbedingungen zusammengestellt, die es dabei zu beachten gilt. In 3.1.3 wird erläutert, inwiefern das Ergebnis der Rekonstruktion sich von anderen Lernwegen abhebt. Im Abschnitt 3.2 werden Ergebnisse empirischer Untersuchungen zu den Vorkenntnissen und den Vor- und Einstellungen der Lernenden zusammengefasst. In 3.3 steht die Physik mit der Welle-Teilchen-Dualität im Zentrum. In 3.4 wird der Begriff «Nature of Science» erläutert und seine Bedeutung für die gymnasiale Bildung skizziert. Wie erwähnt, muss die Umsetzung des Modells rekursiv erfolgen. Aufbauend auf Erprobung und Evaluation, wird das Ergebnis immer weiterentwickelt. Dieser Prozess wird erst in 5.1.1 skizziert.

3.1.1 Zum Entwicklungsprozess: Leitlinien – Leitideen – Lernwege

Das primäre Ziel ist die Entwicklung einer schultauglichen Lernumgebung zur Quantenphysik für das obligatorische Grundlagenfach des Gymnasiums. Die Lernumgebung soll aus didaktisch strukturierten Unterrichtselementen bestehen, die anschlussfähiges wissenschaftliches Wissen und die Lernenden mit ihren Vorstellungen zusammenbringen (Komorek et al., 2013, S. 43). Sie soll dabei die Erkenntnisse beachten, die zusammengetragen worden sind aus der analytischen Klärung und didaktischen Reduktion der Physik, aus den empirischen Untersuchungen über Vorwissen und Vorstellungen der Lernenden und aus den schulischen Rahmenbedingungen. Diese verschiedenartigen Erkenntnisse wurden für die FACETTEN DER QUANTENPHYSIK in einem ersten Schritt zu 32 Folgerungen konzentriert, die zusammen mit einigen Leitlinien in weiteren Schritten zu den Leitideen führten. Als Beispiele sind hier drei Folgerungen und eine Leitlinie für die Lernumgebung aufgelistet:

- *Folgerung 1.2:* Die Auseinandersetzung mit Konzepten wie Dualität, Akausalität, Nichtlokalität usw. ist wegen ihrer «unerhörten» philosophischen Konsequenzen allgemeinbildend.

- *Folgerung 2.5:* Die Lernenden verwechseln meist das Planetenbild des Atoms mit der Realität. Das sogenannte «Bohr-Modell ist schwer zu erschüttern, weil es auf dem Teilchenkonzept basiert und daher anschaulich ist.

- *Folgerung 3.11:* Mit wachsender Einsicht in die Quantenphysik spielt die Welle-Teilchen-Dualität eine abnehmende Rolle.

- *Leitlinie H:* Im Zweifelsfall ist die Sprache präziser als das Bild und verständlicher als die Mathematik.

Das Verschmelzen von Folgerungen und Leitlinien führt zu den Leitideen, die in 4.1.2 und 4.1.3 vollständig aufgelistet sind. Diese sind sowohl für die Lehrenden als auch für die Lernenden zentral, und nach ihnen richten sich die Tests aus. Leitideen sind Fixpunkte im Lernweg, der den Lehrenden (5.2.1 und 5.3.1) und den Lernenden bewusst gemacht wird: «Wir vermuten bereits, dass auch das Elektron ein Quantenobjekt ist. Wir stellen uns die Aufgabe, die neue Mechanik zu verstehen, der das Elektron gehorcht. Diese Quantenmechanik, gilt nicht nur für Elektronen, sondern auch für Neutronen, Atome usw. Wir wählen den Einstein-Bohr-de Broglie-Schrödinger-Born-Weg für den Zugang, denn so können wir auf dem uns bekannten Prinzip der Dualität aufbauen.» (Einstieg in Modul 2, wo es um die Quantenphysik der Materie geht.)

Die Leitideen führen zu den Konzepten, die in den entsprechenden Test-Konstrukten in unterschiedlicher Ausprägung konkretisiert und für die Physikdidaktik – und teilweise für Lehrpersonen – von Interesse sind (vgl. 5.2.2).

3.1.2 Zum Entwicklungsprozess: Systemische Rahmenbedingungen

Zentral für die Ausarbeitung der Lernumgebung ist die vom Schulsystem zur Verfügung gestellte Unterrichtszeit. Die Stundentafeln der Kantone und ihrer Schulen variieren stark (vgl. 4.1.1). Die Lehrpersonen bestimmen letztlich mit der Gewichtung der vielen übrigen Teilgebiete der Physik, wie viel Unterrichtszeit effektiv noch für Quantenphysik zur Verfügung steht. Nicht zu unterschätzen sind auch die Anforderungen des Systems hinsichtlich juristisch haltbarer Leistungsnoten. Gebiete mit einem breiten Spektrum von Aufgaben (klassische Dynamik, Gleichstromlehre usw.) werden aus schulpraktischen Gründen oft bevorzugt. In der Quantenphysik Leistungsnoten zu erteilen ist eine Herausforderung (vgl. 5.1.3). Im Notenspektrum kommt nur teilweise zum Ausdruck, dass das Modell der Didaktischen Rekonstruktion nicht davon ausgeht, dass mit dem Durcharbeiten der Lernumgebung die individuellen Lernwege automatisch und vollkommen zu den angestrebten Konzeptwechseln führen (Kattmann et al., 1997, S.7): «Es hat sich nämlich in einigen Untersuchungen gezeigt, dass nicht allein die vorunterrichtlichen Vorstellungen zu den zu vermittelnden naturwissenschaftlichen Inhalten das Lernen in Gruppen beeinflussen; neben diesen stellen auch die soziale und materiale Situation Kontexte für die Konstruktion von Wissen dar».

3.1.3 Zum Entwicklungsprozess: Reduktion und Rekonstruktion

Reduktion der Themen ist Voraussetzung für die Rekonstruktion einer gymnasialen Quantenphysik. Ganze Gebiete, wie die semiklassische QM von Sommerfeld (1919-1944), die Matrizenmechanik (Heisenberg, 1925) oder die QED (Feynman, 2018) finden ebenso wenig Raum in den FACETTEN, wie einzelne, wichtige Experimente, etwa Franck

& Hertz (1914) oder Duane & Hunt (1915). Die Schrödingergleichung (Schrödinger, 1926) und Heisenbergs Unbestimmtheitsrelationen (Heisenberg, 1927) sind für Nicht-MINT-Lernende mathematisch äusserst anspruchsvoll, können erst Modul 3 aufgenommen werden und werden daher in dieser Arbeit nur am Rande erwähnt (siehe 4.1.1).

Die Spezifika der hier entwickelten Lernumgebung werden im Vergleich mit den sechs Gruppen von Lernwegen, die Müller und Wilhelm aufzählen, deutlich (Müller und Wilhelm, 2021, S. 341):

(1) Die FACETTEN führen nicht zu «traditionellem Unterricht» (Fischler, 1992), obwohl historische Entwicklungen auf Lernschwierigkeiten hinweisen. Sie beginnen mit dem Strahlungsgesetz, überspringen den Franck-Hertz-Versuch und den Compton-Effekt, diskutieren und kritisieren hingegen ausführlich Bohrs Atommodell (Bohr, 1913) und benutzen und hinterfragen die Welle-Teilchen-Dualität auch bei de Broglies Materiewellen.

(2) Sie liefern keine «Quantenphysik ohne Bohr», obwohl das Bewusstmachen der diesbezüglichen Lernschwierigkeiten eine wichtige Leitlinie ist. Die FACETTEN beginnen mit der Quantenphysik des Lichts, vermeiden aber das Photon und damit ein einseitiges Teilchenbild des Lichts (Lichtfeldt, 1992). Sie stellen Bohrs Atommodell in den historischen Kontext, bewerten es und führen als Beleg für den Wellenaspekt des Elektrons auch den Tunneleffekt an.

(3) Es geht in den FACETTEN nicht darum «Atomzustände numerisch» zu erfassen, obwohl die Wellenfunktion ψ thematisiert und der 1s-Zustand quantitativ angegeben werden. Die Lernumgebung betont, dass Quantenobjekte nicht anschaulich sind und diskutiert den Modellbegriff grundsätzlich. Sie stellt die Entwicklung einer neuen Mechanik für das Atom ins Zentrum, benutzen Spektrallinien nur am Rand und numerische Methoden gar nicht.

(4) Die FACETTEN wollen nicht primär «Wesenszüge der Quantenphysik» (Müller, 2003) herausarbeiten, obwohl sie die Unterschiede zur klassischen Physik sowohl beim Licht als auch beim Elektron klären und Schrödingers Katze samt Dekohärenz thematisieren. Anwendungen, etwa beim Treibhauseffekt und beim Atom, sind für Nicht-MINT-Lernende motivierender als abstrakte Wesenszüge.

(5) Die FACETTEN bieten auch nicht bloss eine vorbereitende «Quantenphysik für Klasse 10» (Schorn, 2011), obwohl das Modul 1 in Klasse 10 eingesetzt werden kann. Dieses bringt einen ersten, abgeschlossenen Einblick in die semiklassische Quantenoptik, führt zur Erkenntnis der Nicht-Anschaulichkeit von Quantenobjekten und erläutert das Verhältnis von Physik und Technik als einer Dimension von Nature of Science.

(6) Gar nicht geht es um «Quantenphysik mit Zeigern» (Küblbeck und Müller, 2002). Der Wellenaspekt wird ausführlich erläutert, die Phasenlage wird aber nicht eingeführt. Der Fokus liegt in den FACETTEN nicht auf einem Formalismus, sondern auf qualitativen Erklärungen der Phänomene bei Wechselwirkung zwischen Strahlung und Materie.

3.2 Zu den Lernenden: Vorkenntnisse, Vorstellungen und Einstellungen

Das alltägliche Geschehen im Physikunterricht findet vor grandiosen Bühnenbildern statt. Im Kapitel zur Physik des bisherigen schweizerischen Rahmenlehrplans für die Maturitätsschulen steht (RLP, 1994, S. 105): «Der Physikunterricht vermittelt exemplarisch Einblick in frühere und moderne Denkmethode und deren Grenzen. Er zeigt, dass Physik nur einen Teil der Wirklichkeit beschreibt und einer Einbettung in die anderen dem Menschen zugänglichen Betrachtungsweisen bedarf, weist aber gleichzeitig physikalisches Denken als wesentlichen Bestandteil unserer Kultur aus.» Es ist bemerkenswert, dass der ab August 2024 gültige neue Rahmenlehrplan Elemente der Quantenphysik im Grundlagenfach schlichter, aber verpflichtend vorschreibt (EDK, 2024, S. 81): «Maturandinnen und Maturanden können an Beispielen den Teilchencharakter (sic!) des Lichts erklären.»

Was aber sagen die Lernenden? Wollen Gymnasiastinnen und Gymnasiasten diese Einblicke? Sind sie in der Lage, das physikalische Denken in ihr Denken einzubetten? Und wenn Ja: Wie gelingt es einer Lernumgebung, solch wesentliche Bestandteile der Kultur nicht nur zu transportieren, sondern auch einzupflanzen? – Auf solche Fragen lassen sich nur statistische Antworten geben, denn die Lernenden bilden ein breites Spektrum von Individuen.

Die Vorkenntnisse der Lernenden sind durch die kantonalen oder schulinternen Lehrpläne klar bestimmt – zumindest im Prinzip, denn in Realität lassen die Lehrpläne den Lehrpersonen viele Freiheiten (Eberle et al., 2008). Im Schulalltag ist immer auch das Leistungsspektrum zu berücksichtigen, das in der Physik noch grösser ist als in der Mathematik. Als Konsequenz davon sind die mathematischen Anforderungen in den FACETTEN niedrig angesetzt, und physikalische Begriffe wie Energie und Ladung werden möglichst anhand von Musterbeispielen reaktiviert.

Die Vorstellungen der Lernenden sind ein breites Forschungsfeld. Empirische Untersuchungen zeigen, dass nicht nur der Unterricht in Quantenphysik, sondern auch der zur Mechanik, Optik usw. die angestrebten Kompetenzen, Konzeptwechsel und weitere Ziele nur unvollständig erreicht. Einen Überblick über die Schülervorstellungen im Bereich der gymnasialen Physik gibt der Sammelband «Schülervorstellungen und Physikunterricht» von Schecker et al. Die Schülervorstellungen in Quanten- und Atomphysik nehmen dort viel Raum ein (Schecker et al., 2018, S. 209-242).

Für die Strukturierung der FACETTEN war der Befund der in Kapitel 2 erwähnten Metastudie von Krijtenburg et al. wesentlich (Krijtenburg-Lewerissa et al., 2017, S. 3): «Students showed less difficulty assigning both wave and particle behavior to light than to electrons». Die Didaktik fordert demnach, dass die Quantenphysik des Lichts vor derjenigen der Materie entwickelt werden soll. Diese Übereinstimmung der Reihenfolge mit derjenigen der historischen Entwicklung ist also nicht blosses Gewohnheit oder Tradition, wie oft behauptet wird (vgl. Brachner & Fichter, 1977).

Speziell zum Licht gilt immer noch der Befund von Lichtfeldt (1992, S. 180): «Auch in ihrer kognitiven Denkweise sind die Schüler durch den vorangegangenen Unterricht geprägt. (...) So lassen Schüler bei Fragen zum Licht (...) mehrere Erklärungsmuster widerspruchsfrei zu.»

Für die Ausgestaltung der Lernumgebung zur Quantenphysik der Materie war ein Befund wegleitend, den Müller und Schecker knapp formulieren: «Das 'Bohrsche' Atommodell ist die eindeutig dominierende Schülervorstellung» (Schecker et al., 2018, S. 218). Dementsprechend erhalten Entstehung, Inhalt und Kritik des Bohrschen Atommodells viel Raum. Speziell zum Elektron hält Schorn fest (Schorn, 2014, S. 50): [Verbreitet sind]

- (1) das klassische Teilchenbild [des Elektrons als] eines massiven Punkt-Teilchens,
 - (2) die dualistische Sichtweise, bei der dem Elektron der klassische Teilchen- sowie der Wellenaspekt gleichermaßen und gleichzeitig zugewiesen werden,
 - (3) die Interpretation des Wellencharakters von Elektronen als einer wellenförmigen Ausbreitung,
 - (4) die Vorstellung, dass sich Quantenobjekte entlang einer wohldefinierten Bahn bewegen.
- Solche Vorstellungen zum Elektron zu überwinden, bedeutet einen besonders anspruchsvollen Konzeptwechsel. Hopf und Wilhelm nennen vier Bedingungen für erfolgreiche Konzeptwechsellansätze (Schecker et al., 2018, S. 28):
- (1) Die Schülerinnen und Schüler müssen mit ihrem vorhandenen Konzept unzufrieden sein.
 - (2) Das vorgestellte neue Konzept muss wenigstens bis zu einem gewissen Grad verstanden sein.
 - (3) Das neue Konzept muss intuitiv einleuchtend erscheinen.
 - (4) Das neue Konzept muss auf neue Situationen und Phänomene übertragbar und dort hilfreich sein.

Die mit dem Zufall verbundenen Lernschwierigkeiten müssen bei der Quantenphysik besonders berücksichtigt werden (Schecker et al., 2018, S. 230): «Für Jugendliche ist es darüber hinaus besonders schwierig, den Aspekt von Gesetzmässigkeit ('Zerfallsgesetz') mit zufälligen Ereignissen ('Ein Kern zerfällt zufällig') in eine konsistente Verbindung zu bringen. (...) Zudem unterscheiden Schülerinnen und Schüler zwischen der Welt der physikalischen Theorie und der 'realen Welt'. In der Theorie gelte die strenge Kausalität, während es in der Praxis selbst im Labor durch unkontrollierbare Einflüsse zu Zufallsereignissen kommen könne.» Dementsprechend wird der Zufall in den FACETTEN sowohl im Theorieteil als auch in Experimenten aufgegriffen.

Während die beobachteten Schülervorstellungen universell sind, hängen die Einstellungen der Lernenden stark von ihrem sozialen Umfeld ab. Das Ergebnis seiner Überblick-Studie veranlasste Merzyn zur Frage: «Naturwissenschaften Mathematik Technik – immer unbeliebter?» (Merzyn, 2008). Wo, wann und wie immer empirische Untersuchungen zu Fachinteressen gemacht wurden, Physik landete zusammen mit Chemie und Mathematik auf den hintersten Rängen. Studien zum Physikinteresse in der Schweiz hat Labudde zusammengestellt (Labudde, 2000, S. 141-154) und erweitert (loc. cit., S. 215). Er hat das Augenmerk besonders auf die Genderabhängigkeit gelegt. Die neueste und differenzierteste Dokumentation der Interessen im MINT-Bereich der Schweizer Gymnasien liefert die MUPET-Studie «Mathematik- und Physikentwicklung unter Berücksichtigung der Technik» (Dreyer, 2015). Im 9./10. Schuljahr antworteten rund 4000, im 12./13. Schuljahr rund 2000 Gymnasiastinnen und Gymnasiasten aus der ganzen Schweiz auf verschiedene Fragen. Die Studie bestätigte einerseits das im Mittel geringe Interesse der Lernenden an der Physik, und andererseits die breite Streuung und die Genderabhängigkeit. Diese Befunde waren eines der Motive für die vorliegende Arbeit. Ausschlaggebend sind die Mädchen und Frauen. In Physik ist der Gendergap gross, etwa gleich wie in Französisch, aber mit umgekehrtem Vorzeichen. Bei der MUPET-Befragung hatte etwa die Hälfte der Lernenden noch keinen Physikunterricht erhalten. Trotzdem platzieren sie Physik auf dem letzten Rang der obligatorischen Fächer (Dreyer, 2015, S. 10). MUPET zeigte auch den grossen Interessensunterschied zwischen den Lernenden in MINT- und in Nicht-MINT-Schwerpunkten. Der Interessens-Problematik begegnen die FACETTEN einerseits damit, dass sie sich durch die Themenwahl bewusst an weibliche Nicht-MINT-Lernende richten und indem sie andererseits der Lehrperson Zusatzmaterialien für besonders Interessierte in die Hand geben.

3.3 Quantenphysik für das Grundlagenfach

Unter den gegebenen Rahmenbedingungen muss das riesige Gebiet der Quantenphysik (der Festkörper, der Felder usw.) auf wenige Teile reduziert werden. Eine erste Reduktion zeigt der Umfang des Buchs «Theoretische Physik für Studierende des Lehramts 1 – Quantenmechanik» (Schmüser, 2012). Die Namensgebung der in Kapitel 4 vorgestellten Lernumgebung FACETTEN DER QUANTENPHYSIK soll diese starke Beschränkung bewusst machen.

«Wie nicht anders zu erwarten war, pendelte die Diskussion [über Quantenphysik am Gymnasium] zwischen dem traditionellen Welle-Teilchen-Dualismus einerseits und der Behandlung niederdimensionaler Zustandsräume andererseits. Für beide Zugänge gibt es gute Gründe» (Fink, 2023, S. 60). Die guten Gründe liefern die Lernenden.

Lernende, die einen MINT-Schwerpunkt wählen, zeigen intrinsisches Interesse an den Naturwissenschaften und/oder an technischen Anwendungen. Sie sind der Mathematik und der Informatik zugeneigt und werden verstehen wollen, wie ein Quantencomputer mit seinen Q-Bits Probleme lösen kann. Für sie mag die «Behandlung niederdimensionaler Zustandsräume» der geeignete Weg sein, denn er ist wissenschaftsorientiert (Müller, 2024).

Für die Lernenden, die Sprachen oder Wirtschaft, Musik oder Gestalten, Pädagogik oder Sport wählen, soll Quantenphysik ein Beitrag zur Allgemeinbildung sein. Ihr Zugang zur Quantenphysik wird über den «traditionellen Welle-Teilchen-Dualismus»-Weg führen, denn er erlaubt motivierende Bezüge über den naturwissenschaftlich-technischen Bereich hinaus (vgl. 3.4).

3.3.1 Welle-Teilchen-Dualität: ein Zankapfel der Physikdidaktik

Die hier als Scaffolding-Element (Reiser, 2004) benützte Welle-Teilchen-Dualität war lange ein Zankapfel in der Physikdidaktik: Im Kapitel «Teilchen und Wellen» seiner Quantenphysik formuliert Schmüser den unumstrittenen, aber kontraintuitiven Sachverhalt so (Schmüser, 2012, S. 4): «Die Quantentheorie beschreibt das Verhalten von Teilchen und Licht auf einer atomaren Grössenskala. Dabei treten neue Phänomene auf, die unserer täglichen Anschauung widersprechen: Lichtwellen verhalten sich so, als ob sie aus Teilchen aufgebaut seien, und Teilchen [Elektronen, Neutronen usw.] zeigen Welleneigenschaften.» Quantenobjekte sind nicht «an und für sich», sondern zeigen, je nach Untersuchungsart, Teilchen- oder Wellenverhalten oder sogar von beidem etwas. Dieser Sachverhalt wird in der Fachwissenschaft immer wieder bestätigt und sogar quantitativ erfasst, etwa im Experiment «Quantitative complementarity of wave-particle duality» (Yoon & Cho, 2021). Er wird mit dem Begriff «Welle-Teilchen-Dualität» bezeichnet.

Im deutschen Sprachraum wird in der Physikdidaktik meist mit dem Begriff «Dualismus» operiert. «Dualismus» bezeichnet allgemein eine Lehre, die zwei Grundprinzipien des Seins annimmt, meint das Wörterbuch von Wahrig (Wahrig, 2002). «Dualismus» täuscht vor, es gehe um ein ganzes und systematisches Erklärungsnetzwerk. Das ist hier nicht der Fall, aber vielleicht ein Grund für den merkwürdigen Vorschlag im «Handbuch der Physikdidaktik»: «Da jede Vorstellung von Quantenobjekten irgendwo ihre Grenzen hat, bleibt noch die Alternative, sich gar keine Vorstellung zu machen, wie in der Kopenhagener Interpretation» (Küblbeck, 2015, S. 489). Das Handbuch schlägt vor: «Während es sehr schwierig ist, sich die Quantenphänomene selbst vorzustellen, kann man die in der Schule verwendeten Formalismen [für die Phase] selbst anschaulich für die Schüler vorstellen» (Küblbeck, 2015, S. 492).

Es ist schwer zu glauben, die zu mathematischen Formalismen gehörigen Vorstellungen seien für die Lernenden passend und hilfreich im Umgang mit den kontra-intuitiven Erscheinungen der Quantenobjekte. Als hilfreich erweist sich hingegen ein Blick auf die historische Entwicklung von Bildern und Konzepten in der Fachwissenschaft, die auch Anknüpfungspunkte für NoS liefern (vgl. 3.4).

Der Widerstand gegen den Dualismus und die geringe Bereitschaft, die unproblematische und in der englischsprachigen Literatur verbreitete «duality» als «Dualität» zu übernehmen, lässt sich historisch festmachen: Als 1963 Feynmans «Lectures» samt Band III zur Quantenphysik mit dem 2. Kapitel «The Relation of Wave and Particle Viewpoints» erscheinen, ist die Rolle der Dualität noch klar (Feynman et al., 1965). Doch dann publiziert Landé, ein Quantenphysiker der ersten Generation, in den USA die Darstellung «Quantum Theory without Dualism» (Landé, 1966). Zwar zerpflückt sein früherer Lehrer Born deren Argumentation und stellt fest: «[A] discussion ‘dualism or nondualism’ is superfluous» (Born & Biehm, 1968). Dualität sei bloss ein heuristischer Gesichtspunkt, der sich als hilfreich erwiesen habe und kein «grundlegendes Prinzip». Trotzdem behaupten ein Jahrzehnt später Brachner und Fichtner in ihrem im deutschen Sprachraum einflussreichen Buch «Quantenmechanik für Lehrer und Studenten» (Brachner & Fichter, 1977, S. 7): «Eine Hauptschwierigkeit [beim Unterrichten von Quantenphysik auf der Sekundarstufe II] liegt darin, dass man bisher meist dem historischen Werdegang zu folgen versuchte. Dadurch werden viele, oft nicht mehr aktuelle Schwierigkeiten aus der Vorgeschichte der Quantentheorie in die Schule getragen». Sie behaupten sogar (loc. cit. S. 8): «Es gibt keinen Dualismus und keine Komplementarität». Irritierend ist, dass sie, wie viele andere Autoren von Lehrgängen für die Sekundarstufe II, sich auf die Feynman-Lectures beziehen, die der berühmte Lehrer im Epilog sehr selbstkritisch beurteilt: «I know that two or three dozen of you have been able to follow everything with great excitement. (...) For the others, if I had made you hate the subject, I’m sorry. I never taught elementary [college] physics before, and I apologize.» (Feynman, 1965, S. 21-19).

Die Kritik am Dualismus wird meist mit einer Kritik an den Versuchen verknüpft, «dem historischen Werdegang zu folgen» – was immer das bedeuten mag, denn z. B. Heisenbergs Matrizenmechanik taucht in gymnasialen Lehrgängen nie auf. Obwohl Brachner und Fichter keinerlei empirische Daten für die Diskreditierung des «Folgens des historischen Werdegangs» angeben und die Fachwissenschaft in der skizzierten Weise «duality» weiter benützt, ist der «Dualismus» aus der Physikdidaktik im deutschen Sprachraum verschwunden, mit entsprechenden Folgen für die Physikbücher der Sekundarstufe II, wie Bader klar verkündet: «Eine Quantenwelt ohne Dualismus» (Bader, 1995).

3.3.2 Welle-Teilchen-Dualität in der Fachwissenschaft und als Einstiegshilfe

In der Physik ist die Situation klar: Indem Einstein das Lichtquant postuliert, führt er zusätzlich zum etablierten Wellenaspekt den Teilchenaspekt des Lichts und damit dessen Doppelwesen ein (Einstein, 1905). Damit beginnt die Welle-Teilchen-Dualität. Etwas später findet er bei der Analyse von Energiedichteschwankungen der Wärmestrahlung zwei Summanden (Einstein, 1909): Der erste steht in Übereinstimmung mit dem klassischen Wellenbild der Strahlung; der zweite enthält Plancks Wirkungsquantum und ist nur mit dem Lichtquant, also dem Teilchenaspekt, zu verstehen. Einstein hat damit ein bis heute gültiges, physikalisches Argument für die irritierende Dualität, ein Argument, das auf der Thermodynamik und auf Plancks Strahlungsgesetz beruht. Einstein spricht noch vorsichtig von «Bildern» und von «Strukturen», die *nicht unvereinbar* seien (Einstein, 1909, S. 825): «Ich wollte durch dasselbe [Bild mit Singularitäten im Kraftfeld] nur kurz veranschaulichen, dass die beiden Struktureigenschaften [Undulationsstruktur und Quantenstruktur], welche gemäss der Planck’schen Formel beide der Strahlung zukommen sollen, *nicht als miteinander unvereinbar* anzusehen sind» [Hervorhebung HPD].

Einstein bleibt mit gutem Grund vorsichtig, denn lokalisierte Teilchen und ausgebreitete Wellen schienen für die Physiker damals ebenso unvereinbar, wie für die Lernenden heute. Sarina, 12. Schuljahr, schreibt im Lerntagebuch: «Diese Dualität sprengt die Grenzen meiner Logik, wenn ich mir vorstelle, dass Quanten[objekte] zugleich wellig und körnig

sein können» (mehr in 5.3.5). Einstein selbst betont an der 1. Solvay Konferenz (Pais, 1986, S. 389): «Ich bestehe auf dem provisorischen Charakter dieses Konzepts [der anscheinend teilchenartigen Lichtquanten], das mit den experimentell nachgewiesenen Konsequenzen der Wellentheorie nicht verträglich ist». Planck vertritt den Widerstand der Community gegen eine neuartige Physik mit Dualität in der Aussage, Einstein habe mit den Lichtquanten übers Ziel hinausgeschossen. Der Widerstand fällt erst 1923 mit Comptons Erklärung seines Streuexperimentes in sich zusammen (Compton, 1923). Die Physik-Community akzeptiert das Lichtquant, für das sich bald der Begriff «Photon» durchsetzt. Dieses und damit die Welle-Teilchen-Dualität des Lichts erhalten aber erst mit der um 1950 mit der QED die heute gültige, klare Bedeutung (siehe dazu z. B. Schmüser, 2015, oder Feynman, 2018).

Für Theoretiker scheint um 1920 die Dualität in der Luft zu liegen: Während Louis de Broglie in Paris die Welle-Teilchen-Dualität vom Licht auf das Elektron überträgt (de Broglie, 1924), untersucht Einstein in Berlin die Dichteschwankungen eines materiellen (Bose-Einstein-)Gases analog zu seiner Arbeit von 1909. Er stößt dabei wieder auf zwei Summanden. Während der erste auf den klassischen Teilchenaspekt hinweist, deutet der quantenphysikalische zweite auf einen neuartigen Wellenaspekt der Materie hin. Einstein glaubt, dass es sich «um mehr als um eine blosse Analogie» handle (Einstein, 1925). Damals haben sowohl Ramsauer (Ramsauer, 1921) in Heidelberg als auch Davisson in New York (siehe Trigg, 1984, S. 95) experimentelle Hinweise auf Materiewellen in den Händen, können aber die Daten nicht nutzen, bevor das Konzept «Welle» im Zusammenhang mit Materie gedacht werden darf. Einstein informiert Schrödinger über die Entwicklung und motiviert ihn, eine «Wellenmechanik» zu entwickeln (Schrödinger, 1926). Zwar erweist sich Schrödingers Hoffnung, alles auf Wellen allein zurückführen zu können, als falsch. Doch schon bald klären Borns Arbeiten das Verhältnis von Teilchen- und Wellenaspekt der Materie im Rahmen der QM.

Born überträgt die Situation vom Licht auf die Quantenmechanik der Objekte mit Ruhemasse und entwickelt die heute grundlegende Wahrscheinlichkeitsinterpretation (Born, 1926). Er tut dies in einer Weise, die auch Lernenden einleuchten kann, wie in 4.3.3 ausgeführt wird. Schrödingers «Feldskalar», die ψ -Welle, liefert die Wahrscheinlichkeiten für die Wege von Elektronen. Dass «eine exakte Darstellung der Vorgänge in Raum und Zeit im klassischen Sinn» in der Quantenphysik nicht möglich ist, arbeiten etwas später Heisenberg mit der Unbestimmtheitsrelation (Heisenberg, 1927) und Bohr mit der Komplementarität (Bohr, 1928) deutlich heraus. Heisenberg spricht explizit von den «zwei Bildern», die man sich machen könne und positioniert damit die Welle-Teilchen-Dualität in der Quantenmechanik.

In der Fachwissenschaft wird die Welle-Teilchen-Dualität theoretisch und experimentell bis in die Gegenwart untersucht und weiter geklärt, so dass Kiefer (2015) die aktuelle Sicht folgendermassen zusammenfassen kann: «Beide Bilder [Teilchen- und Wellenbild] werden für das korrekte Ergebnis benötigt. Das ist der Ursprung des Welle-Teilchen-Dualismus, eines heuristischen Prinzips, das für die Entwicklung der Quantentheorie eine wesentliche Rolle gespielt hat, mit Nachwirkungen [...] selbst heute».

Einerseits ist klar, dass die Welle-Teilchen-Dualität eine fachwissenschaftlich legitime Basis für den Einstieg in die Quantenphysik darstellt. Andererseits sind auch ihre Grenzen sichtbar: Die Quantenmechanik und erst recht die Quantenfeldtheorien umfassen auch Konzepte und Aussagen, die nicht mit dieser Dualität beschrieben oder gar verstanden werden können, insbesondere der Spin und die damit verknüpften Regeln der Quantenstatistik. Deshalb lässt sich auch das Pauli-Prinzip, das für die Chemie so wichtig ist, hier nicht integrieren.

Alles in Allem kann die Welle-Teilchen-Dualität beim Einstieg in die Quantenphysik als Scaffolding-Element eine Hilfe bieten, wie ältere und neuere Sekundarstufen II-Lehrgänge zeigen, von Born (1936) bis ReleQuant (2016). In den FACETTEN wird die Welle-Teilchen-Dualität analog zum Begriff «wave-particle duality» der angelsächsischer Physics Education Research Community benutzt. Sie kennzeichnet eine für Quantenobjekte spezifische Eigenschaft. Die Welle-Teilchen-Dualität liefert die grundlegende Struktur der Rekonstruktion in den Modulen 1 und 2. Wie diese Struktur aussieht, wird in den Abschnitten 4.2 und 4.3 ausgeführt.

3.4 Gymnasiale Bildung, ‘Nature of Science’ und Quantenphysik

Die Bildungsaufgabe des naturwissenschaftlichen Unterrichts scheint im deutschen Sprachraum klar (Klein, 1991, S. 118): «Die wichtigste Bildungsaufgabe des naturwissenschaftlichen Unterrichts besteht jedoch darin, an einigen Beispielen das unerhört Neuartige naturwissenschaftlicher Entdeckungen, die aus ihnen folgenden Änderungen überkommener Denkprozesse und die Erkenntnis der dem forschenden Geist gesetzten Grenzen dem Schüler zum Bewusstsein zu bringen». Dieses «unerhört Neuartige» bietet die Quantenphysik unter anderem mit der Welle-Teilchen-Dualität, denn sie fordert den Umgang mit Objekten, die sich der Anschauung entziehen. Die Quantenphysik zeigt mit dem Nicht-Determinismus oder der Unbestimmtheitsrelation die «dem forschenden Geist gesetzten Grenzen». Physik ist eines der obligatorischen Grundlagenfächer im schweizerischen Maturitätsreglement, weil sie einen spezifischen Beitrag zu der gemäss Maturitätsreglement angestrebten «breit gefächerten, ausgewogenen und kohärenten Bildung» (MAR, 2023) liefern kann. Als Grundlagenfach soll die Physik aber explizit nicht auf «eine fachspezifische oder berufliche Ausbildung» (loc. cit.) gerichtet sein. Im neuen Rahmenlehrplan führen die in der Erläuterung der gymnasialen Bildungsziele gemachten Ausführungen zur Kompetenz-Forderung im Grundlagenfach Physik im Abschnitt «Raum, Zeit, Quanten» (EDK, 2024, S. 81): «Die Maturandinnen und Maturanden können an einem ausgewählten Beispiel den Übergang von klassischer zu moderner Physik und den damit verbundenen Paradigmenwechsel skizzieren.»

Im Grundlagenfach Physik geht also nicht nur um die Inhalte, sondern auch um das Wesen der Wissenschaft, um das, was die Physikdidaktik mit «Nature of Science» (NoS) bezeichnet. Den unscharfen Begriff «NoS» umschreibt Ledermann folgendermassen (Lederman, 2006, S. 303): «What is Nature of Science? – The phrase ‘nature of science’ typically reflects to the epistemology of science, science as a way of knowing, of the values and beliefs inherent to scientific

knowledge or the development of scientific knowledge. (...) Beyond these general characterizations, no general consensus presently exists among philosophers of science, historians of science, scientists, and science educators on a specific definition for NoS.» (Siehe auch Flick & Ledermann, 2006.)

Bei der Rekonstruktion der Quantenphysik in den FACETTEN geschieht die Integration von NoS-Elementen dadurch, dass passende Menschen und historische Situationen als Ausgangspunkt oder sogar Mittelpunkt für neue Lerninhalte gewählt wurden. Dazu drei Beispiele:

- 1900 muss Max Planck Energie in minimalen Portionen auftreten lassen, damit er sein Gesetz erklären kann.
- 1905 erkennt Albert Einstein, dass der Fotoeffekt und anderes mit Lichtquanten gut verstanden werden können.
- 1923 gewinnt Louis de Broglie die Überzeugung, Elektronen müssten auch Welleneigenschaften haben.

Wer wissenschaftstheoretische und wissenschaftshistorische Gesichtspunkte in den Unterricht zu integriert, geht allerdings ein Risiko ein. Die Geschichte der Physik ist sehr komplex und wird immer wieder neu geschrieben, wie jede Geschichte. Physikgeschichte für den Unterricht zu nutzen, ist mit vielen Stolpersteinen verbunden und darf nicht zu Fake-History verkommen (Heering, 2010, Passon, 2018). Schon der Start der Quantenphysik bei Planck ist erstaunlich krumm und verwickelt und illustriert nicht nur das Wechselspiel von Experiment und Theorie, sondern auch die Rolle von gedanklichen Spekulationen (Giulini & Straumann, 2000).

Biographische Elemente erlauben die Entwicklung eines adäquaten Verständnisses für die komplexe Wissenschaftsgeschichte und die abstrakte Wissenschaftstheorie. Die wechselseitige Abhängigkeit von Physik und Technik und die wechselseitige Befruchtung von Theorie und Experiment werden in der Lernumgebung zusammen mit den physikalischen Gesetzmässigkeiten deutlich. Damit die Lernenden den Beitrag von NoS bewusst wahrnehmen und daran arbeiten, ist es wichtig, dass die NoS-Elemente substantiell zur Leistungsnote beitragen, etwa durch Klausuren, Vorträge oder Mindmaps usw. Mit den Zusatzmaterialien der FACETTEN können interessierten Lernende verschiedene NoS-Elemente weiter vertiefen. Unter den in der Schweiz vorliegenden Umständen ist expliziter Unterricht zu NoS, wie er von beispielsweise von Flick und Ledermann (2006) gefordert wird, jedoch kaum möglich.

4 Die Lernumgebung FACETTEN DER QUANTENPHYSIK

4.1 Wege und Ziele

Im Kapitel 3 wurden allgemeine Überlegungen zu den als Leitideen formulierten Zielen und den möglichen Wegen, die dorthin führen, angestellt. In diesem Kapitel wird das konkrete Wegnetz FACETTEN DER QUANTENPHYSIK dargestellt. Der Prozess, der zur Version 6 (vgl. Download) geführt hat, wird im Abschnitt 5.1.1 zusammengefasst.

4.1.1 Ein Netz von Wegen

Die wichtigste Ressource, die Unterrichtszeit, ist sehr knapp. Mehr als 10% der Gesamtzeit wird kaum für Quantenphysik eingesetzt werden dürfen. Im Grundlagenfach Physik ergeben sich bei 2 Wochenstunden über 3 Jahre mit 40 Schulwochen total 24 Lektionen. Die Struktur der Lernumgebung muss auch dem Sachverhalt Rechnung tragen, dass die Lehrpläne unterschiedlich offen und die Lehrenden in variierendem Ausmass bereit sind, bisherige Inhalte zugunsten von Quantenphysik wegzulassen. Zweckdienlich ist ein modulares Angebot. Auch der Abschluss nur des ersten Moduls soll sinnvoll sein. Das ganze Angebot ist in Figur 1 dargestellt:

10./11. Klasse	11./12. Klasse	12. Klasse	Ergänzungsfach	
Im obligatorischen Grundlagenfach: gymnasiale Quantenphysik			freiwillig (48 Lektionen)	
«minimal» 8 Lekt.	«ideal» 24-30 Lektionen			
«real» 12-20 Lektionen			(Ziel: Anschluss an Hochschule)	
Modul 1	Modul 2	Modul 3		(Modul 4)
Was ist Licht?	Wo ist das Elektron?	Wie ist die Quantenwelt?		(QM light)
Einfaches zum Licht	Einfaches zur Materie	anspruchsvollere QP		(systematische QP)
Aktivitäten 1	Aktivitäten 2	Aktivitäten 3		
NoS-Ergänzungen				
MINT-Ergänzungen				

Fig. 1. Die Elemente der FACETTEN DER QUANTENPHYSIK für Grundlagen- und Ergänzungsfach

Hier werden nur die Module 1 und 2 ausführlicher dargestellt. Sie sind Basis der Evaluierung, die im Kapitel 5 dargelegt wird. Modul 3 dringt tiefer in die Quantenmechanik und ihre Anwendungen ein, ist mathematisch anspruchsvoller und benützt die Standardabweichung unter anderem bei Heisenbergs Unbestimmtheitsrelation. Für das Ergänzungsfach liegt nur ein Konzept vor: Für die MINT-interessierten Lernenden können die Inhalte der Module 1, 2 und 3 systematisiert, mathematisch auf dem Niveau von Modul 3 dargeboten und mit ausgewählten Themen ergänzt werden. Die Aktivitäten umfassen Übungsaufgaben mit Lösungen und Experimente mit Anleitungen und Zusatzinformationen. Je ein Beispiel dazu wird in den Abschnitten 4.2.2 und in 4.3.2 angegeben. Hier wird nicht ausführlicher darüber berichtet, weil sie nicht separat untersucht worden sind.

Insbesondere zur Binnendifferenzierung wurden die NoS- und die MINT-Ergänzungen entwickelt. Weil sie nicht untersucht worden sind, wird hier nur ihr Inhalt erwähnt. Die Rolle von NoS im Gesamtrahmen des Projekts wurde im Abschnitt 3.4 erläutert. Die NoS-Ergänzungen sind für Lernende mit breiten Interessen gedacht. Die Texte betten die Physik und andere Wissenschaften breiter in den Strom der Kultur ein. Sie umfassen pro Modul rund 25 Jahre und bestehen aus einer Übersicht und einer Reihe von Kurzbiographien mit Anregungen:

PANORAMA 1900 – Die Zeit der Kaiserreiche: Gesellschaft um 1900, Technik und Wissenschaft um 1900; Max Planck, Albert Einstein, Marie Sklodowska Curie, Donna Strickland.

PANORAMA 1925 – Neubeginn nach dem Zusammenbruch: Gesellschaft um 1925, Technik und Wissenschaft um 1925; Niels Bohr, Hertha Sponer, Louis de Broglie, Max Born, Erwin Schrödinger.

PANORAMA 1950 – Im Atomzeitalter: Gesellschaft um 1950, Technik und Wissenschaft um 1950; Lise Meitner, Wolfgang Pauli, Werner Heisenberg, Enrico Fermi, Ida Goddack, Maria Goeppert-Mayer, John Bell.

Für wissenschaftlich Interessierte wurden die MINT-Ergänzungen entwickelt. Die Einheit I (QUANTENOPTIK LIGHT) thematisiert einzelne Photonen und stützt sich teilweise auf fremdes Material, wie Figur 2 zeigt :

MINT-ERGÄNZUNG I.6 Optische Experimente mit 1 Photon-Zuständen

Experimente zur Quantenphysik der Materie, etwa Interferenzen von Elektronen, Neutronen, Molekülen usw., setzten – unter anderem – riesige Vakuumanlagen voraus. Sie sind im Gymnasium unmöglich. Das Gegenstück, Experimente zum Licht, ist auch im Gymnasium möglich. Wie Meyn et al. (2013) von der Universität Erlangen zeigen, gibt es sogar Experimente mit einzelnen Lichtquanten: www.QuantumLab.de. Ein Laser schickt kurzwelliges Licht (405 nm) auf einen speziellen Kristall. In seinem atomaren Übergang entstehen mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit aus einem Lichtquant zwei Quanten mit je der halben Energie (...)

Fig. 2. Ausschnitt aus der «Quantenoptik light», der MINT-Ergänzung zum Modul 1

4.1.2 Ziele des Moduls «Was ist Licht?»

Das Ziel von Modul 1 ist, Nicht-MINT-Lernenden ab dem 10. Schuljahr ein Verständnis für die frühe, semiklassische Quantenphysik des Lichts zu ermöglichen und dabei unter anderem die wechselseitige Beziehung zwischen Physik und Technik zu vertiefen. Als Erkenntnisse an und für sich, aber auch als Voraussetzungen für Modul 2 spielen die Konzepte «Dualität» und «Aspektcharakter» wichtige Rollen. Im Folgenden sind die drei Leitideen (vgl. 3.1.2) von Modul 1 je mit einigen Erläuterungen zusammengestellt:

LEITIDEE 1.1 und angestrebte Konzepte zum Licht allgemein:

«Licht» ist ein Sammelbegriff für das Spektrum von Radio- bis Gammastrahlung.

- Der Begriff «Licht» bezeichnet nicht nur das für das menschliche Auge sichtbare Licht, sondern das gesamte Spektrum der elektromagnetischen Strahlung.
- Licht ist das Spektrum der elektromagnetischen Wellen von langwelliger Radiostrahlung über das sichtbare Licht mit Wellenlängen um 500 nm bis zur kurzwelligen γ -Strahlung.
- Die Beziehung $c = \lambda f$ gilt auch für Lichtwellen. Dabei ist c die Lichtgeschwindigkeit.

LEITIDEE 1.2 und angestrebte Konzepte zum Licht als Quantenobjekt:

Licht zeigt sich «wellig» und «körnig». Licht ist ein Quantenobjekt. Für das Lichtquant gilt Einsteins Beziehung $E = hf$.

- Bei Erzeugung und Verwandlung zeigt sich Licht «körnig», zeigt also Teilchenaspekt. Bei der Ausbreitung zeigt sich Licht «wellig», zeigt also seinen Wellenaspekt. Licht zeigt demnach ein sowohl-als-auch Verhalten.
- Licht ist anders als die vertrauten, gewöhnlichen, sog. klassischen Objekte. Die klassisch unvereinbaren Konzepte «Welle» und «Teilchen» sind beim Licht vereinbar. Einstein sagt mit doppelter Negation, sie seien «nicht unvereinbar».

LEITIDEE 1.3 und angestrebte Konzepte zur Anschaulichkeit von Quantenobjekten:

Licht ist nicht anschaulich. Bilder von Quantenobjekten wirken paradox.

- Quantenobjekte wie das Licht «sind» nicht «an und für sich».
- Quantenobjekte «zeigen Aspekte», die je nach Experiment unterschiedlich sind.
- Quantenobjekte sind nicht anschaulich und können daher nicht ohne Paradoxien dargestellt werden.

4.1.3 Ziele des Moduls «Wo ist das Elektron?»

Das Ziel von Modul 2 ist, Nicht-MINT-Lernenden ab dem 11. Schuljahr einen Einstieg in die Quantenmechanik zu ermöglichen und dabei unter anderem die wechselseitige Beziehung zwischen Theorie und Experiment bewusst zu machen. Als Erkenntnisse an und für sich, aber auch als Voraussetzungen für ein tieferes Eindringen in die Quantenmechanik spielen die Konzepte «Zustand» und «Wahrscheinlichkeitsinterpretation» wichtige Rollen. Im Folgenden sind die vier Leitideen von Modul 2 je mit einigen Erläuterungen zusammengestellt. Einige sich daraus ergebende und zu prüfende Aussagen zum Atom sind in 5.2.1 in Tab. 1b zusammengestellt.

LEITIDEE 2.0 und angestrebte Konzepte zum Atom:

Das Planetenmodell des Atoms ist falsch. Bohrs Atommodell ist dubios und veraltet.

Die Leitidee 2.0 ist die einzige mit einer negativen Aussage. Das Planeten«modell» ist kein Modell im Sinn der Physik. Die weit verbreitete Darstellung (Museen, Medien für die Sekundarstufe I usw.) des Atoms als eines Mini-Planetensystems überträgt vertraute Vorstellungen auf plausible Weise in den atomaren Bereich. Viele Lernende glauben, das Bild sei eine adäquate Darstellung der Wirklichkeit (Schecker et al., 2018). Dieser Glaube muss erschüttert werden. Es muss klar werden, dass kreisende Elektronen strahlen, Energie abgeben und abstürzen, und dass deswegen Bohrs Atommodell keine beliebigen, sondern nur gewisse, nichtstrahlende Bahnen postuliert. Verschiedene Mängel von Bohrs Atommodell werden aufgelistet: das H-Atom wird scheibenförmig und besitzt im Grundzustand einen Drehimpuls, die Elektrodynamik wird teilweise ungültig, eine Elektronenpaarbindung ist nicht möglich (mehr in 4.3).

LEITIDEE 2.1 und angestrebte Konzepte zur Dualität der Materie:

Dualität gilt nicht nur für Licht, sondern auch für Materie. Materie ist auch «wellig». Für Quantenobjekte mit Ruhemasse gilt die Broglies Beziehung $\lambda_{dB} = h/p$.

- Elektronen, Neutronen usw. zeigen sich körnig und wellig, sind also Quantenobjekte.
- Die Dualität des Elektrons erklärt die Stabilität des H-Atoms ohne Umlauf. Das entspricht dem Grundzustand.
- Das Elektron ist überall (mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit) und nirgends (sicher). Atome sind flauschig.

LEITIDEE 2.2 und angestrebte Konzepte zum Zustandsbegriff:

Elektronen sind nicht an einem Ort oder auf einer Bahn $x(t)$, sondern in einem Zustand ψ .

Elektronen – und alle anderen materiellen Quantenobjekte, die häufig kurz, aber einseitig als ‘Teilchen’ bezeichnet werden – sind nicht an einem vorstellbaren Ort x , sondern in einem abstrakten Zustand ψ .

LEITIDEE 2.3 und angestrebte Konzepte zur Wahrscheinlichkeitsinterpretation:

Bohrs Regel verbindet das Wellige und das Körnige der Materie in der Wahrscheinlichkeit: $\psi^2 = w$.

- Über den Ort eines Quantenobjekts lassen sich nur Wahrscheinlichkeitsaussagen machen.
- Nicht in der Form einer Leitidee ausformuliert ist das zusätzliche Ziel, die Lernenden am Schluss mit *Schrödingers Katze* bekannt zu machen. Die Probleme mit der Erweiterung der Zustandsfunktion auf makroskopische Objekte, die Schrödinger zur Überraschung der Physik-Community aufgeworfen hat (Schrödinger, 1935), werden skizziert. Der Begriff der Kohärenz kommt ins Spiel. Er ist Voraussetzung für die Lösung des Messproblems, die sich mit der Dekohärenz (Zeh, 1970) ergibt. Hier berühren sich physikalische und philosophische Fragen.

4.2 Zum Modul 1: Was ist Licht?

4.2.1 Übersicht

Modul 1 bietet eine Einführung in die frühe Quantenphysik des Lichts, die Nicht-MINT-Lernende im 10. und 11. Schuljahr ansprechen soll und die 6 bis 8 Lektionen beansprucht. Vorausgesetzt wird, dass die Lernenden die Konzepte Energie und Leistung kennen und eine qualitative Einführung in die Wellenlehre erhalten haben, so dass die Begriffe Ausbreitungsgeschwindigkeit c und Wellenlänge λ klar sind. Als mathematische Anforderungen werden einfache Algebra und das Rechnen mit positiven und negativen Zehnerpotenzen verlangt.

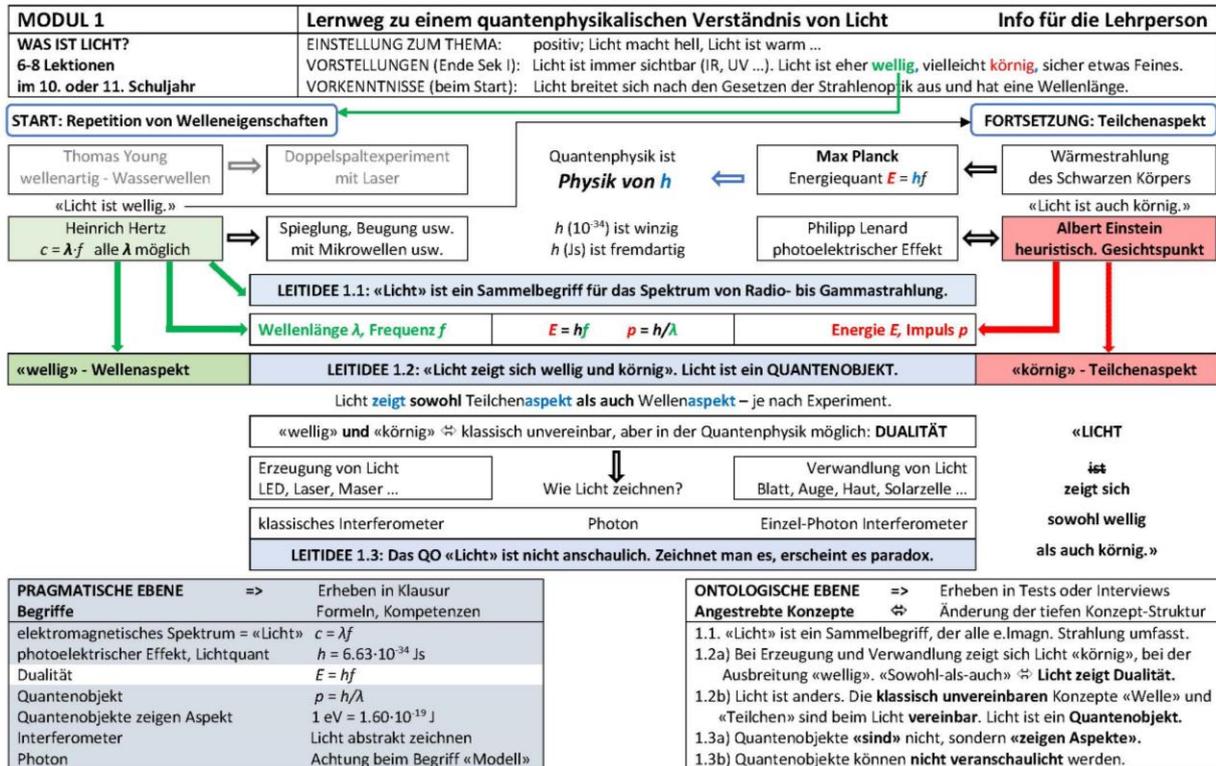


Fig. 3. An die Lehrperson gerichtete Information zur didaktischen Rekonstruktion und zum Lernweg von Modul 1

In Figur 3 ist der sich aus der didaktischen Rekonstruktion des ersten Teilgebiets ergebende Lernweg graphisch ausgeführt. Die Vorstellungen der Lernenden zum Licht sind anfänglich nicht stark ausgeprägt und werden durch die Vorbereitung auf den Wellenaspekt gelenkt. Dieser wird einerseits bestätigt und andererseits relativiert durch die Feststellung, er sei nur die halbe Wahrheit. Nach der Einführung von Plancks Wirkungsquantum h als grundlegender Größe im universellen Strahlungsgesetz taucht der Teilchenaspekt des Lichts («Licht ist auch körnig») anhand von Einsteins Originalarbeit von 1905 auf. Beispiele aus Natur und Technik sprechen von «Erzeugung und Verwandlung von Licht», bringen das «Lichtquant», aber vermeiden das «Photon», das mit dem Elektron verwandt und in dieser Phase des Unterrichts rein teilchenartig zu sein scheint (vgl. Lichtfeldt, 1992). Wichtige Anwendungen der Lichtquantenidee im Laser und beim Treibhauseffekt werden zusätzlich erläutert.

Die Lernenden stoßen anschliessend auf das irritierende «Sowohl-als-auch» von Wellen- und Teilchenaspekt des Lichts. Sie werden vertraut mit dem Sachverhalt, dass die experimentelle Situation bestimmt, welcher Aspekt zum Vorschein kommt. Die grundlegende Erkenntnis, dass Quantenobjekte nicht «sind», sondern bloss «Aspekte zeigen», kann sich langsam entwickeln.

Am Schluss von Figur 3 sind die anvisierten Begriffe und Kompetenzen aufgelistet. Zu diesen Lernzielen gehört die Fähigkeit, die Beziehungen $f = 1/T$ und $c = \lambda f$ und $E = hf$ zu verstehen und quantitativ in einfachen Aufgaben benützen zu können. Die Beziehung $p = h/\lambda$ wird als Vorbereitung auf Modul 2 ins Spiel gebracht.

Während diese Kompetenzanforderungen eher bescheiden bleiben, sind die Lernziele auf der ontologischen Ebene naturphilosophisch grundlegend und damit anspruchsvoll. Die Leitideen zielen auf die Erweiterung des Begriffs «Licht», auf die Welle-Teilchen-Dualität und auf das neue Konzept «Quantenobjekt», das zwei klassisch unvereinbare Aspekte zusammenbringt. Das Quantenobjekt «ist nicht an und für sich», sondern zeigt je nach Experiment unterschiedliche Aspekte. Die Kurzantwort auf die Titelfrage «Was ist Licht?» lautet: «Licht ist ein Quantenobjekt.» Beide Begriffe sollen nach der Arbeit mit Modul 1 für die Lernenden mit Inhalten gefüllt sein (vgl. 5.3.3).

In 4.2.2 und 4.2.3 werden exemplarisch zwei Ausschnitte aus dem Lerntext und den Aktivitäten von Modul 1 genauer dargestellt.

4.2.2 «Erzeugung und Verwandlung von Licht»

«Es scheint mir nun in der Tat, dass die Beobachtungen über ‘schwarze Strahlung’, Photolumineszenz, die Erzeugung von Kathodenstrahlen durch ultraviolettes Licht und andere die Erzeugung bez. Verwandlung des Lichtes betreffende Erscheinungsgruppen besser verständlich erscheinen unter der Annahme, dass die Energie des Lichtes diskontinuierlich im Raume verteilt sei», schreibt Einstein in seinem Artikel «Über einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt» (Einstein, 1905, S. 132-133). Dass Licht sich wellig zeigt, wissen die Lernenden meist bereits vor dem Start der Unterrichtseinheit. Dass es sich aber auch «diskontinuierlich im Raum», also körnig-kompakt zeigt, ist für sie heute ebenso neu und irritierend wie für die Fachwissenschaft vor hundert Jahren. Der verwickelte Weg von den Strahlungsgesetzen des 19. Jahrhunderts zu Plancks Strahlungsgesetz und weiter zur Klärung dessen Grundlagen durch Einstein wird zum Beispiel von Giulini didaktisch aufbereitet in «Es lebe die Unverfälschtheit» (Giulini, 2005). Er zeigt das Zusammenwirken von Theorie und Experiment exemplarisch und entlarvt die in vielen Lehrbüchern vorgegebene, zentrale Rolle des Photoeffekts als «fake history».

Einstein habe übers Ziel hinausgeschossen, urteilte Planck 1912. Und Millikan (1916) befand nach jahrelangen Messungen zum Photoeffekt das Konzept des Lichtquants als untauglich. Der Lernertext betont daher, es gehe um einen Gesichtspunkt, eine Annahme, nicht um einen Beweis durchs Experiment. Er arbeitet zwar mit dem Photoeffekt wie andere Quantenphysik-Lehrgänge, betont aber, dass es um das Verständnis einer ganzen Erscheinungsgruppe gehe, insbesondere auch um die Wärmestrahlung. Im Lernertext steht: «Bemerkenswert ist, dass Einstein seine Idee als ‘Annahme’ bezeichnete. Sie ist für ihn kein ‘Gesetz’, sondern eine mögliche Sichtweise, ein *heuristischer Gesichtspunkt*. ‘Heuristik’ ist die Kunst, mit begrenztem Wissen und wenig Zeit zu guten Lösungen zu kommen. In der Tat ist Einsteins Basis begrenzt, denn er hat nur wenig experimentelle Fakten. Aber seine Lösung ist sowohl gut als auch einfach: Er überträgt die Energiequanten von Max Plancks fiktiven Oszillatoren auf das reale Licht und nimmt an, die Energie des Lichts sei punktförmig konzentriert, daher die Formulierung ‘Lichtenergie-quanten’.» Der Lernertext fasst die Überlegungen zusammen und hält fest: «Bei Erzeugung und Verwandlung von Licht erscheint seine Energie ‘körnig’. Die Energie eines *Lichtquants* der Frequenz f und der Wellenlänge λ beträgt: $E = h \cdot f = hc/\lambda$.» In diesem Umfeld steht Figur 4.

Einstein betont: *Ich bestehe auf dem provisorischen Charakter dieses Konzepts [der anscheinend teilchenartigen Lichtquanten], das mit den experimentell nachgewiesenen Konsequenzen der Wellentheorie nicht verträglich ist.* In der «grotesken» Phase der Quantenphysik stehen **Wellen- und Teilchenkonzept** des Lichts noch **unverträglich** nebeneinander. Aber man erkennt:

Links steht der **Teilchenaspekt E**

$$E = hf$$

rechts steht der **Wellenaspekt f** .

Fig. 4. Aus dem Lernertext von Modul 1: Welle-Teilchen-Dualität in der Diskussion an der 1. Solvay-Konferenz

Einsteins Sprechweise von «Erscheinungsgruppen» und die Beispiele sollen den Lernenden deutlich machen, dass das «Körnige» nicht nur beim Photoeffekt auftritt, sondern überall, wo man nach ihm sucht. Auch die Bräunung der Haut wird besser verständlich mit der Annahme, dass die grösseren Energieportionen der UV-Strahlung wirken. Die kleineren Portionen im sichtbaren und IR-Licht, das eine Fensterscheibe hindurchlässt, lösen keine Bräunung aus. Besonders für Nicht-MINT-Lernende ist es wichtig, den grossen Anwendungsbereich der physikalischen Erkenntnisse zu illustrieren. Die FACETTEN bringen als Beispiele zur «Erzeugung von Licht in Natur und Technik» den Laternenfisch neben der LED und dem Handy-Display. Die «Verwandlung von Licht in Natur und Technik» wird illustriert durch die Photosynthese im Auge und im IR-Organ von nachtaktiven Schlangen, die Solarzelle und sogar die Kunststoff-Zahnfüllungen mit dem Photoinitiator Campher-Chinon, der während der Behandlung durch die Bestrahlung mit energiereichen Quanten einer blauen LED aushärtet.

Die Lernenden machen sich beim Lesen und Hören unwillkürlich innere Bilder. Die FACETTEN versuchen, diese Bilder in eine abstrakte Richtung zu lenken und schlagen eine Darstellung in Anlehnung an die QED vor. Das Lichtquant wird als gerichtete Wellenlinie mit γ , das Elektron als Pfeil mit e^- , also beide bewusst nicht als Kügelchen, sondern als ausgedehnte Objekte dargestellt. Diese Form löst die bekannte Problematik (z. B. Passon & Grebe-Ellis, 2015) nicht, ist aber ein Ansatz weg vom Konkreten und hin zum Abstrakten. (Vgl. Damour & Burniat, 2017.)

Weil die üblichen Demonstrationsexperimente zur «Erzeugung und Verwandlung von Licht», insbesondere solche mit Vakuum-Photozellen, unattraktiv und wenig überzeugend sind, legen die FACETTEN in den AKTIVITÄTEN Wert auf Schülerexperimente mit Leuchtdioden gemäss Figur 5. Die Lernenden können so Plancks Wirkungsquantum h auf mindestens 20% genau bestimmen und nebenbei die Wirkungsweisen von LED und Solarzelle kennenlernen.

AKTIVITÄTEN/EXPERIMENTE: Das LEGO-LED-Spektrometer nach Klemens Koch (www.vsn-shop.ch/produkte) ermöglicht Erzeugung und Verwandlung von verschiedenfarbigem, sichtbarem Licht bequem zu verfolgen. Die Dinger, in denen die Elementarprozesse «Erzeugung von Licht» und «Verwandlung von Licht» geschehen, sind Leuchtdioden. Sie sind im Innern wesentlich komplexer als eine Zinkplatte, aber von Bedeutung ist nur, dass es in ihnen Elektronen in Energiestufen hat. (...)

Fig. 5. Aus den Aktivitäten von Modul 1: Experimentelle Bestimmung von h mit Leuchtdioden

4.2.3 «A conflict between reality and our feeling»

Dass Quantenobjekte sowohl Teilchen- als auch Wellenaspekt zeigen, irritiert die Lernenden heute ebenso wie die Fachleute damals. Einstein hoffte schon früh auf eine Lösung dieses Konflikts: «Deshalb ist es meine Meinung, dass die nächste Phase der Entwicklung der theoretischen Physik uns eine Theorie des Lichtes bringen wird, welche sich als eine Art Verschmelzung von Undulations- [Wellen-] und Emissionstheorie [Teilchen-] des Lichtes auffassen lässt.» (Einstein, 1909). Diese Verschmelzung ist erst um 1950 mit der mathematisch anspruchsvollen, im Gymnasium kaum zugänglichen Quantenelektrodynamik (QED) gelungen. Die Gymnasiast:innen müssen sich aber nicht wie Einstein zufrieden geben und sagen: «Die Grübeleien hat mich der Antwort der Frage ‚Was sind Lichtquanten?‘ nicht nähergebracht» (Speziali, 1972). Sie vertiefen die Bedeutung des Lichtquants auf verschiedene Arten. Interaktives Arbeiten auf einem simulierten Mach-Zehnder Interferometer zeigt, dass es keine halben Lichtquanten gibt. In einem anderen Setting zeigt die Simulation, dass das Lichtquant Welleneigenschaften zeigt, also ausgedehnt ist.

Während die grafische Darstellung des Lichtquants bei Real- und Simulationsexperimenten zwar möglichst abstrakt ist, aber variiert, betont der Lerntext den Aspektcharakter: Das Lichtquant *ist nicht* so oder so, sondern es *zeigt Wellen- und Teilchenaspekt*, je nach experimenteller Situation. Figur 6 weist darauf hin, dass diese Aspekte bei verschiedenen Licht-Arten im Experiment unterschiedlich gut nachweisbar sind:

WELLENASPEKT DOMINIERT					
Strahlungsart/Quelle	Handy	IR/Radar	sichtbar. Licht	Röntgen	Gamma
Wellenlänge λ	500 mm	500 μm	500 nm	500 pm	500 fm
Größenvergleich	Arm	Haar	Seifenhaut	Atom	Atomkern
Frequenz f	600 MHz	600 GHz	600 THz	600 PHz	600 EHz
Quanten-Energie E	2 μeV	2 meV	2 eV	2 keV	2 MeV
		TEILCHENASPEKT DOMINIERT			

Fig. 6. Aus dem Lerntext von Modul 1: Beziehungen zwischen Wellen- und Teilchenaspekt verschiedener Lichtarten

Einsteins etwas blutleere Formulierung «Verwandlung und Erzeugung von Licht» erhält durch die Diskussion des Treibhauseffekts mehr Bedeutung: Die CO₂-Moleküle in der Atmosphäre verwandeln IR-Strahlung der Erde in einen inneren Energieüberschuss. Anschliessend erzeugen sie IR-Licht, das teilweise in Richtung Erde abgestrahlt wird. Dank dieses Treibhauseffekts ist die Erdoberfläche bewohnbar. Zuviel CO₂ sorgt für eine zu hohe Temperatur. Die Dualität wird vertrauter durch die Diskussion des Laser-Prinzips im Beispiel des CO₂-Lasers. Der Wellenaspekt kommt bei der Abstimmung des Resonators zum Vorschein, der Teilchenaspekt zeigt sich beim Pump-Vorgang.

In einem weiteren Abschnitt werden Gedanken zum weitverbreiteten, aber diffusen Modell-Begriff angestellt. Physikalische Modelle sind bewusste Vereinfachungen. So vernachlässigt etwa das Strahlenmodell des Lichts bewusst die Welleneigenschaften, kann immer noch die Spiegelung beschreiben, hilft aber bei Interferenz nicht mehr. Immer wieder werden die Lernenden zum Nachdenken aufgerufen. Die in Figur 7 dargestellte Aufforderung zu Reflexion zielt auf eine Einsicht zur Entwicklung der Physik als Wissenschaft, betrifft also NoS.

Reflexion: Was sagen Sie zur folgenden Behauptung, die Heinrich Hertz 1889 aufgestellt hat: «An diesen Dingen [Erklärungen des Verhaltens der elektromagnetischen Strahlung, HPD] ist ein Zweifel nicht mehr möglich, eine Widerlegung dieser Anschauung ist für den Physiker undenkbar. Die Wellentheorie des Lichtes ist, menschlich gesprochen, Gewissheit».

Fig. 7. Aus dem Lerntext von Modul 1: Beispiel einer Aufforderung zu Reflexion allein oder in einer Gruppe

Am Schluss von Modul 1 wird zweimal Richard Feynman zitiert, wie in Figur 8 zum Ausdruck kommt.

Das Sowohl-als-auch der Quantenphysik irritiert die Intuition jedes Menschen. Quantenobjekte bleiben uns fremd, wirken zwielichtig, paradox. Feynman löst dieses Paradoxon auf:

The 'paradox' is only a conflict between reality and our feeling of what reality 'ought to be'.

Quantenobjekte wirken auf uns paradox, aber sie selbst sind es nicht.

Unsere Sinne ermöglichen uns keinen direkten Zugang zum Licht oder zur Welt der Atome.

DAS VERHALTEN DER QUANTENOBJEKTE ERLAUBT KEINE ANSCHAULICHE BESCHREIBUNG.

Wir können uns aber mit dem unanschaulichen Sowohl-als-auch der Natur vertraut machen. Feynman drückt das Verhältnis zwischen unserer beschränkten Anschauung, unserem beschränkten Vorstellungsvermögen, einerseits und den reichen Gestaltungsmöglichkeiten der Natur andererseits respektvoll auf diese Weise aus:

I think nature's imagination is so much greater than man's, she's never going to let us relax.

Fig. 8. Schluss des Lerntexts von Modul 1: Zwei Zitate von Feynman als Hilfe zur Einordnung der Quantenobjekte

4.3 Zum Modul 2: Wo ist das Elektron?

4.3.1 Übersicht

Modul 2 bietet einen Einstieg in die Quantenmechanik für Nicht-MINT-Lernende im 11. oder 12. Schuljahr, der 8-10 Lektionen beansprucht. Angenommen wird, dass die Lernenden Modul 1 durchgearbeitet haben, den Atomaufbau aus der Chemie kennen und einen intuitiven Zugang zum Impuls besitzen. Trigonometrische und Exponentialfunktionen werden ebenso vorausgesetzt wie grundlegende Kenntnisse der Wahrscheinlichkeitsrechnung.

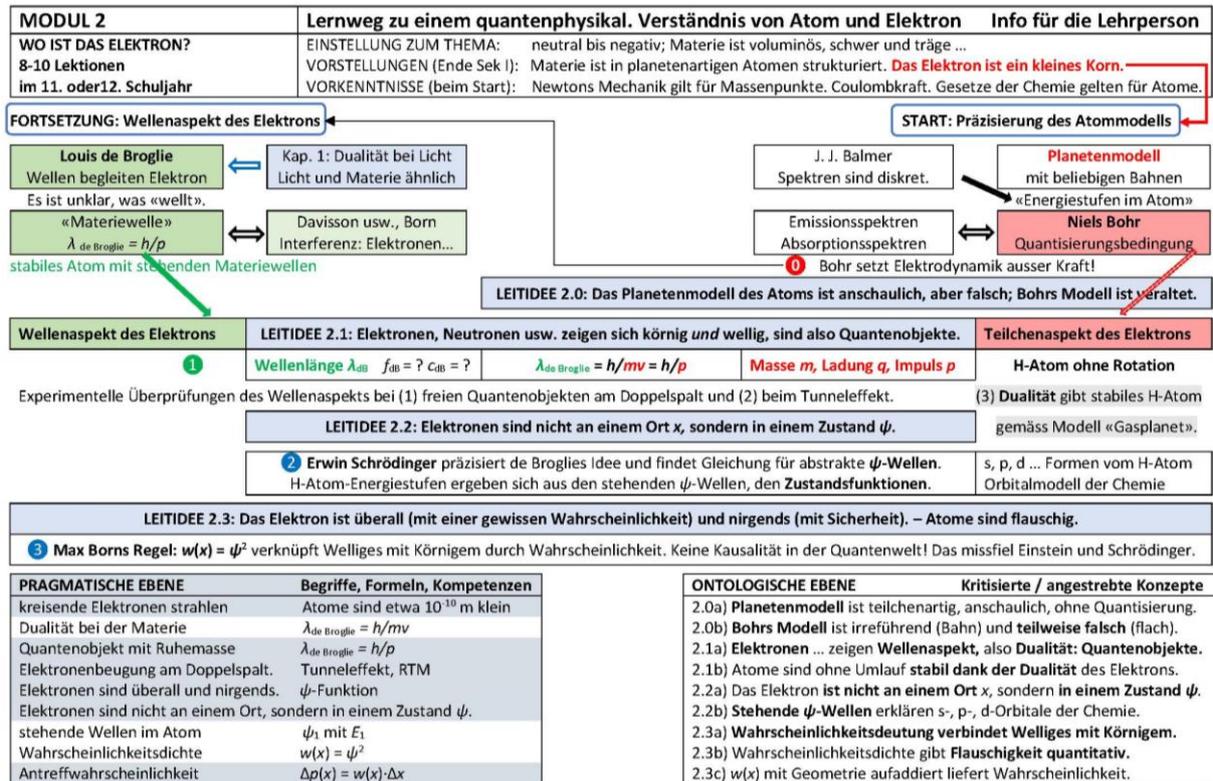


Fig. 9. An die Lehrperson gerichtete Information zur didaktischen Rekonstruktion und zum Lernweg von Modul 2

Gemäss Figur 9 ist im Lernweg der Klärung der Stärken und Schwächen von Bohrs Atommodell die Übertragung der Welle-Teilchen-Dualität vom Licht auf die Materie durch de Broglie zentral. Im Lerntext nehmen die de Broglie-Wellenlänge (de Broglie, 1924) und die Darlegung des Wellenaspekts bei freien und gebundenen Quantenobjekten sowie der Tunneleffekt (Gamow, 1928) einen grossen Raum ein, weil dieser Aspekt für die Lernenden kontraintuitiv ist. Anschliessend wird der Fokus auf die zunehmend bessere Erklärung für die Stabilität der Atome gelenkt, mit dem grossen Schritt hin zur abstrakten stehenden Welle von Schrödingers Zustandsfunktion ψ . Mit Borns Erklärung von ψ^2 gelingt der Bogen von der Physik zu den Orbitalen der Chemie, beim H-Atom sogar quantitativ. Eine Gegenüberstellung von klassischer und Quantenmechanik am Beispiel eines Objekts im Potentialtopf wird möglich.

Modul 2 wird durch Fragen zum Messprozess abgerundet. Einstein (Einstein, Podolski & Rosen, 1935) und Schrödinger (Schrödinger, 1935) haben sie früh aufgeworfen. Später meinte Max Born, dass die Generation, zu der Einstein, Bohr und er gehörten, noch von der Existenz einer objektiven physikalischen Welt ausgegangen seien. Doch die Quantenmechanik deute die in der Atomphysik gewonnene Erfahrung auf andere Weise. Es gebe keine Trennung von Messobjekt und Messapparat. Diese Trennung und das damit verbundene Objektivierungsproblem beschäftigen die Physik auch heute noch: «Eine allseits befriedigende Lösung [des Objektivierungsproblems der quantenphysikalischen Messung] gibt es nicht» (Straumann, 2013, S. 389).

In Figur 9 sind Lernziele angegeben. Zu den Kompetenz-Lernzielen gehören die Fähigkeiten, $\lambda_{\text{de Broglie}} = h/p$ quantitativ in einfachen Aufgaben benützen zu können, erklären zu können, weshalb in gebundenen Zuständen nur bestimmte Energien möglich sind, sowie die Beziehung $w(x) = \psi^2$ beim H-Atom und dem Potentialtopf zu verstehen. Auch in Modul 2 sind die Kompetenzanforderungen bescheiden, die auf der ontologischen Ebene angestrebten Konzeptwechsel aber naturphilosophisch grundlegend und damit sehr anspruchsvoll. Die Antwort auf die Titelfrage «Das Elektron ist nicht an einem Ort x , sondern in einem quantenphysikalischen Zustand ψ .» soll erläutert werden können.

In 4.3.2 und 4.3.3 werden exemplarisch Ausschnitte aus dem Lerntext und den Aktivitäten von Modul 2 vorgestellt.

4.3.2 «Die Krise von Bohrs Atommodell»

Wie in Abschnitt 3.3 ausgeführt wurde, ist das Planetenbild des Atoms anschaulich und deshalb tief in den Vorstellungen der Lernenden verankert. Den Lernenden muss zuerst bewusst werden, dass diese Vorstellung nicht haltbar ist. Dazu müssen sie die Rolle von Bohrs oft unterschlagenem Postulat der nicht-strahlenden Bahnen kennen lernen:

Bohr postulierte, dass im Atominnern eine neue Physik gelten müsse. Einerseits sollen Elektronen, geführt durch elektrische Kräfte, nach den bisher bekannten Gesetzen der Physik kreisen. Andererseits dürfen sich Elektronen im Atom nur auf gewissen, sogenannten *stationären* Bahnen bewegen – im Unterschied zu astronomischen Objekten. Nur zu diesem Zweck, *ad hoc*, stellt Bohr für Elektronenbahnen das *Quanten-Postulat* (2.1) auf. (...) Damit begannen aber auch Probleme: Das Planetenatom wirkt als Mini-Sender. Kreisende Elektronen sind beschleunigt und müssten ebenso strahlen wie die Elektronen in den Antennen von Hertz und Marconi. Diese elektromagnetische Strahlung transportierte Energie weg. Das Elektron hätte weniger und weniger Energie und müsste abstürzen wie ein durch die Atmosphäre gebremster Erdsatellit. *Die Atome wären instabil.*

Fig. 10. Aus dem Lerntext von Modul 2: Ein Ausschnitt mit Informationen zu Bohrs Quantenpostulat

Die Lernenden werden nicht aufgefordert, Bohrs Modell «zu vergessen», sondern als Modell mit beschränkter Qualität einzuordnen. In den FACETTEN steht zuerst Lobendes: «Bohr erhielt 1922 den Nobelpreis, 'for his services in the investigation of the structure of atoms and of the radiation emanating from them'. Bohrs Modell wurde erfolgreich benutzt (1) ... um die Spektrallinien von Wasserstoff und ähnlichen Fällen (Lithium oder Natrium oder He^+ oder Be^{++} usw. mit einem einzelnen Valenzelektron) genau zu berechnen, (2) ... um die Energiestufen von energetisch tief liegenden Elektronen zu berechnen, etwa für die Röntgenstrahlung grosser Atome wie Nickel ...» An diese Würdigung schliesst sich eine Liste mit Problemen an:

- (1) In Bohrs Modell ist das Wasserstoffatom flach, zweidimensional, 2D, *scheibenförmig*. Wirkliche Atome aber sind kugelig, dreidimensional, 3D, räumlich!
- (2) Im energieärmsten Zustand mit $k = 1$ muss das Elektron in Bohrs Modell umlaufen. Experimentell findet man jedoch, dass im Grundzustand das Elektron *nicht kreist* und keinen Drall besitzt, also $k = 0$ sein müsste. Dann müsste jedoch das Elektron durch den Atomkern hin und her pendeln. Das wäre, wie wenn Newtons Apfel in einem Schacht in der Erde dauernd durch den Erdmittelpunkt hin und her pendelte ...
- (3) Mit dem Bohr-Modell kann man die Spektrallinien nicht einmal beim zweiteinfachsten Atom, dem *Helium*, genau ausrechnen. Auch der atomare *Magnetismus* macht Probleme.
- (4) Nach Bohr kann es, im Gegensatz zur alltäglichen Erfahrung in der Chemie, *keine Elektronenpaar-Bindung* geben. Beim H_2 müsste jedes der beiden Elektronen zugleich auf zwei Bahnen umlaufen!

Fig. 11. Aus dem Lerntext von Modul 2: Informationen zu Schwachstellen von Bohrs Atommodell

Weil sich die FACETTEN an Nicht-MINT-Lernende richten, ist es nicht sinnvoll, quantitative Aufgaben zu Bohrs Atommodell zu stellen. Berechnungen von Umlaufradien usw. würden nur die zu überwindende Planetenvorstellung verstärken. In den Aktivitäten werden dementsprechend auch qualitative Aufgaben gestellt. Dazu ein Beispiel:

- AUFGABE # 2.3) Rutherford an Bohr im Brief vom 20. März 1913**
- I have received your paper safely and read it with great interest, but I want to look it over again (...). Your ideas as to the origin of the spectrum of hydrogen are very ingenious, and seem to work out well; but the mixture of Planck's ideas with the old mechanics makes it very difficult to form a physical idea of what is the basis of it. There appears to me one grave difficulty in your hypothesis (...) how does an electron decide what frequency it is going to vibrate. (...) you have to assume that the electron knows beforehand where it is going to stop.*
- a) Was bedeutet wohl die Formulierung *work out well*?
 - b) Was ist die Mischung von Plancks Idee und klassischer Mechanik?
 - c) Wieso muss ein Elektron von Anfang an wissen, wo es stoppen wird?

Fig. 12. Aus den Aktivitäten von Modul 2: Eine qualitative Aufgabe mit historischem Hintergrund

Im Gegensatz zu einfachen Rechenaufgaben genügt hier eine Kurzantwort mit ein paar Zahlen und Stichwörtern nicht. Die Lernenden sollen ganze Sätze formulieren. Anhand solcher Aufgaben wird für die Lehrperson sichtbar, ob eine Entwicklung auch im Bereich von NoS stattfindet. Anstelle einer klassischen Korrektur tritt idealerweise ein Feedback, dessen Formulierung allerdings mehr Aufwand erfordert als die Korrektur von Rechenaufgaben. Dieser Aufwand und die Benotung sind Voraussetzungen dafür, dass die Entwicklung von NoS-Elementen parallel zur eigentlichen Quantenphysik einen minimalen Erfolg erreichen kann.

4.3.3 «Eine bessere Physik für das Atominnere»

Anfänglich waren Quantenmechanik und Atomphysik Synonyme. Bereits de Broglie benutzte Atomphysik als Argument für die Materiewellen. Später erwies sich auch die Wellen-Mechanik, die Schrödinger am H-Atom verifizierte, als vielseitig anwendbar. Weil die Lernenden das Atom im Chemie- und Biologieunterricht immer wieder antreffen, ist es für sie die nächstliegende Anwendung der Quantenmechanik und daher zentral.

Nachdem die Lernenden sich mit dem Wellenaspekt von Elektronen, Neutronen usw. beim Durchgang durch den Doppelspalt oder bei der Funktionsweise des Tunnelmikroskops vertraut gemacht haben, sind sie bereit, die Stabilität des Atoms zunehmend genauer zu verstehen. Im Lerntext steht:

Bohrs Erklärung: Auf stationären Bahnen *darf* das rein teilchenartige Elektron nicht strahlen. – Bohrs Postulat setzt die Gesetze der Elektrizität nur für genau diesen einen Fall, ad hoc, ausser Kraft. Eine Physik, die nicht immer gilt? Das ist eine unbefriedigende Wissenschaft.

De Broglies Erklärung: Nur Bahnen mit geschlossenen de Broglie-Wellen sind stabil. – Die Wellen liegen in einer Ebene, das Atom aber ist dreidimensional. Es gibt keine physikalische Erklärung dafür, was in de Broglies Wellen schwingt! Rein wellenartige Elektronen sind mysteriös.

Erklärung mit Dualität: Das Elektron ist ein Quantenobjekt. Es zeigt sich nicht nur «körnig», sondern auch «wellig». Im Teilchenaspekt steckt die Ladung, die ins Proton fallen will und dort keinen Raum beansprucht. Im Wellenaspekt steckt die Tendenz, unendlich viel Raum zu beanspruchen.

😊 Die Welle-Teilchen-Dualität, das Sowohl-als-auch des Elektrons, sorgt für das Gleichgewicht. 😊

Fig. 13. Aus dem Lerntext von Modul 2: Vergleich verschiedener Erklärungen der Stabilität des Atoms

Es ist offensichtlich, dass ein noch besseres Atommodell eine raffiniertere Mechanik erfordert, eine, welche de Broglies Idee enthält. Die Lösung ist Schrödingers Wellenmechanik. Die schwierige Aufgabe, im Gymnasium zur Wellenmechanik vorzustoßen, wird in den FACETTEN folgendermassen durchgeführt: «Als Erwin Schrödinger Professor an der Universität Zürich war, beschäftigte er sich auf Anregung von Einstein mit de Broglies vager Vorstellung *d'une onde réelle associée*. Sie regte ihn in den Neujahrs-Skiferien 1925/1926 in Arosa zu einer Reihe von Artikeln unter dem Titel *Quantisierung als Eigenwertproblem* an. In unsere Sprache übersetzt, könnte man schreiben: 'Bestimmung der Energiewerte des Wasserstoffatoms mit Hilfe von abstrakten ψ -Wellen-Schwingungen (Psi-Wellen), die einer neuartigen Gleichung gehorchen'»

Natürlich ist es unmöglich, im Grundlagenfach Schrödingers Differentialgleichung einzuführen und seine Begründung mit der Analogie von Strahlen- und Wellenoptik in die Welt der Gymnasiastinnen und Gymnasiasten zu transformieren. Als Behelf dient eine Analogie mit der Situation beim Gasplaneten:

- Für die *physikalische Grundidee* können wir vom Gleichgewicht beim Gasplaneten ausgehen, aber statt mit Kräften mit Energien argumentieren: Der Gasdruck stammt von der Bewegung, die mit der kinetischen Energie und dem Wellenaspekt verbunden ist. Der Zusammenhalt stammt von der elektrischen Anziehung, die mit der potentiellen Energie verbunden ist. Schrödingers neue Gleichung sagt:

$$\text{kinetische Energie (mit } p \text{ und } \psi) + \text{potentielle Energie (mit } e \text{ und } \psi) = \text{Gesamtenergie (mit } \psi)$$

- Die neue Gleichung muss de Broglies Idee umfassen: Bei einem mit v frei fliegenden Elektron gibt es keine potentielle Energie. Schrödingers ψ -Welle muss in der Ausbreitungsrichtung die de Broglie Wellenlänge h/mv zeigen. Die Ausdehnung quer zur Flugrichtung ist so gross, dass das ψ bei einem Doppelspalt durch beide Spalte gehen und mit sich selbst interferieren kann. Es besteht eine gewisse Verwandtschaft dieser ψ -Welle mit der elektromagnetischen Wolke, die aus der Radioantenne strömt.

- Bei einem an den Kern *gebundenen* Elektron gibt es potentielle Energie, was die Mathematik verändert. Nun muss die ψ -Welle am Ort bleiben und irgendwie um den Kern herum schwingen. Die ψ -Welle ist eine *stehende Welle*. Weil sich zeitlich nichts ändert, bezeichnen wir eine solche stehende Welle als *Zustand*. In «ächt genialer» (so Einstein) Weise fand Erwin Schrödinger den Grundzustand ψ_1 für das H-Atom.

- Beispiel: Der Grundzustand des H-Atoms wird beschrieben durch eine kugelsymmetrische Zustandsfunktion, die mit dem Radius r exponentiell abfällt:

$$\psi_1(r) = C_1 \cdot e^{-r/a} \quad (a = \text{Bohr-Radius}) \quad (2.3)$$

Fig. 14. Aus dem Lerntext von Modul 2: Einführung des Zustandsbegriffs mit dem Grundzustand des H-Atoms

Kapitel 4 illustriert das schriftliche Angebot, das die FACETTEN DER QUANTENPHYSIK für den Unterricht machen. Die effektive Ausgestaltung des Unterrichts baut auf das handwerkliche Können der Lehrpersonen. Sie setzen Texte, Experimente, Aufgaben, Reflexionen usw. ein. Erst das Zusammenspiel aller Komponenten bringt die Lernprozesse in Gang. – Wie weit die Bemühungen erfolgreich waren, dokumentiert das Kapitel 5.

5 Entwicklung und Evaluierung der Lernumgebung

5.1 Zum Prozess von Entwicklung, Erprobung und Evaluierung

5.1.1 Allgemeines – Stichproben

Im Projekt wurde entsprechend der Methodik der Didaktischen Rekonstruktion versucht, die Ansprüche der Fachwissenschaft und die Bedürfnisse der Lernenden gleich zu gewichten und die Schwierigkeit zu umgehen, auf die Lijnse schon 1995 zur «Developmental Research» hingewiesen hatte (Lijnse, 1995, S. 197): «As soon as ‘theories’ have to be put into practice, everybody is, to a large extent, inventing once again his or her own wheel.»

Die Entwicklung der FACETTEN kann in eine Explorations- und eine Konsolidierungsphase unterteilt werden. In der Explorationsphase (2016 bis 2018, $N = 118$ in 6 Klassen) wurden unterschiedliche Inhalte für sehr variable Rahmenbedingungen ausformuliert, an einer einzigen Schule erprobt, meist nur informell beurteilt und anschliessend zur Verbesserung der Lernumgebung genutzt.

In der Konsolidierungsphase (2018 bis 2020), $N = 159$ in 7 Klassen) wurden die Materialien unter einheitlicheren Rahmenbedingungen an verschiedenen Schulen erprobt. Neben den Aussagen der Lehrpersonen ermöglichten die mit Prä- und Post-Fragebögen gewonnenen Einsichten eine dokumentierte Weiterentwicklung von Lernumgebung und Fragebögen. Teilweise schienen sehr gute Lernerfolge möglich, wie die Bilder des gleichen Schülers im Abschnitt 5.1.4 zeigen. Solche Entwicklungen sind glückliche Einzelfälle. Im Normalfall ist der Lernerfolg nur partiell.

Im Grundlagenfach Physik der schweizerischen Gymnasien wird Quantenphysik so selten unterrichtet, dass zur Evaluierung keine klassische Interventionsstudie mit Referenz- und Treatment-Gruppe möglich ist: Die «Referenzgruppe» würde gar keinen Unterricht zur Quantenphysik erhalten! – Es wurden aber Leistungstest in der Form von kleineren oder vollständigen Klausuren mit allen Klassen durchgeführt. Ab 2017 wurden Fragebogen eingesetzt und Zeichnungen ausgewertet. Die eigentliche Evaluierungsphase A mit dem Einsatz der Fragebogen (vgl. 5.2) dauerte von 2019 – 2021, fiel in die COVID-Zeit, und umfasste $N = 120$ Lernende in 7 Klassen. Die Evaluierungsphase B mit dem Einsatz der Lerntagebücher dauerte von 2020 – 2022 und umfasste weitere $N = 149$ Lernende in 8 Klassen. Der Anteil an Mädchen/Frauen schwankte je nach Klasse und betrug im Mittel 85%. Es handelt sich in allen Fällen um zwar breit abgestützte, aber opportunistische Stichproben im Sinne von Theysen (Theysen, 2014).

Beim systematischen Vergleich der erreichten mit den angestrebten Konzeptwechseln zeigte sich die Berechtigung von Lijnses Behauptung (Lijnse, 1995, S. 194): «[Interpreting science learning] means that the seeming discontinuity between scientific knowledge and reasoning, and common-sense knowledge and reasoning should be considered as differences between endpoints on a scale.» In den Köpfen der Lernenden bleibt ein Rest von «Messiness», den Hoehn und Finkelstein folgendermassen beurteilen (Hoehn und Finkelstein, 2018, S. 19): «We argue that the messiness of student reasoning should be valued.» «Messiness» gibt es beim Entstehen von Wissenschaft auch in den Köpfen zukünftiger Nobelpreisträger: Im Februar 1926 schrieb Schrödinger an Planck in Berlin nur was « ψ -Schwingungen» nicht sind. Ebenso nach München: «Hochverehrter, lieber Herr Professor [Sommerfeld]! Die ψ -Schwingungen sind natürlich nicht [Hervorhebung HPD] elektromagnetische Schwingungen im alten Sinn» (von Meyenn, 2011, S. 179 & 190).

5.1.2 Übersicht über die Evaluierung

Die Evaluierung der FACETTEN beruht auf einem Vorher-Nachher-Vergleich und auf Bestandesaufnahmen nach der Unterrichtssequenz. Vier verschiedene Instrumente, zwei quantitative (Klausuren und Fragebogen) und zwei qualitative (Zeichnungen und Lerntagebücher), wurden eingesetzt. Die Zeichnungen bildeten ein Element des Fragebogens. Einige Themen konnten so von verschiedenen Seiten angegangen werden, wobei allerdings nicht immer die gleichen Populationen zur Verfügung standen. Eine Übersicht vermittelt Figur 15.

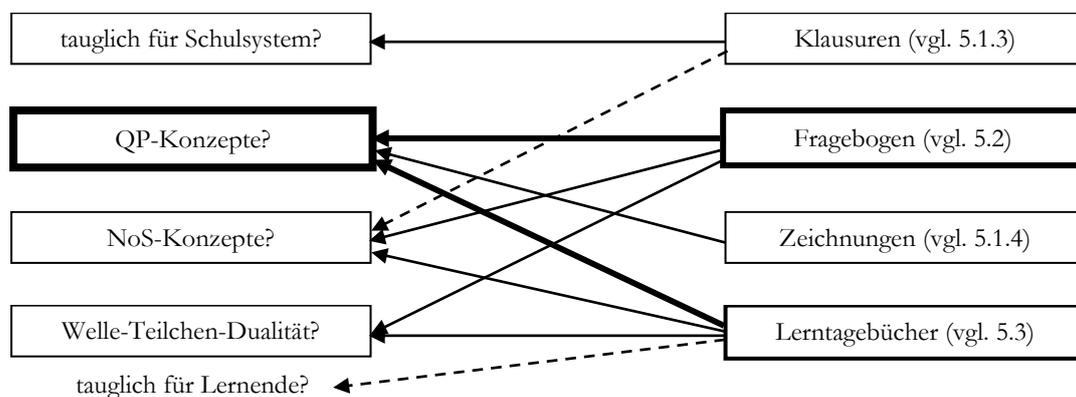


Fig. 15. Übersicht über die Themen und die Instrumente der Evaluation

5.1.3 Evaluierung mit Klausuren

Leider nahm die Schweiz nur 1995 an TIMSS-Studien teil (TIMSS, 1995). Damals und in den späteren Durchführungen des Leistungstests wurde nur Quantenphysik auf erhöhtem Niveau getestet. Auch adäquate Aufgaben aus deutschsprachigen, fachdidaktischen Untersuchungen zur Leistungsmessung in der Quantenphysik standen nicht zu Verfügung. Müller erwähnt eine Klausur, spezifiziert diese aber nicht (Müller, 2003, S. 146). Zur Unterrichtssequenz, die Budde untersuchte, gehörten zwei Klausuren (Budde, 2004, S. 92). Doch bei keinem der sechs Untersuchungsbereiche (Atommodelle usw.) wurde versucht, die Klausurergebnisse mit den studierten Resonanzen zwischen Lernangeboten und Lernenden-Vorstellungen in Beziehung zu setzen. Wegen der unterschiedlichen Rahmenbedingungen war es auch nicht sinnvoll, Aufgaben aus standardisierten Leistungs-Tests wie dem deutschen Zentralabitur zu übernehmen. Schon beim Unterrichtseinsatz während der Entwicklungsphase von 2016 bis 2018 zeigte sich jedoch, dass die FACETTEN im schweizerischen Schulsystem eingesetzt werden konnten. Weil der rechtliche Rahmen des Systems mit schriftlichen Arbeiten zu dokumentierende Leistungsnoten verlangt, wurden Klausuren als quantitative Leistungstests eingesetzt. Diese umfassten sowohl konventionelle Rechenaufgaben als auch Textaufgaben, die im gymnasialen Physikunterricht selten sind (vgl. Aufschnaiter, 2001, Cappelli et al., 2008). Figur 16 liefert dazu je ein Beispiel:

<p>Aufgabe 3) Louis de Broglies Wellen 7 Punkte</p> <p>Ein Helium-Atom hat eine Masse von $6.64 \cdot 10^{-27}$ kg.</p> <p>a) Wie schnell darf es sein, wenn die zugehörige de Broglie-Wellenlänge $1.0 \cdot 10^{-10}$ m gross ist?</p> <p>b) Man schickt einen Strahl von solchen Atomen durch einen Doppelspalt, dessen Spalten 0.2 mm getrennt sind und misst in 10 m Entfernung hinter dem Spalt. Was beobachtet man auf der Symmetrieachse und wo liegt das erste Nebenmaximum? Begründe deine Rechnung mit einer Skizze.</p> <p>c) Wieso merkt man beim Fussballspiel nichts vom Wellenaspekt der Materie? (Stichworte genügen)</p>
<p>Aufgabe 9) 'Physik und Technik' ODER 'Theorie und Experiment' 7 Punkte</p> <p>Löse die folgenden Aufgaben für das Thema, das Du vorbereitet hast:</p> <p>Schildere das Verhältnis zwischen den beiden Begriffen in maximal 10 kurzen, ganzen Sätzen. Erwähne dabei mindestens zwei konkrete Beispiele, davon mindestens eines aus der Quantenphysik.</p>

Fig. 16. Zwei Aufgaben aus einer Klausur, die zur Leistungsnote beigetragen hat.

5.1.4 Evaluierung mit Zeichnungen

Die im Anschluss an Lichtfeldt (1992) gehegten Hoffnungen hinsichtlich Zeichnungen erfüllten sich leider nur in Einzelfällen (Fig. 17). Die je fünf Zeichnungen, welche vor und nach dem Unterricht «möglichst spontan» gemacht wurden, konnten verschiedenen Schülervorstellungen zugeordnet werden und zeigten Entwicklungsstufen (Fig. 18). Ohne Kommentar erwiesen sich Zeichnungen aber als unzuverlässig, weshalb hier nicht weiter berichtet wird.

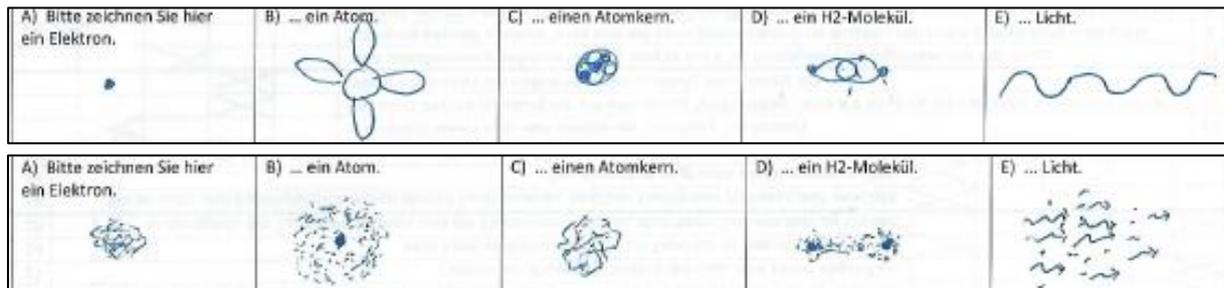


Fig. 17. Zeichnungen des gleichen, leistungsfähigen Schülers vor und nach der Unterrichtssequenz zur Quantenphysik

1 = naiv – konkret	2 = nur Welle	3 = nur Teilchen	4 = Welle & Teilchen unabhängig	5 = abstraktes Quanten-Objekt

Fig. 18. Beispiel zur Codierung der Zeichnungen zum Licht, geordnet nach wachsendem Abstraktionsgrad

5.2 Evaluierung mit Prä-Post-Fragebogen

In der Evaluierungsphase A waren $N = 120$ Lernende, vom 11. bis 13. Schuljahr, überwiegend im Grundlagenfach, aus 7 Klassen in Gymnasien von 3 Kantonen während der COVID-Phase involviert. Die Unterrichtszeit betrug deshalb anstatt der vorgesehenen 16 Lektionen nur 10 bis 12 Lektionen. Zwei Klassen mussten das anspruchsvolle Gebiet abbrechen, weshalb nur die Prä- und Post-Fragebogen (vgl. Anhang I) von knapp 90 Lernenden für die quantitative Auswertung detailliert ausgewertet werden konnten.

5.2.1 Zur Entwicklung des Fragebogens

Ein Überblick über Testinstrumente zur Quantenphysik an unteren Schulstufen (Bitzenbauer & Meyn, 2020, S. 150) zählt Fragebogen auf, die auch bei der Evaluierung der FACETTEN hätten von Bedeutung sein können:

- (1) Der aus Grossbritannien stammende, auf Anfänger eines Physikstudiums zielende, 29 ausgewählte Items umfassende Fragebogen von Gren Ireson (Ireson, 1999 und Ireson, 2000).
- (2) Der mit der Evaluation des MILQ-Projekts entstandene, für Lernende der gymnasialen Oberstufe konzipierte und 29 Items umfassende Fragebogen von Rainer Müller (Müller, 2003, S. 149-151).
- (3) Der an der University of Sidney bei Undergraduates erprobte Fragebogen von Sura Wuttiptom et al. (Wuttiptom et al., 2009) mit 25 Multiple Choice Items.
- (4) Der in Italien von Umberto Scotti di Uccio et al. für Hochschulunterricht entwickelte und umfangreich erprobte, zweistufige Multiple Choice Test mit zwanzig Items (Uccio et al., 2019).
- (5) Das von Philipp Bitzenauer entwickelte Testinstrument, das nach der mehrstufigen Evaluation noch 13 Items zum Thema Quantenoptik umfasst (Bitzenbauer & Meyn, 2020).
- (6) Das von Bernadette Schorn zur Evaluation von MILQ10, eines Quantenphysikkurses für das 10. Schuljahr an deutschen Gymnasien, entwickelte Instrumentarium (Schorn, 2014).

Da viele dieser Instrumente Items enthielten, die über das Anspruchsniveau der FACETTEN hinausreichten, aber andererseits die Forschungsfragen nicht voll abdeckten, musste unter Rückgriff auf Vorhandenes ein neuer Fragebogen entwickelt werden. In der Evaluationsphase waren die Versionen 4 und 5 des Fragebogens im Einsatz.

Jeweils 4 Items zielten auf die folgenden latenten Konstrukte der Lernenden: «Licht», «Atom», (freies) «Elektron» und «Zufall». 16 Items wurden fremden Fragebogen entnommen; 4 eigene ergänzten sie. Je 4 eigene Items fragten zudem nach den Konzepten zu «Nature of Science» und zur «Begriffsbildung». Im Prä-Fragebogen wurden zudem Interessen für Physik usw. erhoben, im Post-Fragebogen wurde nach der Selbsteinschätzung hinsichtlich Quantenphysik gefragt. Die verbreitete, fünfstufige Likert-Skala wurde bewusst übernommen. Der Fragebogen sollte bereits vor Beginn des Unterrichts Sinn machen. «Ich weiss nicht» kann mit «halb-halb» in der Mitte der Skala treffend ausgedrückt werden. Es wurde darauf geachtet, dass etwa die Hälfte der Items negativ gepolt war. Sie sind mit * gekennzeichnet. Die Angaben beruhen auf den Daten der Evaluierungsphase A mit $N = 89$, resp. $N' = 75$ Lernenden (68% weiblich). m und m' , resp. s und s' bezeichnen Mittelwerte und Standardabweichungen jeweils vor und nach dem Unterricht.

Als Beispiel wird der Item-Block «Atom» genauer vorgestellt, der die Wirkung eines Teils des Moduls 2 misst. Die verbreitete Vorstellung, Elektronen, Neutronen usw. seien winzige Kügelchen, soll überwunden werden. Mit dieser Vorstellung ist das Planetenmodell des Atoms eng verbunden: Es wendet die Vorstellung zum Elektron usw. zusammen mit klassischer Mechanik erfolgreich an und stützt dadurch das Teilchenbild. Beides, Planetenmodell und Teilchenbild, soll in Richtung Quantenphysik entwickelt werden. Ausgangspunkte sind Ausprägungen der Leitideen.

Tab. 1a. Umsetzung von Ausprägungen der Leitideen in Item-Formulierungen und deren Likert-Quantifizierung.

LEITIDEE	Minimale Ausprägung = 1	Maximale Ausprägung = 5
Planetenmodell des Atoms ist falsch.	<i>Das Atom ist ein kleines Sonnensystem.</i>	<i>Die Atomoberfläche ist flauschig</i>
Materie ist auch wellig.	<i>Das Elektron fliegt auf einer Bahn.</i>	<i>Das Elektron ist überall und nirgends.</i>

Tab. 1b. Die vier Items zum Konstrukt «Atom» mit den Auswertungsdaten sowie zwei getestete, alternative Items

ATOM		m	s	m'	s'
	*Das Atom hat eine ähnliche Struktur wie das Sonnensystem.	*3.6	1.17	*2.6	1.27
	Die Oberfläche eines Atoms ist flauschig und unbestimmt.	2.3	1.00	3.7	1.32
	*Im Atom bewegen sich die Elektronen auf best. Bahnen um den Kern.	*3.6	1.28	*2.9	1.44
	Man kann vereinfacht sagen: 'Ein Elektron ist überall und nirgends.'	3.5	1.19	4.1	1.15
Mittelwerte auf der Skala ATOM		2.6		3.5	
Cronbachs alpha		0.81		0.89	
E	*Das Elektron stürzt nicht in den Atomkern, weil es schnell um ihn herum kreist.	*3.6	1.4	*2.7	1.5
F	Man kann vereinfacht sagen: 'Die Stabilität beim Atom ist ähnlich wie beim Gasplaneten.'	3.1	1.2	3.2	1.1

Item E, das die Dynamik anstelle der Kinematik erfasst, hätte zu einem besseren Wert der Effektstärke geführt. Item F, das die Dynamik des Atoms auf eine andere Weise testet, hätte ein schlechteres Ergebnis geliefert.

5.2.2 Entwicklung der Quantenphysik-Konzepte der Lernenden

Für die Darstellung der statistischen Analyse der Daten werden zusätzlich folgende Symbole benutzt:

- Δm_K = $m_K' - m_K$ = Erhöhung des Mittelwerts des Konstrukts, das von je 4 Items geliefert wird
- \bar{s}_K = gewichtete Standardabweichung des Konstrukts
- d_K = Cohens Effektstärke für abhängige Stichproben. Definition: $d_K = \frac{\Delta m_K}{\bar{s}_K}$.
- sig = Signifikanz der Effektstärke gemäss dem *t*-Test mit der Prüfgrösse $t = \frac{m' - m}{\sigma/\sqrt{N}}$

Tab. 2. Die Entwicklung der vier Konstrukte durch den Unterricht in der Evaluationspopulation A

KONSTRUKT	m_K	m_K'	Δm_K	d_K	sig
LICHT	2.79	3.20	0.41	$d_L = 0.39$	1 %
ATOM	2.64	3.53	0.89	$d_A = 0.73$	1 %
FREIES ELEKTRON	2.68	2.88	0.20	$d_E = 0.17$	5 %
ZUFALL	2.43	3.06	0.63	$d_W = 0.54$	1 %

Die Nullhypothese bei der statistischen Überprüfung ist, dass der Unterricht mit den Modulen 1 und 2 der Lernumgebung FACETTEN DER QUANTENPHYSIK zu *keiner* Entwicklung der vier quantenphysikalischen Konstrukte führe. Diese Hypothese kann auf dem 1%-Vertrauensniveau für die Konstrukte LICHT, ATOM und ZUFALL verworfen werden. Die Hypothese, dass sich das Konstrukt FREIES ELEKTRON trotz Unterricht nicht verbessert, kann jedoch nur auf dem 5%-Niveau verworfen werden.

Nach den üblichen Konventionen bedeuten Effektstärken zwischen 0.2 und 0.5 einen kleinen, solche zwischen 0.5 und 0.8 einen mittleren und Effektstärken über 0.8 einen starken Effekt (Cohen, 1988). Im Einzelnen können aus den positiven Fragebogendaten der verhältnismässig kleinen Population für die Entwicklung von vier Konstrukten in Richtung der fachwissenschaftlichen Vorstellungen auf Grund der Arbeit mit der Lernumgebung positive Schlüsse für «Atom» und «Zufall», knapp positiv für «Licht» und gar keinen für «freies Elektron» gezogen werden. Es drängt sich auf, die vier Teil-Konstrukte resp. Konzepte zum Konstrukt «integrales Anfänger-Quantenkonzept» Q zusammenzufassen. Dessen Daten sind in Tabelle 3 zusammengefasst (mehr Daten in Dreyer, 2022):

Tab. 3: Entwicklung des integralen Anfänger-Quanten-Konzepts durch den Unterricht in der Evaluationsphase A. Legende: Q vor dem Unterricht; Zuwachs um ΔQ auf Q' nachher; Cohens Effektstärke d_Q und Signifikanzniveau

KONSTRUKT	Q	Q'	ΔQ	d_Q	sig
QUANTEN-KONZEPT	10.54	12.66	2.12	0.75	0.1 %

Dank der Möglichkeit dieser Studie, die Prä- und Post-Fragebogen je einem Individuum zuordnen zu können, lassen sich auch die Entwicklungen der individuellen Konzepte zur Quantenphysik dokumentieren. Zwei Faktoren beeinflussen den Lernerfolg der Individuen stark, (1) ihre Voraussetzungen und (2) ihre Interessenslage:

(1) Der Einfluss der *quantenphysikalischen Präkonzepte* durch die folgende Korrelation individueller Daten deutlich:

$$\text{Korrelation (indiv. Quanten-Konzept vorher : indiv. Quanten-Konzept nachher)} = 0.40$$

Dieser mittel bis grosse Effekt (Krüger et al., 2014, S. 291) bestätigt die Erwartung, dass die Vorstellungen und Konzepte vor dem Unterricht einen grossen Einfluss besitzen. Dies legt nahe, dass Lernende mit ungünstigen Startbedingungen von den FACETTEN wenig profitieren. Effektiv entwickeln sich beim schwächsten Drittel der Lernenden die Konzepte nur um $\Delta Q_{\text{schwaches Drittel}} = 0.5$, bei den leistungsfähigeren zwei Dritteln jedoch um $\Delta Q_{\text{leistungsfähiger}} = 3.5$. Die Gründe für diesen Mangel konnten wegen fehlender Ressourcen nicht geklärt werden.

(2) Auch der Einfluss des *Fachinteresses für Physik* zeigt sich in der Korrelation der individuellen Daten. Ein Einfluss in der Grössenordnung von 0.5 ist überraschend hoch, aber nicht unerwartet: «Motivation ist alles!»

$$\text{Korrelation (indiv. Physik-Fachinteresse vorher : indiv. Quanten-Konzept nachher)} = 0.56$$

Die Entwicklung des Physik-Fachinteresses wurde nicht ausgewertet, weil die wenigen Lektionen kaum merkliche und bleibende Änderung bewirken können. Aus Datenschutz-Gründen war es nicht möglich, die bedeutsamen Korrelationen zwischen dem individuellen Quantenkonzept nachher und der individuellen Leistung in der Klausur und den Physik-Leistungsnoten zu bestimmen. Wegen der absolut kleinen Zahl von Schülern in diesen weiblich dominierten Klassen war es nicht sinnvoll, Gendereffekte anzugeben.

In diesem Rahmen ist es leider auch nicht gelungen, Lernwirkungen bei der Begriffsbildung (Modell usw.) und bei Elementen von NoS quantitativ sicher nachzuweisen. Zum qualitativen Nachweis vgl. 5.3.4 und 5.3.6.

Hingegen kann die Brauchbarkeit von codierten Zeichnungen (vgl. Fig. 14) plausibel gemacht werden:

$$\text{Korrelation (indiv. Konstrukt ELEKTRON vorher : indiv. ELEKTRON-Zeichnung vorher)} = 0.4$$

$$\text{Korrelation (indiv. Konstrukt ATOM nachher : indiv. ATOM-Zeichnung nachher)} = 0.4$$

$$\text{Korrelation (Q-Konzept nachher : LICHT+ATOM+ELEKTRON-Zeichnungen nachher)} = 0.5$$

Die Korrelationen legen nahe, dass Zeichnungen ein taugliches Instrument sind, um zumindest im Schulalltag Schülervorstellungen zu erkennen und zu dokumentieren.

5.3 Evaluierung mit Lerntagebüchern

5.3.1 Entstehung und Auswertung der Lerntagebücher

Lerntagebücher (LTB) werden allgemein als Hilfsmittel für selbstorganisiertes Lernen empfohlen (Boekarts, 1997). Lerntagebücher eignen sich auch zur empirischen Erfassung von Lernprozessen, besonders wenn sie vorstrukturiert sind (Ehmann, 2008). Bereits früher wurden Lerntagebücher zur Dokumentation des Lernens von Quantenoptik im 10. Schuljahr eingesetzt (Bronner, 2010, S. 138-149). Die Inhalte dieses umfangreichen Materials wurden leider keiner weitergehenden Analyse unterworfen.

Während der Evaluationsphase B verfasste eine Population von $N = 62$ Lernenden (ca. 80% weiblich, aus 4 Klassen im 11. und 12. Schuljahr) vorstrukturierte Tagebücher (Anh. II.1) in Dreiergruppen und erhielt von der Lehrperson ein regelmässiges Feedback. Das Material entsprach etwa 50 A4-Seiten mit meist vollständigen Sätzen (Anh. II.2). Die mehrstufige Auswertung erfolgte nach der Methodik der qualitativen Inhaltsanalyse gemäss Philipp Mayring (Mayring, 2015) mit den Rohdaten, d. h., bevor die Lehrperson das LTB gelesen und das Feedback hineingeschrieben hatte.

5.3.2 Aussagen zur Lernumgebung allgemein

Die überwiegende Mehrheit der Lernenden äussert sich im Lerntagebuch positiv zum Aufbau des Lerntextes, dem zentralen Element der Lernumgebung. Das illustrieren die folgenden Zitate – mit anonymisierten Namen:

- Alice, 11. Schuljahr, lobt die Struktur: «Auch finde ich das Skript sehr gut aufgebaut.»
- Alena, 11. Schuljahr, lobt den Alltagsbezug: «Es ist ein interessantes Thema und auch ‘nützlich’ geschrieben, da es sich so sehr auf Alltägliches bezieht und man daraus etwas mitnehmen/lernen kann.»
- Chris, 11. Schuljahr, hebt den Nutzen der Zusammenfassung, die auch als Information über die Lernziele dienen kann, hervor: «Die Zusammenfassung am Schluss des Kapitels [Moduls] fand ich sehr hilfreich und anschaulich.»
- Für Manuela, 11. Schuljahr, sind die Begriffserklärungen wichtig: «Ich fand es super, dass die neuen Begriffe gerade unmittelbar nach der Verwendung erklärt wurden (z.B. Heuristik ...) Zudem waren die vielen farbigen Bilder sehr unterstützend beim Verständnis.»

Eine kleinere Anzahl von Lernenden äussert Kritik am Anspruchsniveau und an der Informationsdichte. Diese Gruppe findet den Text sehr anstrengend, muss die Sätze meistens mehrmals lesen, hat grosse Schwierigkeiten alles zu verstehen und wünscht sich mehr Zeit für das Arbeiten mit dem Material.

- Jay, 11. Schuljahr, klagt: «Ich fand es auch sehr anstrengend, etwas zu verstehen, ich musste den Satz meistens mehrmals lesen, damit ich jetzt wirklich verstand, was mir gesagt werden wollte.»
- Julia, 11. Schuljahr, erlebt die gleiche Schwierigkeit: «Ich habe jedoch grosse Schwierigkeiten alles zu verstehen, da sehr viele Informationen auf einer Seite stehen, und somit kein Platz für ausführliche Erklärungen ist.»
- Sonja, 11. Schuljahr schlägt vor: «Für die nächste Klasse würden wir empfehlen, dass (...) mehr Zeit für das ganze Dossier berechnet werden könnte.»

Zusätzlich sprechen mehrere Lernende spezifische Schwachstellen der Ausgestaltung an:

- Kate, 11. Schuljahr, bemängelt die Schriftgrösse: «Ich finde es jedoch schwierig, mich auf den Text zu konzentrieren, da es kleine Buchstaben sind und ich so schnell die Zeile verliere, auf der ich gelesen habe.»
- Für Chris, 11. Schuljahr, sind die Grafiken ungenügend beschriftet: «Manchmal habe ich mir jedoch beim Lesen eine etwas bessere/übersichtlichere Beschriftung der Grafiken erhofft und diese schneller zu finden.»

Die Kritik an den biographisch-historischen Ergänzungen, die von einer Minderheit mit 5% bis 10% der Lernenden vorgebracht wird, ist von grundsätzlicher Bedeutung. Die im Hinblick auf die NoS-Förderung eingebrachten Informationen hülften nicht beim Lernen, sondern erschwerten die Orientierung:

- Thea, 11. Schuljahr, klagt: «Meiner Meinung nach wurden zu viel verschiedene Anekdoten erzählt, welche mir nicht halfen, es [die de Broglie Wellenlänge] zu verstehen.»
- Jenny, 11. Schuljahr, beschwert sich vehement: «Mir persönlich hat es ein wenig zu viel Info-dump (...) Zudem hatte es für mich persönlich einfach zu viel Geschichte mit dabei (...) Für mich ist es einfach schwierig zu wissen, auf was ich mich jetzt konzentrieren muss.»

Zusammenfassung: Die Lernenden finden grossmehrheitlich, der Lerntext sei sehr gut aufgebaut und angereichert mit hilfreichen Zusammenfassungen am Schluss des Kapitels, mit unmittelbar auf die Verwendung folgenden Erklärungen neuer Begriffe und mit unterstützenden, farbigen Bildern. Neben vereinzelten, differenzierten Verbesserungswünschen zum Layout gibt es Klagen über das hohe Anspruchsniveau, die grosse Dichte der Informationen und die Fülle an historisch-biografischen Ergänzungen.

5.3.3 Aussagen zur Quantenphysik des Lichts

Die folgenden Zitate aus den Lerntagebüchern von Lernenden im 11. Schuljahr illustrieren die Überraschung beim Lernen, dass es für Menschen nicht sichtbares Licht gibt:

- Viola: «Ich wusste nicht, dass es Licht gibt, welches wir Menschen nicht sehen können.»
- Tatjana: «Ich kann es nicht glauben, dass ich ständig von Strahlen umgeben bin, sie sind für mich ‘nicht da’, ‘nicht fassbar’.»

Die Hauptschwierigkeit, die Welle-Teilchen-Dualität, stösst erwartungsgemäss auf Widerstand:

- Flavio: «Mich hat überrascht, dass Licht sowohl körnig als auch wellig sein kann und die Physik sich noch [sic!] nicht auf nur eine Eigenschaft beziehen kann.»

- Leandro: «Für den Menschen ist es logisch, Licht entweder als Welle oder als Teilchen anzusehen, also sich auf einen 'Zustand' zu beschränken.»

- Christine: «Ich finde es unvorstellbar, dass Licht sowohl ein Teilchen und eine Welle 'gleichzeitig' sein kann.»

- Sonja: «Richtig verstanden haben wir heute die Doppelnatur des Lichts. [...] Wir können uns es [dieses Doppelwesen] nicht so gut vorstellen, für uns geht die Frage schon in Richtung der Philosophie.»

Die im Abschnitt 4.2.3 erwähnte Anleihe der FACETTEN bei Feynman, die als Hilfe zur Überwindung der Hauptschwierigkeit gedacht ist, wird gut aufgenommen, wenn auch bei manchen eine gewisse Skepsis bleibt:

- Lily: «Dass eine Dualität existiert, die nicht entweder-oder ist, kann ich mir nur mit Mühe vorstellen. Richard Feynman erklärt zwar den Grund dafür, aber das Gefühl bleibt halt trotzdem bestehen.»

- Cécile: «Ich suchte nach Erklärung, weshalb ich mir diese Quantenobjekte nicht vorstellen kann und nun dank Kapitel 1.7 [mit Feynmans Argument] habe ich diese Erklärung, welche total zutrifft.»

- Mia: «Vor allem die [Aussagen] von Feynman über das Paradox der Quantenobjekte haben mir gefallen.»

Manchmal geht die Erleichterung, etwas Schwieriges verstanden zu haben, über in Begeisterung:

- Cécile: «Ich bin fasziniert von diesen Quantenobjekten. Ich habe es nicht für möglich gehalten, dass etwas je nach Experiment einen anderen Aspekt zeigt.»

Rückmeldungen zum Anwendungsbezug sind seltener:

- Chris: «Sehr interessant zu wissen ist auch wie eigentlich der Laser funktioniert und dazu noch zu sehen, dass auch (...) die Doppelnatur des Lichts deutlich wird.»

- Sandra: «Ich verstehe nicht, wie beim Pump-Prozess [im Laser] die anderen Atome angestachelt werden können.»

Zusammenfassung: Die meisten Lernenden finden den Zugang zur semiklassischen Quantenphysik des Lichts, leiden aber unter der spezifischen Unanschaulichkeit, über die Lena klagt: «Wir hadern mit dem Wirkungsquantum h . Wir können es uns nicht bildlich vorstellen.»

5.3.4 Aussagen zum Einstieg in die Quantenmechanik

Die Erkenntnis, dass Bohr in seinem semiklassischen Modell einen Teil der Physik, die Elektrodynamik, die für Generatoren und Radios grundlegend ist, im Atominnern ausser Kraft setzt, löst bei vielen Lernenden Alarm aus.

- Elisabeth, 11. Schuljahr: «Mich hat es überrascht, wie viele schlechte Erklärungen es gebraucht hat, um die Stabilität des Atoms richtig erklären zu können. Ich hatte mir dazu im Chemieunterricht nie Gedanken darüber gemacht.»

- Doris, 11. Schuljahr: «Das heisst, das Orbitalmodell mit seinen Schalen, welches wir uns in der Schule eingeprägt haben, ist falsch.»

Wie erwartet, fällt es den Lernenden nicht leicht, die vertrauten Kügelchen, als die sie sich Elektronen und andere Elementarteilchen vorstellen, zu überwinden. Lernende im 11. Schuljahr schildern es im LTB so:

- Kate: «Ich habe nicht verstanden, um was es sich genau bei de Broglie-Wellen handelt, da ich es schwierig finde, mir etwas so Kleines vorzustellen.»

- Thys: «Mir ist es sehr schwergefallen, sich den Wellencharakter von Teilchen bildlich vorzustellen. Soll ich mir unter 'Materiewellen' echte Wellen schwingender Materie oder ein Teilchen auf einer Wellenbahn vorstellen?»

- Leila: «Die Dualität kann ich nicht wirklich nachvollziehen. Das übersteigt meine Vorstellungskraft, aber ich kann es annehmen, dass es sie gibt. Dabei betrachte ich beispielsweise nur ein Elektron.»

- Davide: «[Es überrascht mich,] dass sich, bei Gültigkeit von de Broglies Theorie, Materie überlagern und an einem anderen Ort auslöschen kann.»

Das Konzept von Schrödingers Wellenfunktion ψ und ihrer Wahrscheinlichkeitsinterpretation bereitet erwartungsgemäss Schwierigkeiten, die im engen Rahmen des Moduls 2 nur zum Teil bewältigt werden können:

- Dominic: «Ich kann mir nicht vorstellen, bzw. verstehe ich nicht [sic!], was eine Psi-Welle ist.»

- Anik: «Die Formel für Psi und das Verhalten der Psi-Welle macht mir Schwierigkeiten beim Verständnis.»

Immerhin vermittelt die Anwendung zur Erklärung der Stabilität des Atoms ein gewisses Vertrauen:

- Livia: «Ich finde die Erklärung mit den stehenden Wellen im Badezimmer interessant.»

- Cécile: «Mich fasziniert, dass beim H-Atom ein einzelnes Elektron im Stande ist, alleine durch die Bewegung eine ganze Kugelform auszufüllen.»

- Sabine: «Man weiss aber nicht, wie gross das Atom jetzt wirklich ist.»

- Doris: «[Es überraschte mich am meisten,] dass das Elektron keine bestimmte Umlaufbahn verfolgt, sondern sich mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit an einem gewissen Ort befindet.»

- Christine (12. Schuljahr): «Mit dem Input von Schrödinger und Born sehe ich die Dualität und den Aufenthaltsort der Materie nun vielmehr mit dem 'Auge der Wahrscheinlichkeit'.»

Zusammenfassung: Die Kritik an Bohrs Atommodell stimuliert die Lernenden und setzt bei ihnen eine Entwicklung der Vorstellungen in Gang. De Broglies Wellen bleiben jedoch für viele mysteriös, klassische Teilchen wären ihnen lieber. Noch grösser ist das Staunen über Schrödingers Psi-Wellen und deren Wahrscheinlichkeitsdeutung. Der Umgang mit der Dualität ist zentral, wie Lara (12. Schuljahr) schreibt: «Die Dualität hat mir in diesem Kapitel gezeigt, wie wichtig sie ist. Bis jetzt habe ich sie einfach mal im Hinterkopf behalten. Doch jetzt weiss ich, dass es, um Quantenphysik zu verstehen, essenziell ist, diese Dualität zu sehen und sich auch darauf zu beziehen.»

5.3.5 Aussagen zur Welle-Teilchen-Dualität

Die Welle-Teilchen-Dualität hilft, über das Verhalten von Quantenobjekten zu sprechen – natürlich nicht allen Lernenden gleichermaßen:

- Leila, 11. Schuljahr: «Man sollte sich anfreunden mit unlogisch erscheinenden Phänomenen auf der Welt, denn wenn wir auch keinen direkten Zugang zu ihnen haben, machen sie auf eine uns vielleicht auf den ersten Blick unverständliche Weise Sinn.»

- Mia, 11. Schuljahr: «Das Wichtigste ist natürlich die Doppelnatur von Licht und das Quantenobjekt. Ich habe noch nicht ganz verstanden, wie sie möglich sind, aber ich denke, ich bin auf einem guten Weg, ein besseres Verständnis dafür zu bekommen.»

- Sarina, 12. Schuljahr: «Auch wenn ich es [dass Quantenobjekte zugleich wellig und körnig sein können] mir nicht erklären kann, muss ich es wohl einfach hinnehmen.»

- Annalena, 11. Schuljahr: «Diese quantenphysikalische Dualität ermöglicht einem, mit den alltäglichen Wörtern ‘Teilchen’ und ‘Welle’ über das Verhalten des Quantenobjekts ‘elektromagnetische Strahlung’ = Licht zu sprechen.»

- Sandra, 11. Schuljahr: «Ich finde es sympathisch, dass sich mit trivialen Wörtern wie ‘Teilchen’ und ‘Wellen’ über das Verhalten von EM-Strahlung sprechen lässt.»

Die folgenden Auszüge illustrieren, wie sich das Konzept der Welle-Teilchen-Dualität entwickelt:

- Monica, 12. Schuljahr, ist noch unsicher: «Dualität ist für mich immer noch ein ziemlich abstrakter Begriff und ich kann noch nicht genau sagen, was der Begriff bedeutet. Jedoch weiss ich mittlerweile, dass alle Objekte mit Masse m und Geschwindigkeit v eine Dualität zeigen. Also wie z.B. Elektronen, Atome, Moleküle ...»

- Für Julia, 11. Schuljahr, nimmt die Bedeutung des Konzepts zu: «Bisher war mir bewusst, dass Licht sowohl Teilchen- als auch Wellenaspekt hat. Ich dachte, dies treffe nur auf Licht zu.»

- Silvia, 12. Schuljahr, lernt mit dem Begriff umzugehen: «Ich stelle mir die Dualität noch immer ziemlich gleich wie vorher vor. Ein konkretes Bild vor Augen zu haben ist mir noch immer nicht möglich, aber mit Hilfe von Vergleichen im Skript oder in Videos, fällt es mir leichter, die Dualität zu verstehen. Mir fällt auch immer mehr auf, in wie vielen Bereichen der Physik oder anderen Teilen des Lebens die Dualität eine Rolle spielt.»

- Leila, 12. Schuljahr, stösst sogar auf die Frage nach der Realität: «Die Dualität ist für mich noch immer schwer vorstellbar. Vor allem die Aussage, dass Elektronen durch die Dualität um den Atomkern nirgends und überall sein sollen, macht mir zu schaffen. Wie soll ich mir das vorstellen? Ich habe verstanden, dass man nur den Teilchen- und den Wellenaspekt einzeln betrachten kann, anders würde man verrückt werden, so die Quantenphysiker:innen. Was ich mich frage, ist, ob man weiss, wie sie wirklich aussehen? Setzt man die beiden Teilmessungen zusammen und daraus ergibt sich ein Bild? Eine grundsätzliche Frage, die ich mir gestellt habe, während ich über die Dualität nachgedacht habe, ist, ob wir überhaupt die Welt in der Realität erfassen.»

- Die Sicht von Lena, 12. Schuljahr, weist schon in Richtung Unbestimmtheitsrelation: «Meine Sichtweise auf die Dualität hat sich hauptsächlich in Bezug auf die Elektronen verändert, weil es mein bisheriges Wissen fast ein bisschen auf den Kopf gestellt hat :). Elektronen sind ganz anders, als ich sie mir vorgestellt habe. Dadurch sehen auch Atome anders aus als in meiner Vorstellung. Elektronen sind durch die Dualität nicht lokalisierbar.»

Zusammenfassung: Nach einer Angewöhnungsphase erlaubt die Welle-Teilchen-Dualität, mit vertrauten Begriffen über scheinbar paradoxe Phänomene von Objekten zu sprechen, die nur über Experimente zugänglich sind. Später kann die Dualität als Werkzeug zum qualitativen Verstehen von Atomen dienen. Am Schluss bleibt Dualität beim Arbeiten mit Quantenobjekten warnend im Hinterkopf: Quantenobjekte erlauben nur Wahrscheinlichkeitsaussagen.

5.3.6 Aussagen zu Elementen von «Nature of Science»

Die Elemente von NoS sind in den FACETTEN über biografische und historische Ergänzungen eingebaut. Sie stossen bei vielen Lernenden auf Interesse:

- Luise, 11. Schuljahr: «Ich fand es schön, dass auch die Physikerin Hertha Spöner erwähnt wird.»

- Marion, 11. Schuljahr: «Es überraschte mich, dass Einstein in so kurzer Zeit so viele Dokumente veröffentlichte.»

- Mia, 11. Schuljahr: «Es ist spannend zu erfahren, wie sich die Forschung rund um das Atom über die Jahre verändert hat.»

Wie bereits in 5.3.2 erwähnt, gibt es auch Kritik:

- Sven, 11. Schuljahr: «Der Teil von Albert Einsteins Interessensausgang und dem Treffen von 1910/1911 über die Quantentheorie mit Max Planck und Ernest Solvay hat mich wenig interessiert.»

- Sabine, 11. Schuljahr: «Im Text geht es für mich eher um Geschichte von Physik als um Physik selber (und das Fach Geschichte mag ich überhaupt nicht).»

Thea, Mia und Julia erkennen die Dynamik der Wissenschaft, ein wesentliches Element von NoS:

- Thea, 11. Schuljahr, formuliert eine weit über die Quantenphysik hinausreichende Einsicht: «Es überraschte mich, dass die Physik im Grunde nicht einfach schon da ist, sondern von Menschen erarbeitet wird.»

- Mia, 11. Schuljahr, ist überrascht davon, dass ein Wissenschaftler anfänglich nicht den vollen Inhalt seiner Entdeckung kennt: «Mich überraschte, dass Schrödinger selbst die Bedeutung der ψ -Wellen nicht kannte.»

- Julia, 11. Schuljahr, realisiert die Bedeutung von theoretischen Arbeiten für den physikalischen Fortschritt: «Ich fand es interessant, dass Louis de Broglie diese Idee ohne experimentelle Stütze aufbauen konnte.»

Die nur knapp angedeutete Genderproblematik fällt Mara (11. Schuljahr) auf: «Mir ist aufgefallen, wie wenige Frauen im Skript erwähnt werden und somit wie (scheinbar) wenige Frauen die Geschichte der Physik geprägt haben.»

Auf die Bedeutung der Physik als Grundlage für die anderen Naturwissenschaften weisen Lukas und Thea hin:

- Lukas, 11. Schuljahr: «Was ich nicht wusste, ist, dass der Treibhauseffekt eigentlich durch Absorption und anschließende Resorption von Infrarotstrahlen passiert.»

- Thea, 11. Schuljahr: «Mich überrascht, wie eng die Quantenphysik mit der Quantenchemie verbunden ist, oder besser gesagt eigentlich fast das Gleiche sind.»

Auch die Hinweise auf die Wechselwirkung zwischen Physik und Technik werden oft positiv aufgenommen:

- Livia, 11. Schuljahr: «Es überraschte mich zu erfahren, wie ein Laser aufgebaut ist. Ich habe auch schon einen Laserpointer benutzt, aber nie wirklich gewusst, wie er funktioniert.»

- Davide, 11. Schuljahr: «Zudem erstaunte mich, dass Solarzellen nur einen Wirkungsgrad von 10% haben und die Erhöhung ihres Wirkungsgrades so kompliziert und aufwendig ist.»

Zusammenfassung: Die meisten Lernenden begrüßen die Integration von NoS-Elementen in die Lernumgebung. Besonders Bezüge zu Menschen und zu Anwendungen im Alltag stoßen auf Interesse. Eine nicht zu vernachlässigende Minderheit kritisiert «allgemeinbildende Zusatzinformationen». Diese seien tendenziell ablenkend oder sogar störend.

6 Diskussion und Ausblick

6.1 Entwicklung und Evaluierung einer Lernumgebung: Bilanz

Diese Arbeit setzte sich zwei Ziele: Erstens die Entwicklung und zweitens die Evaluierung einer didaktisch rekonstruierten Lernumgebung zur Quantenphysik für das gymnasiale Grundlagenfach in den Klassenstufen 10 bis 12.

Die im Kapitel 4 dargestellten, nach der Methodik der Didaktischen Rekonstruktion entwickelten und mehrfach erprobten FACETTEN DER QUANTENPHYSIK ermöglichen im vorgegebenen Rahmen einen dem Grundlagenfach angepassten Unterricht zur Quantenphysik. Sie erleichtern Binnendifferenzierung für besonders NoS- oder MINT-interessierte Lernende. Sie sind auf dem Web für Unterrichtszwecke frei verfügbar (vgl. Download).

Die zentralen Elemente der Lernumgebung wurden auf verschiedene Arten evaluiert. Die Evaluierung zeigt:

- Die FACETTEN taugen aus der Perspektive des Schulsystems (Curriculum, Zeit, Vorkenntnisse usw.). Der modulare Aufbau der Lernumgebung ermöglicht der Lehrperson eine Auswahl von gymnasialen Lernzielen anzustreben, zu prüfen und zu bewerten (vgl. 5.1.3). Einschränkend muss festgehalten werden, dass Themen, die in manchen Lehrgängen als wichtig eingestuft werden, etwa das Experiment von Compton, die Unbestimmtheitsrelationen oder die EPR-Korrelationen, zusätzliche Module und wesentlich mehr Unterrichtszeit erfordern.

- Die FACETTEN taugen aus der Perspektive der Physikdidaktik, denn die Vorstellungen der Lernenden entwickeln sich signifikant in Richtung der quantenphysikalischen Konzepte der Fachwissenschaft (vgl. 5.2).

- Die FACETTEN taugen aus der Perspektive der Lernenden. Im Grundlagenfach, in dem die Nicht-MINT-Gymnasiast:innen dominieren, arbeiten die meisten Lernenden gerne mit ihnen (vgl. 5.3.2).

Mit grösseren Ressourcen wäre es möglich, die vorliegenden Materialien methodisch weiterzuentwickeln, damit sie nicht nur als Textdokumente, sondern interaktiv angeboten werden könnten. Ebenfalls mehr Ressourcen erforderte eine weitergehende Evaluation, die insbesondere Interviews mit Lernenden und Lehrenden beinhaltet und die auch die ergänzenden Elemente der Lernumgebung untersuchen sollte.

6.2 Strukturen und Elemente der Lernumgebung: Bilanz

Die Forschungsfrage 1 fragte nach den Strukturen und Elementen einer didaktisch rekonstruierten Lernumgebung zur Quantenphysik, die sich spezifisch an Nicht-MINT-Lernende richtet. Sie kann folgendermassen beantwortet werden:

- Die hier in den Kapiteln 2 und 3 angestellten Überlegungen führen zur Feststellung, dass die semiklassische Quantenphysik des Lichts vor einer Einführung in die Quantenmechanik erfolgen soll. Die Quantenphysik des Lichts ermöglicht schon beim Einstieg viele Bezüge zu Natur und Technik und damit zum Alltag der Lernenden. Die Welle-Teilchen-Dualität der Quantenobjekte verknüpft beide Gebiete. Weil sich die Lernumgebung speziell an Nicht-MINT-Lernende richtet, wird der Zustandsbegriff nicht mit freien Quantenobjekten, sondern mit im Atom gebundenen Elektronen eingeführt. Das ermöglicht Beziehungen zu Inhalten von Chemie- und Biologie.

- Spezifisch für Nicht-MINT-Lernende sind die integrierten biografischen und historischen Informationen und Aktivitäten in den FACETTEN. Nur an korrekt dargestellten, konkreten Einzelfällen erschliessen sich viele der verschiedenen Wesenszüge der Wissenschaft «Physik», die mit NoS gekennzeichnet werden.

- Die Angebote zur Binnendifferenzierung erlauben es der Lehrperson «manchen etwas» zu bringen (in Anlehnung an Goethe), und damit die breite Streuung von Interessen und Kompetenzen in Grundlagenfach-Klassen zu beachten.

Die Forschungsfrage 1 wird mit diesen Informationen konstruktiv beantwortet. Andere Lernwege sind jedoch möglich, beispielsweise ein Lernweg über die prinzipiell einfacheren, aber abstrakteren 2-Zustände-Systeme, die als Grundlage für das Verständnis des Quantencomputers unumgänglich sind. Nur ein Schulversuch mit Vergleichsklassen unter den gleichen Rahmenbedingungen könnte zeigen, ob Alternativen zu gleichen oder sogar besseren Ergebnissen führen. Dabei müssten auch die Motivationsentwicklung und die NoS-Lernprozesse verglichen werden.

6.3 Vorstellungsänderungen in der Quantenphysik: Bilanz

Wie in Figur 15 dargestellt ist, stützen sich die Antworten zur Forschungsfrage 2 auf die Verbindung der Ergebnisse der unterschiedlichen Instrumente Zeichnungen, Fragebogen und Tagebücher:

(1) Die Entwicklung der Vorstellungen der Lernenden zum Licht und zum Atom kommen im Vergleich von Prä- und Post-Zeichnungen zum Ausdruck. Die Kodifizierung ist in Anh. I.6 angegeben. In 5.1.4 ist dargelegt, weshalb Zeichnungen wenig zuverlässig sind. Die in 5.2.2 angegebenen Korrelationen der Zeichnungen mit objektiveren Grössen weisen darauf hin, dass Zeichnungen den Lehrpersonen zumindest ein erstes Bild der Schülervorstellungen ermöglichen. An dieser Stelle kann nur festgehalten werden, dass sich die Vorstellungen der Lernenden zum Licht und zum Atom mehr (vgl. Fig. 13) oder weniger in Richtung wissenschaftlicher Konzepte entwickeln. Die NoS-Elemente können vielleicht mit Mind-Maps, aber nicht mit spontanen Zeichnungen erfasst werden.

(2) In Abschnitt 5.2 ist ausgeführt, wie Prä- und Postfragebogen zur quantitativen Erfassung der Entwicklung der Konzepte eingesetzt wurden. Die bearbeitete Quantenphysik wurde mit 4 Bereichen (vgl. Anhang I) abgedeckt.

In der Tabelle 2 sind Cohens Effektstärken und die Signifikanz angegeben. Die Vorstellungen zum Licht entwickeln sich um mittelmässige 0.39 bei einer zufriedenstellenden Signifikanz von 1 %. Die Vorstellungen zum Atom hingegen wachsen bei gleicher Signifikanz um 0.73. Das ist ein grosser Effekt. Mit einer besseren Signifikanz kann sogar ein Zuwachs von 0.75 eines «integralen Quantenkonzepts» nachgewiesen werden (Tab. 3).

(3) Das im Abschnitt 5.3 vorgestellte, strukturierte Lerntagebuch erwies sich als hilfreiches Instrument sowohl zur Weiterentwicklung der Lernumgebung als auch zur Untersuchung von Lernprozessen. Einzelne Formulierungen in 5.3.3 und 5.3.4 zeigen das Ringen der Jugendlichen mit den Anforderungen der Quantenphysik, namentlich mit der Unanschaulichkeit. Manche Formulierungen in 5.3.6 weisen stark auf Konzeptwechsel in NoS-Bereichen hin. Der direkte Nachweis einer positiven Entwicklung ist jedoch mit dem vorliegenden Material nicht zu erbringen.

Zusammengefasst erlaubt die Evaluierung der Lernumgebung die Frage nach den Vorstellungsänderungen der Gymnasiastinnen und Gymnasiasten zum Licht, zum Atom und zu NoS-Elementen beim Arbeiten mit dieser Lernumgebung folgendermassen zu beantworten:

- Die Vorstellungen der Lernenden vom Licht entwickeln sich schwach von einem gemischten oder reinen Wellen- oder sogar Strahlenbild in Richtung eines neuartigen, abstrakteren Wesens mit dem Namen «Quantenobjekt». Dieses Lichtquant zeigt sowohl Wellen- als auch Teilchenaspekt, je nach Untersuchungsweise.
- Die Vorstellungen vom Atom entwickeln sich merklich weg vom rein teilchenartigen Planetenbild in Richtung «flauschiges Wesen», das mit dem Zustandsbegriff erfasst wird, der nur Wahrscheinlichkeitsaussagen erlaubt.
- Die Arbeit mit den FACETTEN stimuliert das Nachdenken über Physik. Die Vorstellung von Physik als «vorgegebener Wahrheit» entwickelt sich bei einigen Lernenden in Richtung «Physik wird von Menschen gemacht». Zudem wird die fiktive Methodik «Theorie ergibt sich auf der Basis von Experimenten» erschüttert und in Richtung einer Wechselwirkung zwischen zwei sich ergänzenden, gleichberechtigten Arbeitsweisen entwickelt.

6.4 Welle-Teilchen-Dualität: Bilanz

Die mit der Zielsetzung verknüpfte Arbeitshypothese «Das historisch erfolgreiche, heuristische Prinzip der Welle-Teilchen-Dualität bietet eine Sprech- und damit eine Lernhilfe.» wird in der Forschungsfrage 3 hinterfragt: «Wie weit hilft das heuristische Prinzip der Welle-Teilchen-Dualität beim Lernen von Quantenphysik?» – Im Rahmen dieser Untersuchung kann kein quantitativer Nachweis für den Nutzen der Arbeitshypothese erbracht werden. Diesen könnte nur ein umfangreicherer Schulversuch (vgl. 6.1) liefern. Trotzdem kann zusammenfassend festgehalten werden:

- Die fachwissenschaftliche Bedeutung der Welle-Teilchen-Dualität wurde im Abschnitt 3.3.2 untersucht. Es wurde nachgewiesen, dass sie wissenschaftlich korrekt und aktuell ist – im Gegensatz zur gegenteiligen Behauptung.
- Die positive Rolle der Welle-Teilchen-Dualität als Scaffolding-Element beim Lernen von Quantenphysik kommt explizit in den Lerntagebüchern zum Ausdruck, wie in Abschnitt 5.3.5 dargelegt ist.
- Der Nutzen der Arbeitshypothese wird bestätigt einerseits durch die in 6.1 festgehaltene Brauchbarkeit der Lernumgebung und andererseits durch die damit erreichten Konzeptwechsel, die in 6.3 zusammengefasst sind.

6.5 Ausblick

Die vorliegende Design-Based-Research Arbeit könnte sowohl im Hinblick auf einen besseren «Design» der Lernumgebung als auch auf einen vertiefteren «Research mit» der Lernumgebung fortgesetzt werden.

Denkbare Arbeiten in Richtung Design sind: (1) Ein Lektorat im Hinblick auf eine bessere Lesbarkeit und eine professionelle Überarbeitung des Layouts sind wünschenswert. (2) Erprobungen der bisher noch nicht benutzten Fortsetzungsmodule und Ergänzungen könnten zeigen, inwiefern sich eine weitere Ausarbeitung lohnt. (3) Einheiten entwickeln, in denen die Beziehungen zwischen der Klima- und der Quantenphysik dargestellt wird.

Denkbare Arbeiten in Richtung Research sind: (1) Modul 1 in grösserem Umfang im 10. Schuljahr einsetzen und in einer Studie mit Erprobungs- und Referenzpopulation die Frage klären, welchen Einfluss der vorgesehene, aber nur in zwei Fällen erprobte Abstand von einem Schuljahr zum Modul 2 auf den Lernprozess hat. (2) Eine umfangreichere Erprobung aller Materialien mit stärkerer Kontrolle der Rahmenbedingungen, namentlich der Unterrichtszeit, um belastbare Daten für Triangulation und Differenzierung, z. B. nach Geschlecht (Brovelli et al. 2019), zu erhalten. (3) Die

Frage nach dem Nutzen der Welle-Teilchen-Dualität mit Interviews vertieft untersuchen: Erlaubt sie die Vermeidung von Lernschwierigkeiten bei der Zustands- resp. Wellenfunktion, bei der Unbestimmtheitsrelation, bei der Ununterscheidbarkeit, der Nicht-Lokalität und der Verschränkung, oder behindert sie im Gegenteil das Lernen? (4) Die im Testinstrument entwickelten vier Konstrukte mit den Themen «Zustand» und «Unbestimmtheit» zu einem «Beginners' Quantum Concept Inventory» erweitern und – Ressourcen vorausgesetzt – dieses in die informativere Form eines Multiple Choice Tests bringen und als Vorstufe für das Quantum Concept Inventory testen, welches das Quantum Technology Education Projects (QCI, 2022) sucht. (5) Mit diesem oder ähnlichen Instrumentarien die Frage angehen, welche Leistungen verschiedene Lernangebote erbringen (Müller und Wilhelm, 2021, S. 339) und mit so gewonnenen Ergebnissen den Zusammenhang zwischen diagnostizierten individuellen Vorstellungen der Lernenden und verschiedenen Lernangeboten optimieren. Besonders interessant könnte sein, dabei die sich an den Grundideen der Quantenphysik orientierende Auswertungsmethodik von Bao & Redish (2006) zu benützen. Hoffentlich wird in Zukunft die von Duit zugespitzte Frage positiv beantwortet (Duit, 2010): «Werden die Ergebnisse fachdidaktischer Forschung zur Verbesserung des Physikunterrichts beitragen – oder könnten sie es nur?»

Download

Download des Materials für den Unterricht:

<https://www.ife.uzh.ch/de/research/niebert/forschung/facettenquantenphysik.html>

Download der ganzen Dissertation: <https://www.zora.uzh.ch/id/eprint/233601/>

Dank

Der Autor dankt den Erziehungswissenschaftlern Kai Niebert und Franz Eberle, den Physikern Christoph Aegerter und Norbert Straumann (alle UZH), Markus Sigrist (ETH) und Oliver Passon (Uni Wuppertal), und den Physiklehrerkollegen Beat Gasser (KS Wattwil), Hans-Ulrich Deller (KS Frauenfeld), Richard Heimgartner (KS Aarau) und Urban Seger (Gymnasium Hofwil) sowie vielen anderen für die Unterstützung bei dieser Arbeit. Zusätzlich ist er für die hilfreiche Kritik im Peer Review Prozess zu Dank verpflichtet.

Anhänge

Anhang I: Fragebogen – Ausgestaltung und einige zusätzliche Daten

Zu den Bedeutungen der Symbole siehe 5.2.

Antwortblock.

<p>Ich stimme der Aussage in folgendem Grad zu: <i>Es stehen 5 Grade zur Auswahl → → → → →</i> Bitte nur eines der Felder ankreuzen.</p>	GANZ	EHER SCHON	HALB HALB	EHER NICHT	GAR NICHT
---	------	---------------	--------------	---------------	--------------

I.1 4 Konstrukte zur Quantenphysik mit je 4 Items (N = 89). Die Items waren gemischt. Die * fehlten.

LICHT	<i>m</i>	<i>s</i>	<i>m'</i>	<i>s'</i>
*Licht ist ein Strom von Lichtteilchen (Photonen).	*3.9	0.88	*3.6	1.07
*Ein Photon ist ein winziges Kügelchen, das mit Lichtgeschwindigk. unterwegs ist.	*3.6	1.04	*3.5	1.05
*Ein natürliches Ding kann nie Teilchen- und Welleneigenschaft zeigen.	*2.6	1.15	*2.0	1.20
Bei d. Bräunung der Haut spielt die Quantennatur des Lichts eine Rolle.	3.3	0.94	4.0	1.07
Mittelwerte auf der Skala LICHT	2.8		3.2	
<i>Cronbachs Alpha</i>	0.79		0.87	

ATOM	<i>m</i>	<i>s</i>	<i>m'</i>	<i>s'</i>
*Das Atom hat eine ähnliche Struktur wie das Sonnensystem.	*3.6	1.17	*2.6	1.27
Die Oberfläche eines Atoms ist flauschig und unbestimmt.	2.3	1.00	3.7	1.32
*Im Atom bewegen sich die Elektronen auf bestimmten Bahnen um den Kern.	*3.6	1.28	*2.9	1.44
Man kann vereinfacht sagen: 'Ein Elektron ist überall und nirgends.'	3.5	1.19	4.1	1.15
Mittelwerte auf der Skala ATOM	2.6		3.5	
<i>Cronbachs Alpha</i>	0.81		0.89	

FREIES ELEKTRON	<i>m</i>	<i>s</i>	<i>m'</i>	<i>s'</i>
*Elektronen, Protonen, Neutronen usw. sind winzige Teilchen.	*3.8	1.21	*3.5	1.30

Schiesst man ein Elektron auf einen Doppelspalt, kann man nicht vorhersagen, wohin es fliegt.	3.0	1.07	3.1	1.26
*Man kann Ort e. Elektrons nicht angeben, weil es klein und schnell ist.	*3.6	1.26	*3.6	1.14
Ein Elektron kann durch eine intakte Isolation dringen, ohne sie zu zerstören.	3.2	1.25	3.6	1.17
Mittelwerte auf der Skala FREIES ELEKTRON	2.7		2.9	
<i>Cronbachs Alpha</i>	0.85		0.83	

ZUFALL	m	s	m'	s'
*In d. Natur hat jede Erscheinung e. Ursache, man kennt sie evtl. nicht.	*4.5	0.69	*3.7	1.29
Der radioaktive Zerfall geschieht spontan, ohne Ursache.	2.5	1.25	3.2	1.27
*Mit genug Geld und Zeit, spielte der Zufall beim Experimentieren keine Rolle.	*3.2	1.20	*2.7	1.28
Mit Schrödingers Psi-Wellen kann man Wahrscheinlichkeiten ausrechnen.	2.9	1.00	3.5	1.27
Mittelwerte auf der Skala ZUFALL	2.4		3.1	
<i>Cronbachs Alpha</i>	0.72		0.90	

I.2 2 Konstrukte zu Nature of Science mit je 4 Items (N = 89)

BEGRIFFSBILDUNG	m	s	m'	s'
*Ein Modell ist eine verkleinerte resp. vergrößerte Darstellung der Wirklichkeit.	*4.2	1.2	*3.3	1.6
Die Modelle der Physik sind bewusste Vereinfachungen.	4.5	0.8	4.5	0.7
Es kommt darauf an, ob ich sage: 'Elektron <i>ist</i> ' oder ' <i>verhält sich wie...</i> '.	4.0	1.2	4.1	1.1
*Es kommt nicht darauf an, ob Wellen <i>modell</i> oder 'Wellen <i>aspekt</i> . [N zu klein]	-	-	-	-

NATURE OF SCIENCE	m	s	m'	s'
Es gibt techn. Neuheiten, von denen man nicht alle phys. Grundlagen kennt.	3.9	1.2	3.8	1.1
*Die Technik ist auf die Physik angewiesen, umgekehrt aber nicht.	*3.1	1.6	*2.8	1.5
In der Physik gibt es evtl. Fortschritt allein auf Grund einer neuen Idee.	4.6	0.5	4.6	0.5
*Für Fortschritt in der Naturwissenschaft ist das Exp. wichtiger als die Theorie.	*3.6	1.0	*3.4	1.0

I.3 5 Items zu Interessen (nur im Prä-Fragebogen; N = 89).

Die Angaben m_u und m_o bezeichnen die untersten und obersten Werte der Klassenmittel.

MINT-INTERESSEN (vor dem Unterricht)	m	\hat{s}	m_u	m_o
Mein Interesse für Physik ist gross.	2.9	1.1	2.4	4.6
Mein Interesse für Mathematik ist gross.	3.1	1.2	2.6	4.2
Mein Interesse für Chemie ist gross.	3.2	1.1	2.6	3.7
Mein Interesse für Technik (Handy, Auto, künstl. Gelenk usw.) ist gross.	3.5	1.1	2.8	4.4
Mein Interesse für Umweltfragen ist gross.	3.8	1.0	3.7	4.1

I.4 5 Items zur Selbsteinschätzung (nur im Post-Fragebogen; N = 89)

SELBSTEINSCHÄTZUNG (nach dem Unterricht)	m'	\hat{s}
Ich habe einige wesentliche Konzepte der Quantenphysik verstanden.	3.3	0.8
Ich habe Mühe mit den Konzepten der QP trotz der Hilfestellungen in den FACETTEN.	4.0	0.9
Durch die Arbeit mit den FACETTEN ist mein Interesse an Quantenphysik gewachsen.	2.8	1.1
Durch die Arbeit ... ist mein Interesse am Wirken von Physiker/innen gewachsen.	2.7	1.2
Durch die Arbeit ... ist mein Interesse an der Geschichte der Physik gewachsen.	2.8	1.0

I.5 3 Items zu Einstellungen (Aus dem Prä-Fragebogen der Entwicklungsphase; N ca. 20 / 20 / 80)

PAM = Physik & Anwendungen der Math.; B&C = Biologie & Chemie; ALL = alle Nicht-MINT-Schwerpunkte

INTERESSEN UND NEIGUNGEN (vor dem Unterricht)	PAM	B&C	ALL
*Die Diskussion der Grundlagen der Physik gehört in den Philosophie- nicht in den Physikunterricht.	*1.7	*2.1	*1.7
Im Gymnasium soll die Beziehung zwischen den Naturwissenschaften und der Technik behandelt werden.	4.1	3.7	3.9
In der Physik überzeugen mich nur Realexperimente, denn Simulationen könnten gefälscht sein.	-	2.8	2.9

Anhang II: Lerntagebuch: Strukturvorgaben und ein Beispiel

II.1 Informationen, welche die Lernenden vorab schriftlich erhielten

Zu Lerntagebüchern allgemein

Zweck eines Lerntagebuchs ist es primär, darüber nachzudenken, was man gelernt hat. Sekundär hilft es auch zu dokumentieren, wie man gelernt hat.

Seine äussere Form ist die eines Tagebuchs mit regelmässigem Eintrag. Das Lerntagebuch kann in entsprechender Form für das Lernen von verschiedensten Dingen von der 1. Klasse bis zur Universität eingesetzt werden.

Das Führen eines Lerntagebuchs kostet Zeit. Diese Zeit ist gut eingesetzt, wenn man sein Lerntagebuch nachher auch wieder liest, besonders vor einer Schlussprüfung.

Lerntagebuch zum Unterricht FACETTEN DER QUANTENPHYSIK

Um den Zeitaufwand in Grenzen zu halten, führen wir abwechselnd (alphabetisch nach Vornamen) zu dritt ein Gruppen-Tagebuch. Aus praktischen Gründen führen wir es online als Google Doc. Das Tagebuch muss von de*r Autor*in bis zum Vorabend der nächsten Lektion ausgefüllt sein.

Die Lehrperson hat Lese- und Kommentier-Rechte.

Einrichtung: Am Tag nach der ersten Lektion bestätigt die Lehrperson den Zugriff.

Übungsphase: Nach der ersten Woche gibt die LP ein kurzes Feedback.

Anwendungsphase: zwei bis drei weitere Einsichten durch die LP, ggf. mit Feedback.

Bewertung: Zum Abschluss gibt die LP eine begründete Gruppennote zum Lerntagebuch, diese beinhaltet nebst dem Endzustand auch 'Snapshots' während der Anwendungsphase.

→ Die Gewichtung dieser Leistungsnachweises beträgt 50%.

Inhalt, Form und Umfang

Das Tagebuch ist in erster Person gehalten. Die Sprache muss nicht literarisch, aber korrekt sein. Eingebundene Illustrationen sind erlaubt. Pro Unterrichtssequenz (Doppellektion) unter keinen Umständen mehr als eine A4-Seite. Eine Zusammenfassung der Lektion ist nicht nötig und wäre Zeitverschwendung.

Unter dem Datum der Lektion steht die Angabe, welche Teile der FACETTEN benutzt wurden.

Nötig sind hingegen persönliche Antworten auf folgende Fragen:

Was habe ich heute gelernt?

Was überraschte mich am meisten?

Was fand ich am schwierigsten zu verstehen?

Was verstand ich nicht, obwohl es vermutlich wichtig ist?

Welche Quellen ausserhalb der Unterlagen habe ich zu Hilfe genommen?

Allenfalls ein subjektiver Kommentar

II.2 Beispiel der Antworten einer Schülerin zu einer Doppellektion

Was habe ich heute gelernt?

Ich habe heute gelernt, dass man Lichtquanten, wenn es um ihre Anzahl geht, Photonen nennt. Dieses Wort habe ich zuvor nämlich noch nie gehört. Ich wusste nicht, dass die Erfindung des Lasers eine solch grosse Errungenschaft war und dass man damit einzelne Photonen im Sinn der QED erzeugen kann. Kurzwelliges Licht ist mit LED viel schwieriger herzustellen und es gab deshalb einen Nobelpreis fürs «Erfinden» des blauen LED. Ich lernte, dass wir auch an uns selber den Zusammenhang zwischen Wellenlänge und Quantenenergie sehen können. (Nur hochfrequentes UV-Licht vermag es, die Haut zu bräunen.)

Was überraschte mich am meisten?

Mich überraschte, wie Glühwürmchen und Laternenfische mit Stoffwechselreaktionen Licht erzeugen können, und das mit einem extrem viel höheren Wirkungsgrad als der von Glühlampen, die lange in der Technik dominiert haben.

Was fand ich am schwierigsten zu verstehen?

Ich fand es schwierig zu verstehen, was ein Photon genau ist. Auch konnte und kann ich mir dies immer noch nicht so wirklich vorstellen.

Was verstand ich nicht, obwohl es vermutlich wichtig ist?

Mit dem Kapitel 1.5.3. «Erzeugung und Verwandlung von Licht beschreiben und zeichnen» habe ich ziemliche Verständnisschwierigkeiten. Ich kann mir das kaum vorstellen und auch nicht wirklich nachvollziehen.

Welche Quellen ausserhalb der Unterlagen habe ich zu Hilfe genommen?

<https://youtu.be/7fLFOgSVFJM>

Allenfalls ein subjektiver Kommentar

Mich hat dieses Kapitel teilweise etwas verwirrt, da es für meine Verhältnisse etwas schnell von einem Beispiel/Thema zum nächsten wechselt, ohne dieses genauer zu erläutern oder mehr darauf einzugehen.

References

- Arroyo Camejo, S. (2006). *Scurrile Quantenwelt*. Frankfurt: Fischer.
- von Aufschnaiter, S. & von Aufschnaiter, C. (2001). Eine neue Aufgabenkultur für den Physikunterricht. *MNU*, 54 (7), 409-416.
- Bach, A. (1989). Eine Fehlinterpretation mit Folgen: Albert Einstein und der Welle-Teilchen Dualismus. *Archive for History of Exact Sciences*, 40, 2, 173-206.
- Bader, F. (1996). *Eine Quantenwelt ohne Dualismus*. Hannover: Schroedel.
- Bao, L. & Redish, E. F. (2006). Model analysis: Representing and assessing the dynamic of student learning. *Phys. Rev. Spec. Topics – Phys. Ed. Research*, 2, 010103.
- Bell, J. (1990). Against «Measurement». In A. I. Miller (Ed.), *Sixty-two years of uncertainty* (S. 17-31). New York: Plenum Press.
- Bitzenbauer, P. & Meyn, J.-P. (2020). Inhaltsvalidität eines Testinstruments zur Erfassung deklarativen Wissens zur Quantenoptik. *PhyDid-B - Didaktik der Physik - Beiträge zur DPG-Frühjahrstagung*, 149-155.
- Bohr, N. (1913). On the Constitution of Atoms and Molecules, *Philosoph. Magazin*, 26, 857-875.
- Bohr, N. (1928). Das Quantenpostulat und die neuere Entwicklung der Atomistik. *Naturwissenschaften*, 16, 245-257.
- Born, M. (1926). Quantenmechanik der Stossvorgänge, *Zeitschrift für Physik* 37, 863-867.
- Born, M. (1951). *The Restless Universe*. New York: Dover.
- Born, M. & Biehm, W. (1968). Dualism in quantum theory. *Physics Today*, 21 (8), 51-55.
- Brachner, A. & Fichtner R. (1977). *Quantenmechanik für Lehrer und Studenten*. Hannover: Schrödel.
- de Broglie, L. (1924). *Recherches sur la théorie des Quanta*. Paris: Université (thèse).
- Bronner, P. (2010) *Quantenoptische Experimente als Grundlage eines Curriculums zur Quantenphysik des Photons*. Berlin: Logos.
- Brovelli, D. et al. (2019). Geschlechtersensibler Naturwissenschafts- und Technikunterricht – eine Vignettenstudie bei angehenden Lehrpersonen. In E. Makarowa, *Gendersensible Berufsorientierung und Berufswahl* (S. 149-163). Bern: hep.
- Budde, M. (2004). *Lernwirkungen in der Quanten-Atom-Physik. Fallstudien über Resonanzen zwischen Lernangeboten und SchülerInnen-Vorstellungen*. Berlin: Logos.
- Cappelli, B. et al. (2008). *Physik anwenden und verstehen*. 1. Auflage. Zürich: Orell-Füssli.
- Cheong, Y. & W. & Song, J. (2014). Different Levels of the Meaning of Wave-Particle duality and a Suspensive Perspective on the Interpretation of Quantum Theory. *Sci & Education*, 23, 1011-1030.
- Compton, A. H. (1923). A quantum theory of the scattering of x-rays etc. *Phys. Rev.*, 21, 483-502.
- Damour, T. & Burniat, M. (2017). *Das Geheimnis der Quantenwelt*. München: Knesbeck.
- Davisson, C. J. & Germer, L. H. (1927). Reflection of Electrons by a Crystal of Nickel. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 14, 317.
- Dreyer, H. P. (2015). *MUPET Mathematik- und Physikentwicklung am Gymnasium unter Berücksichtigung der Technik. Technischer Bericht*. Zürich: ETH. <https://math.ch/mupet/MUPET.html> Zugegriffen: 10. Juni 2022.
- Dreyer, H. P. (2022). *Quantenphysik als Teil gymnasialer Bildung – Entwicklung und Evaluierung einer didaktisch rekonstruierten Unterrichtsumgebung*. Zürich: Universität (Dissertation).
- Duane, W. & Hunt, F. L. (1915). On X-Ray Wave-Lengths. *Phys. Rev.*, 6 2, 166–172.
- Duit, R. (2010). Fachdidaktische Forschung und Verbesserung des Physikunterrichts, *MNU*, 63 6, 324-3331.
- Eberle, F. et al. (2008). *Evaluation der Maturitätsreform 1995. Schlussbericht zur Phase II*. Bern: EDK.
- EDK (2023). *Weiterentwicklung der gymnasialen Maturität*. Bern: EDK. <https://matu2023.ch/de/rahmenlehrplan> > TP1_Vade_DE(3).pdf Zugegriffen: 23. Aug. 2023.
- EDK (2024). *Rahmenlehrplan Maturitätsschulen*. Bern: EDK <https://www.edk.ch/de/themen/gymnasium> > Rahmenlehrplan gymnasiale Maturitätsschulen vom 20. Juni 2024. Zugegriffen: 04. Aug. 2024.
- Ehmann, T. (2008). *Erfassung und Förderung metakognitiver und motivationaler Fähigkeiten: Ein halbstandardisiertes Lerntagebuch für Schülerinnen und Schüler mit Migrationshintergrund*. Potsdam: Universität (Dissertation).
- Einstein, A. (1905). Über einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichts betreffenden heuristischen Gesichtspunkt. *Annalen der Physik*, 17, 132-148.
- Einstein, A. (1909). *Über die Entwicklung unserer Anschauungen über das Wesen und die Konstitution der Strahlung – Vorgetragen an der Versammlung Deutscher Naturforscher und Ärzte, Salzburg 21. September 1909, abgedruckt in Physikalische Zeitschrift*, 10, 817–825.
- Einstein, A. (1925). Quantentheorie des einatomigen idealen Gases – Zweite Abhandlung. *Sitzungsbericht der Preussischen Akademie der Wissenschaften*, 3.
- Einstein, A., Podolsky, B. & Rosen, N. (1935). Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete? *Phys. Rev.*, 47, 777-780.
- Feynman, R. P. (1947). In P. Galison, Feynman's War: Modelling Weapons, *Modelling Nature. Stud. Hist. Phil. Mod. Physics*, 29 3, 391.
- Feynman, R. P. (1964). *The Character of Physical Law. – The 1964 Messenger Lectures*. Cambridge (MA): MIT Press. Video: <https://twitter.com/bbcarchive/status/1025372232892198912> Zugegriffen: 10. Juni 2022
- Feynman R. P., et al. (1965). *Lectures on Physics Vol. III - Quantum Mechanics*. Reading MS.: Addison-Wesley.
- Feynman, R. P. (2018). *QED – Die seltsame Theorie des Lichts und der Materie*. München: Piper.
- Fink, H. (2023). Quantenphysik an der Schule. *Physik Journal* 10, 60.

- Fischler, H. (1996). Das Atommodell im Unterricht. In R. Duit & C. von Rhöneck (Hrsg.), *Lernen in den Naturwissenschaften* (S. 356-382). Kiel: IPN.
- Fischler, H., Gebhard, U. & Rehm, M. (2018). Naturwissenschaftliche Bildung und Scientific Literacy. In D. Krüger, I. Parchmann & H. Schecker, *Theorien in der naturwissenschaftsdidaktischen Forschung* (S. 11-29). Berlin: Springer.
- Flick, L. B. & Ledermann, N. G. (Eds.) (2006). *Scientific Inquiry and Nature of Science*. Dordrecht: Springer.
- Franck, J. & Hertz, G. (1914). Über Zusammenstöße zwischen Elektronen und Molekülen des Quecksilberdampfes und die Ionisierungsspannung desselben. *Verh. D. Phys. Gesellschaft*, 16, 457–467.
- Gamow, G. (1928). Zur Quantentheorie des Atomkernes. *Zeitschrift für Physik*, 51, 204.
- Giulini, D. (2005). “Es lebe die Unverfrorenheit!” – Albert Einstein und die Begründung der Quantentheorie. <http://arxiv.org > arXiv:physics/0512034 v1, 5>. Zugegriffen: 9. Juli 2022.
- Giulini, D. & Straumann, N. (2000). «...ich dachte mir nicht viel dabei...» Plancks ungerader Weg zur Strahlungsformel. *Physikalische Blätter*, 56, 37.
- Haroche, S. & Raimond, J. M. (2006). *Exploring the Quantum*. Oxford: University Press.
- Heering, P. (2010). False friends: What makes a science story inadequate for teaching? *Interchange: A Quarterly Review of Education*, 41 (4), 323–333.
- Heisenberg, W. (1925). Über quantentheoretische Umdeutung kinematischer und mechanischer Beziehungen. *Zeitschrift für Physik*, 33, 879–893.
- Heisenberg, W. (1927). Über den anschaulichen Inhalt der quantenmechanischen Kinematik und Mechanik. *Zeitschrift für Physik*, 43, 172-198.
- Heitler, W. (1973). Vom Wesen der Quantenchemie. *Physikalische Blätter*, 29 (6), 252-256.
- Holton, G., Rutherford, F. J. & Watson, F. G. (1970). *The Project Physics Course - Text*. New York & Toronto: Holt, Rinehart & Winston.
- Hund, F. (1972). *Geschichte der physikalischen Begriffe*. Mannheim: Bibliographisches Institut.
- Ireson, G. (1999). A multivariate analysis of undergraduate physics students' conceptions of wave-particle-like properties of quantum entities. *Eur. J. Physics*, 20, 193-199.
- Ireson, G. (2000). The quantum understanding of pre-university physics. *Physics Education*, 35, 15-21.
- Kattmann, U., Duit, R., Groppegiesser, H. & Komorek, M. (1997). Das Modell der Didaktischen Rekonstruktion – Ein Rahmen für naturwissenschaftsdidaktische Forschung und Entwicklung. *Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften*, 3 (3), 3-18.
- Kiefer, C. (2015) (Hrsg.). *Albert Einstein – Boris Podolsky – Nathan Rosen. Kann die quantenmechanische Beschreibung der physikalischen Realität als vollständig betrachtet werden?* Berlin: Springer.
- Klein, A. (1991). *Ringeln um die mathematisch-naturwissenschaftliche Bildung*. Bonn: Dümmler.
- Koch, K. (2015). *LED-Spektrometer mit LEGO*. Verein Schweizerischer Naturwissenschaftslehrer VSN. <https://www.vsn-shop.ch/produkte/spektrometer-mit-lego-1/> Zugegriffen 07. August 2024.
- Komorek, M., Fischer, A. & Moschner, B. (2013). Fachdidaktische Strukturierung als Grundlage für Unterrichtsdesigns. In M. Komorek & S. Prediger (Hrsg.), *Der lange Weg zum Unterrichtsdesign. Zur Begründung und Umsetzung fachdidaktischer Forschungs- und Entwicklungsprogramme* (S. 39–58). Münster u. a.: Waxmann.
- Krijtenburg-Lewerissa, K. et al. (2017). Insights into teaching quantum mechanics in secondary and lower undergraduate education. *Phys. Rev. Physics Education Research*, 13, 010109.
- Krüger, D., Parchmann, I. & Schecker, H. (Hrsg.) (2014). *Methoden in der naturwissenschaftsdidaktischen Forschung*. Berlin: Springer.
- Küblbeck, J. & Müller, R. (2002). *Die Wesenszüge der Quantenphysik*. Köln: Aulis.
- Küblbeck, J. (2015). Quantenphysik. In E. Kircher, R. Girwidz & P. Häußler (Hrsg.), *Physikdidaktik – Theorie und Praxis* (S. 479-502). Berlin: Springer.
- Kuhn, W. (1992). Quantenmechanik – Eine wissenschaftstheoretisch reflektierte Analyse ihres Ideengeschichtlichen Entwicklungsprozesses. In H. Fischler (Hrsg.), *Quantenphysik in der Schule* (S. 29-68). Kiel: IPN.
- Labudde, P. (2000). *Konstruktivismus im Physikunterricht der Sekundarstufe II*. Bern: Haupt.
- Landé, A. (1966). *Quantum Theory without Dualism*. Scientia, 60 (1), 208.
- Lederman, N. G. (2007). Nature of Science. In S. Abell and N. G. Lederman (Eds.), *Handbook of Research on Science Education* (S. 831-879). New Jersey: Lawrence Erlbaum.
- Lichtfeldt, M. (1992). *Schülvorstellungen in der Quantenphysik und ihre möglichen Veränderungen durch Unterricht*. Essen: Westarp.
- Lijnse, P. L. (1995). “Developmental Research” As a Way to an Empirically Based “Didactical Structure” of Science. *Science Education*, 79 (2), 189-199.
- MAR (2023). EDK. *Reglement über die Anerkennung kantonaler Maturitätszeugnisse*. Bern: EDK. https://matu2023.ch/de/>A_PLE-2023-2_d_03_gymnasiale-maturitaet.pdf Zugegriffen: 25. Oktober 2023.
- Mayring, P. (2015). *Qualitative Inhaltsanalyse*. Weinheim und Basel: Beltz.
- McComas, W. F. (1998). *The nature of science in science education*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers.
- Merzyn, G. (2008). *Naturwissenschaften Mathematik Technik – immer unbeliebter?* Baltmannsweiler: Schneider Verlag Hohengehren.
- Meyn, J.-P. (2013). Zur Geschichte des Photons. *Praxis der Naturwissenschaften – Physik in der Schule*, 63 (5), 44.
- von Meyenn, K. (2011). *Eine Entdeckung von ganz ausserordentlicher Tragweite – Schrödingers Briefwechsel zum Katzenparadoxon*. Heidelberg: Springer.

- Millikan, R. (1916). *A Direct Photoelectric Determination of Planck's "h"*. *Phys. Rev.*, 7 (3), 355-388.
- Müller, R. (2003). *Quantenphysik in der Schule*. Berlin: Logos.
- Müller, R. (2024). Im Kontext der Quanten. *Physik Journal* 23, 67-71.
- Müller, R. & Wilhelm, T. (2021). Unterrichtskonzeptionen zur Quantenphysik. In T. Wilhelm et al. (Hrsg.), *Unterrichtskonzeptionen für den Physikunterricht* (S. 335-368). Berlin: Springer
- Pais, A. (1986). *Raffiniert ist der Herrgott - Albert Einstein - Eine wissenschaftliche Biographie*. Heidelberg-Berlin: Spektrum Akademischer Verlag.
- Passon, O. (2018). *Die Geschichte der Quantentheorie - Mythen und Fakten*. <https://www.physikdidaktik.uni-wuppertal.de/fileadmin/physik/didaktik/Forschung/Publicationen/Passon/Quasigeschichte.pdf> Zugegriffen: 13. Juni 2022.
- Passon, O. & Grebe-Ellis, J. (2015). Was ist eigentlich ein Photon? *Praxis der Naturwissenschaften - Physik in der Schule* 64 (8), 46-48.
- Planck, M. (1900). Zur Theorie des Gesetzes der Energieverteilung im Normalspektrum. *Verhandlungen der Deutschen physikalischen Gesellschaft Berlin*, 2, 237-245.
- Planck, M. (1901). Über die Verbesserung der Wienschen Spektralgleichung. Über das Gesetz der Energieverteilung im Normalspektrum. *Annalen der Physik* 3, 553-563. (In anderer Form mitgeteilt in der Deutschen Physikalischen Gesellschaft, Sitzung vom 14. October und 19. December 1900.)
- Primas, H. (1990). Zur Quantenmechanik makroskopischer Systeme. In J. Audretsch & K. Mainzer (Hrsg.), *Wieviele Leben hat Schrödingers Katze?* (S. 209-244). Mannheim: Bibliographisches Institut.
- PSSC (1975). *PSSC Physik*. Braunschweig: Vieweg & Sohn.
- QCI (2022). *Community-based Development of the Quantum Concept Inventory*. <https://qtedu.eu/project/community-based-development-quantum-concept-inventory> Zugegriffen: 13. Juni 2022.
- Ramsauer, C. (1921). Über den Wirkungsquerschnitt der Gasmoleküle gegenüber langsamen Elektronen. *Annalen der Physik*, 64, 513-540.
- Reiser, B. J. (2004). Scaffolding Complex Learning: The Mechanisms of Structuring and Problematising Student Work. *J. of the Learning Sciences*, 13 (3), 273-304.
- ReleQuant (2016). *Quantum Physics*. Oslo: University. <https://www.einsteinianphysics.com/relequant-project/> Zugegriffen: 13. Juni 2022.
- RLP (1994). *Rahmenlehrplan für Maturitätsschulen*. Bern: EDK.
- Schecker, H. et al. (Hrsg.) (2018). *Schülervorstellungen und Physikunterricht*. Berlin: Springer.
- Schmüser, P. (2012). *Theoretische Physik für Studierende des Lehramts 1 – Quantenmechanik*. Berlin: Springer.
- Schmüser, P. (2015). Einführung in die Quantentheorie der elektromagnetischen Strahlung. <https://www.desy.de/~pschmues/Quantentheorie-Strahlung.pdf> Zugegriffen: 13. Juni 2022.
- Schorn, B. (2014). *Quantenphysik in der Schule. Eine Unterrichtskonzeption zur Einführung in die Quantenphysik für die 10. Jahrgangsstufe*. Dresden: Technische Universität (Dissertation).
- Schrödinger, E. (1926). Quantisierung als Eigenwertproblem, Erste Mitteilung. *Annalen der Physik*, 79, 361.
- Schrödinger, E. (1935). Die gegenwärtige Situation in der Quantenmechanik. *Die Naturwissenschaften*, 23 (48), 824-844.
- Sommerfeld, A. (1919-1944). *Atombau und Spektrallinien*. Braunschweig: Vieweg & Sohn.
- Speziali, P. (1972). *Einstein, Albert, and Besso, Michele – Correspondance 1903 1955*. Paris: Hermann.
- Straumann, N. (2013). *Quantenmechanik – Ein Grundkurs über nichtrelativistische Quantentheorie*. Berlin: Springer.
- Theysen, H. (2014). Methodik von Vergleichsstudien zur Wirkung von Unterrichtsmedien. In D. Krüger, I. Parchmann & H. Schecker, (Hrsg.), *Methoden in der naturwissenschaftsdidaktischen Forschung* (S. 67-80). Berlin: Springer.
- TIMSS (1995). *Mathematics and Science Achievement in the Final Years of Secondary School: IEA's Third International Mathematics and Science Report*. https://timssandpirls.bc.edu/timss1995i/TIMSSPDF/C_full.pdf Zugegriffen: 13. Juni 2022.
- Trigg, G. L. (1984). *Experimente der modernen Physik – Schritte zur Quantentheorie*. Braunschweig: Vieweg.
- Uccio, U. S. et al. (2019). Design and validation of a two-tier questionnaire on basic aspects of quantum mechanics. *Phys. Rev. Spec. Top. Phys. Educ. Research*, 15, 010137.
- Wahrig, R. (2002). *Deutsches Wörterbuch*. München: Wissen Media.
- Wuttiprom, S. et al. (2009). Development and use of a conceptual survey in introductory quantum physics. *Int. J. Sci. Education*, 31, 631.
- Yoon, T. H. & Cho, M. (2021). Quantitative complementarity of wave-particle duality. *Science Advances*, 7, eabi9268.
- Zeh, H. D. (1970). On the interpretation of measurement in quantum theory. *Foundations of Physics*, 1, 69.