

Michael Barth

# (M)Ein Kurs Quantenphysik

Mit Experimenten zu einem Verständnis der Quantenphysik

KLASSENSTUFE: Sek. II

ZEITUMFANG: 4–5 Wochenstunden über ein Halbjahr

THEMEN: s. **Abbildung 1**

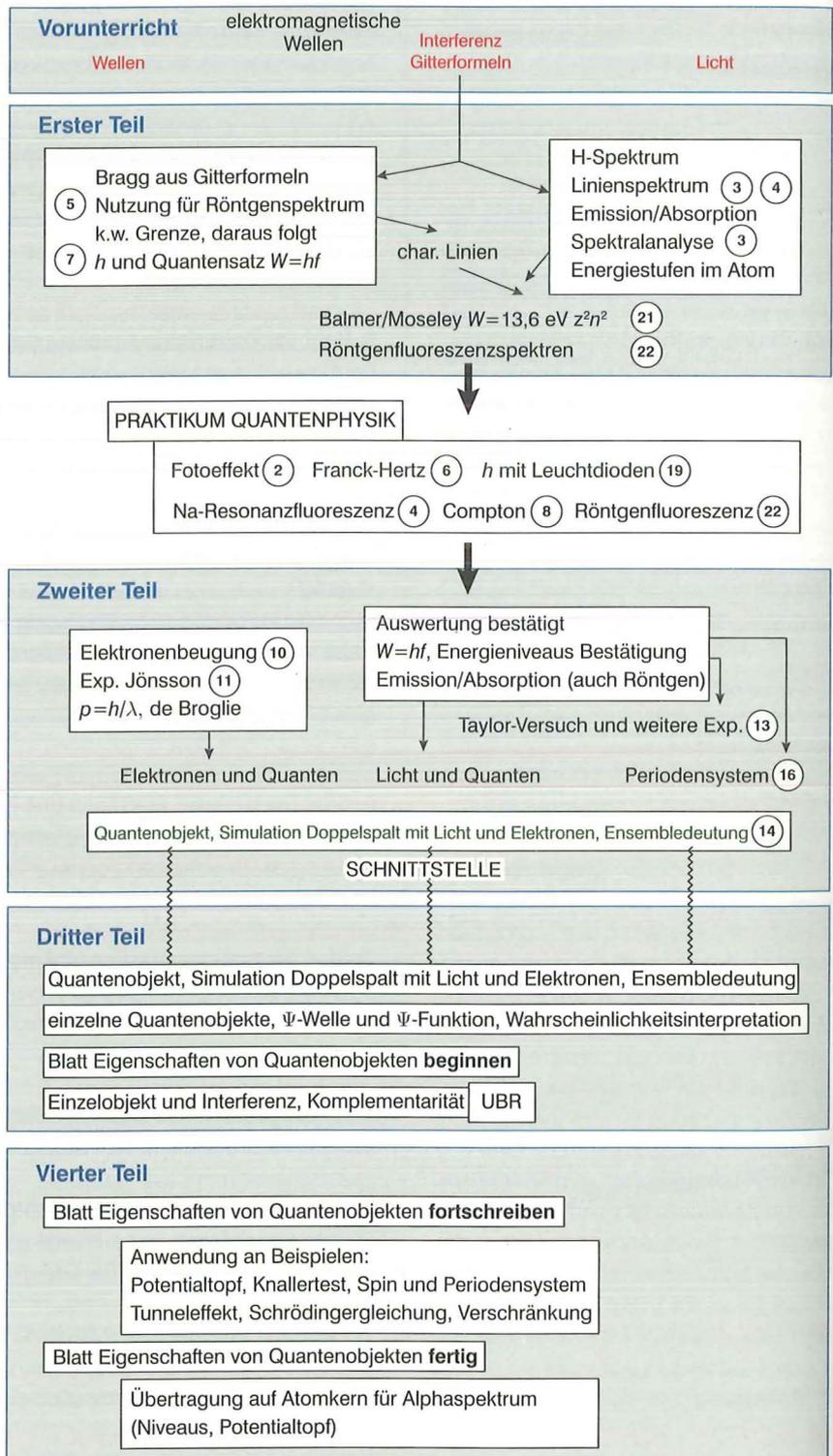
METHODEN: Experimente

MATERIALIEN: ausführliche Beschreibung des Kurses inkl. Materialien: [Mi.Barth@t-online.de](mailto:Mi.Barth@t-online.de)

Die Schülerinnen und Schüler sollen neben der Vorbereitung auf die Abiturprüfung Grundideen der Quantenphysik, ihre speziellen Denk- und Argumentationsweisen erfassen, auch im Sinne von Allgemeinbildung, ferner die experimentellen Fähigkeiten weiterentwickeln. Sie sollen nicht darin ausgebildet werden, quantenphysikalische Probleme selbstständig zu lösen, schon gar nicht mathematisch.

Die Erarbeitung schließt an den Vorunterricht in Wellenoptik direkt an und nutzt auch historische Zugänge, insbesondere thematisiert sie Lichtmodelle und deren Fortentwicklung, die sich aus experimentellen Ergebnissen ergab (s. [2]). Ein voll entwickeltes elektromagnetisches Lichtmodell, wie es in [5] dargestellt ist, wird zielgerichtet zum quantenphysikalischen Modell (später unter Einschluss von Elektronen und anderen Quantenobjekten) weiterentwickelt. Diese Modellerweiterung durchzieht den Unterricht als roter Faden.

Im Vorunterricht wurde dafür durchgängig das Wechselspiel von Theorie und Experiment thematisiert und die Lerngruppe generell mit prozessbezogenen Kompetenzen vertraut gemacht, wofür sich m. E. historische Zugänge besonders eignen (vgl. [7]). Trotzdem halte ich für die Quantenphysik einen historischen Zugang für ungeeignet, orientiere mich aber am historischen Erkenntnisweg.



1 | Inhalte und Aufbau des Quantenphysik-Kurses (Zahlen s. **Kasten 1**)

Insgesamt ergeben sich als wesentliche Voraussetzungen aus dem Vorunterricht:

- Schwingungen, Wellen, Interferenz, Licht (mit Zeigermodell);
  - Vertrautheit mit Schülerexperimenten, die selbstständig nach Bedienungsanleitungen und Literatur durchgeführt werden („Praktikum“; vgl. [8]);
  - Vertrautheit mit den prozessbezogenen Kompetenzen (insb. mit der Präsentation und Diskussion von Experimentalergebnissen);
  - Modell und Modellerweiterung für Licht;
  - Vertrautheit mit unvollständigen Sets von Experimentalergebnissen und Erkennen von Lücken;
  - Vertrautheit mit Herleitungen [4].
- Der dargestellte Kurs wurde von 2001 bis 2015 insgesamt neun Mal durchgeführt, mit 5, später 4 Wochenstunden, davon zweimal in einem Grundkurs mit deutlich reduzierten Anforderungen.

Im Folgenden wird ein 4-stündiger Leistungskurs skizziert, seine Struktur zeigt **Abbildung 1**. Inhalte und Reihenfolge der Module variierten je Kurs etwas, bedingt durch Beiträge der Lerngruppe zur Erarbeitung und Diskussion, Zeitbudget und Klausurtermine. In diesem Beitrag beschreibe ich den 1. und 2. Teil genauer, die anderen beiden Teile nur cursorisch, da sie in den Basisartikeln angesprochen sind. Eine umfangreiche kommentierte Zusammenstellung von Unterrichtsmaterialien (Arbeitsblätter, Klausuren, Texte, Unterrichtsverlauf mit Zeitangaben etc.) kann für den Gebrauch im Unterricht per Mail beim Autor angefordert werden.

Die Erarbeitung basiert stark auf Experimenten (s. **Kasten 1** und weiter unten). Die Experimente zeigen Effekte, die zu einer Änderung des Lichtmodells führen, später auch zu anderen Vorstellungen von Elektronen. Parallel dazu wird ein Energiestufenmodell für Atome eingeführt (vgl. z. B. [1]), anschließend an den Chemieunterricht. Alle erweiterten und neuen Lichtmodelle müssen sich in weiteren Experimenten legitimieren bzw. stabilisieren. Betont wird im Unterricht immer wieder, dass

## Experimente zur Quantenphysik

Eine (erheblich umfangreichere und informativere) Version dieser Liste erhielten meine Kurse vor dem Praktikum; dort sind die Experimente auch näher charakterisiert. Aufgelistet werden Experimente, die Argumente für das Quantenmodell liefern und die man in Schulbuch und Internet recherchieren kann bzw. im Artikel „Experimente“ auf S. 20–26 findet. Markiert sind mögliche Realexperimente für Praktikum bzw. Unterricht („Ex“).

1. Strahlungsgesetz (Planck 1900) – Ex
2. (äußerer) Fotoeffekt (Einstein 1905) – Ex
3. Spektralanalyse (Kirchhoff/Bunsen 1860) – Ex
4. Absorptionsspektrum (Kirchhoff/Bunsen 1859) – Ex
5. Röntgenspektrum (Bragg 1913) – Ex
6. Elektronenstoßversuch (Franck/Hertz ab 1913) – Ex
7. Röntgen-Bremsspektrum (Duane/Hunt 1915) – Ex
8. Comptoneffekt (Compton 1923) – Ex
9. Elektronenspin (Pauli 1924)
10. Elektronenbeugung an Kristallen (Davisson/Germer 1927) – Ex
11. Elektronenbeugung an Spaltsystemen (Jönsson 1960) – Originaltext
12. Paarbildung und Zerstrahlung (Joliot-Curie 1933)
13. Experiment von Taylor (Taylor 1909) – Originaltext
14. Beugung von Licht und Elektronen am Doppelspalt – Simulation
15. Gasentladung – Ex
16. Periodensystem der Elemente (Mendelejew 1869)
17. Streuversuch (Rutherford 1911) – Ex
18. Photonenimpuls (Einstein 1905) – Originaltext
19. Bestimmung der planckschen Konstante  $h$  mit Fotodioden – Ex
20. Absorptionsspektrum von Röntgenstrahlung – Ex
21. Gesetz von Moseley – Ex
22. Röntgenfluoreszenzanalyse – Ex
23. Röntgenstrukturanalyse – Originalfotos

die besprochenen Experimente das Quantenmodell zwar stützen, nicht eindeutig beweisen, sogar teilweise auch mit klassischen Modellen erklärbar sind (ohne das im Einzelfall wirklich im Unterricht zeigen zu können; s. dazu vertiefend den Artikel „Falsche Freunde“ auf S. 15–19).

## Überblick über den Kursablauf

### 1. Teil: Modellerweiterung mit Quanten

Den bekannten Welleneigenschaften von Licht werden neue, experimentell gefundene Teilcheneigenschaften zur Seite gestellt. Das bisher genutzte elektromagnetische Lichtmodell wird dadurch als erkennbar inkonsistent unterrichtlich inszeniert. Die Lern-

gruppe war stets so erfahren, dass sie diese Inkonsistenz selbstständig erkennen sowie mit den Modellkriterien aus dem Vorunterricht [2] bei möglichst zurückhaltenden Lehrerhilfen nach einer Verbesserung suchen konnte. Dies bereitet auf das folgende Praktikum vor.

Die ersten Ergänzungen des alten Lichtmodells werden nötig durch die experimentell aufgefundenen Eigenschaften von Röntgenstrahlung [1] und der Linienspektren von Licht (Emission und Absorption, bei sichtbarem Licht und Röntgenstrahlung): Dies ergibt eine neue Lichtquantenhypothese mit  $W = hf$  zusammen mit einem Energiestufenmodell für Atome für deren Wechselwirkung mit Licht. Dabei kommt dem Wasserstoffspektrum eine besondere Bedeutung zu, da es alle Modelleigenschaften in

Reinkultur zeigt und die Balmer-Formel liefert, die sich näherungsweise auch bei der quantitativen Analyse von Röntgenspektren bewährt ([1], S. 14). Das Beugungsgitter aus der Wellenoptik wird zur Spektralanalyse genutzt ([3], S. 18–19), daraus die Bragg'sche Gleichung abgeleitet ([1], S. 33–36) und die Eigenschaften von Röntgenstrahlung erarbeitet ([1], S. 20–25); die Reihenfolge der beiden Module kann man auch vertauschen.

### Experimentalpraktikum zur Quantennatur des Lichtes

Das Praktikum leitet zum zweiten Teil über, wegen seiner Besonderheit soll es hier ausführlicher beschrieben werden. Mögliche Experimente finden sich in **Kasten 1** („Ex.“); wenn einzelne Experimente in Klausuren verwendet werden sollten, habe ich sie vorher aus der Liste genommen (oft 10, 20 oder 21). Typisch für das Praktikum waren die Experimente 2, 4, 6, 19 für versierte Gruppen auch 8 und 22, selten einmal 17. Für ein Praktikum am Anfang des Kurses (s. u.) kamen noch 3 und manchmal 5 hinzu).

Je Gruppe wird ein Experiment aus **Kasten 1** mit Demonstrationsapparaturen durchgeführt. Ziel ist es, die Quanteneigenschaften aus dem ersten Teil erneut nachzuweisen, so das neue Lichtmodell anzuwenden und damit zu legitimieren. Der Justieraufwand ist dabei oft erheblich und Erfolg deshalb nicht garantiert, worauf ich die Lerngruppe hingewiesen habe; umso zufriedener waren die Schülerinnen und Schüler, wenn es klappte. Die Zuordnung von Lernenden zu Experimenten habe ich nach Fähigkeiten und Wünschen vorgenommen und ganz offen besprochen. Bereits im ersten Semester gab es ein Praktikum, allerdings mit einfacheren Apparaturen [8], im Unterricht danach mehrfach Schülerexperimente.

Jede Gruppe musste sich nach teilweise vorgegeben Unterlagen und Bedienungsanleitungen mit selbst recherchiertem, weiteren Material in das Experiment einarbeiten und später die Geräte in den Schränken der Sammlung finden. Nicht immer gab es eine genaue Anleitung. Das Praktikum begann üblicherweise in einer

Doppelstunde am Vormittag mit dem Aufbauen und wurde nach der regulären Unterrichtszeit am Nachmittag für Justierung und Messung fortgesetzt, insgesamt dauerte es etwa 6 Unterrichtsstunden. Nur wenn der ganze Kurs zu diesem Zusatzaufwand bereit war, wurde das Praktikum durchgeführt (allerdings wurde es nur einmal abgelehnt). Das Praktikum wurde gemeinsam beendet, auch wenn einzelne Gruppen bereits vorher fertig waren; sie halfen dann den anderen oder schauten ihnen zu.

Es gab auch Praktika mit zwei Experimenten pro Gruppe, dann arbeitete die erste Gruppe die zweite in die bereits aufgebaute und justierte Apparatur ein.

Manchmal habe ich das Praktikum auch vor der ersten Phase angesetzt (s. **Abb. 1**), direkt nach der Wellenoptik, dann sind alle Quanteneigenschaften neu, und auch Experimente der Röntgenphysik bzw. Spektralanalyse können Praktikumsversuche sein.

Das Praktikum wurde im Folgeunterricht ausgewertet, entweder direkt im Anschluss oder dann, wenn das Experiment unterrichtsrelevant wurde. Jede Gruppe hielt dafür einen Experimentalvortrag an ihrer Apparatur und vermittelte dem Kurs, welche Bedeutung die Ergebnisse für die Quantennatur des Lichtes und die Erweiterung des Lichtmodells hatten. In der anschließenden Diskussion wurde dies ausgeschärft, und ich sorgte notfalls dafür, dass alle wichtigen Details und Ergebnisse bzw. die Bedeutung des Experimentes für das Lichtquantenmodell deutlich wurden.

Diese Unterrichtsphase ist auf eine im Vorunterricht intensiv trainierte Lerngruppe angewiesen. Sie muss einerseits weitgehend selbstständig experimentieren können, andererseits Informationen in Vorträgen weitergeben bzw. diese aus den Vorträgen anderer entnehmen können. Dazu gehört eine vertrauensvolle und offene Diskussionskultur, Nachfragetechniken auf Schülerseite, Durchhaltevermögen, Rücksichtnahme auf und Hilfsbereitschaft für Leistungsschwächere und nicht zuletzt Freude an derartigen komplexen Erarbeitungen. Man muss dafür seinen Unterricht

sehr vorausschauend anlegen, dann kann man in dieser Phase der Erarbeitung als Lehrer mit Impulsen, Nachfragen, Hervorhebungen, Einforderung von Präzisierungen, auch provokanten Äußerungen und vor allem immer wieder Bewusstmachen von Argumentationswegen und Zielen, Feststellen des Erarbeitungsstandes und genutzten Fachmethoden den Unterricht indirekt lenken, natürlich auch Informationen und eigene Präzisierungen einbringen, wenn nötig (zur Fragetechnik siehe z. B. [9]).

Jede Gruppe fertigte ein ausführliches Protokoll ihres eigenen Versuches an und dokumentierte die anderen Apparaturen und Ergebnisse im Überblick. Für die spätere Abiturvorbereitung fanden die SchülerInnen das immer sehr hilfreich, und ich konnte bei der Korrektur der Protokolle das Verständnis überprüfen.

Weitere Experimente aus **Kasten 1** wurden im Folgeunterricht vorgeführt bzw. durch Simulationen dargestellt oder mithilfe der Literatur besprochen. Die Auswahl richtete sich nach der Kursplanung und den Schülerwünschen. Gemeinsam im Unterricht wurden immer 3, 5, 7, 10, 13, 14, 16, 20 und 21 ausgewertet. Auch die Liste der Experimente in **Kasten 1** war zur Abiturvorbereitung sehr beliebt.

## 2. Teil: Stabilisierung der Modellerweiterung für Licht und Übertragung auf Elektronen

Die Auswertung der Experimente 2, 4, 6, 8, 19 und 22 aus dem Praktikum bestätigte das Quanten- und Energie-stufenmodell aus Teil 1 (s. a. **Abb. 1**). Ausgehend von Experimenten zur Elektronenbeugung (s. **Abb. 1**) wurden nun im zweiten Teil bekannten Teilcheneigenschaften von Elektronen neue Welleneigenschaften zur Seite gestellt und durch die Herleitung der de-Broglie-Beziehung quantitativ erfasst. Diese unerwartete, aber unumgängliche Übertragung der Modelleigenschaft Welle auf ein Teilchen wurde als noch schwieriger und erst recht als eigenartig wahrgenommen. Dennoch war sie unumgänglich; eine gewisse Symmetrie der Argumentation für Licht und Elektronen wurde deutlich und auch von der Lerngruppe

thematisiert. Diese Erweiterung des Teilchenmodells auf Elektronen wurde mehrfach auch in einer Klausur vorbereitet.

### 3. Teil: Auflösung der Inkonsistenz durch die Vorgänge am Doppelspalt

Ein Simulationsfilm zur Interferenz am Doppelspalt (s. Kasten 1 im didaktischen Basisartikel) mit Licht und Elektronen war die zentrale Schnittstelle zwischen Teil 2 und 3: Die Eigenartigkeit von Welleneigenschaften für Teilchen erfährt eine Auflösung, indem die für Interferenzerscheinungen zuständige Welle als  $\Psi$ -Funktion umgedeutet wird, deren Amplitudenquadrat die Nachweiswahrscheinlichkeit auf dem Schirm angibt (s. fachlicher Basisartikel, S. 8). Das Wellenmodell für Licht wurde also erweitert, auch auf Elektronen. Dabei erwies sich der Rückgriff auf Zeiger als sehr nützlich.

Die Erscheinungen für sehr geringe Intensitäten bzw. das Experiment von Taylor (13, oft am Originaltext erarbeitet), lieferten dann die Ensembleerfahrung, die nur noch Wahrscheinlichkeitsaussagen über Einzelobjekte zulässt. Dies war ein erkennbarer Bruch mit der klassischen Physik und wurde entsprechend in der Diskussion hervorgehoben. Hier wurde der Begriff „Quantenobjekt“ eingeführt.

Insgesamt war die Diskussionsphase, z. B. zu den Doppelspaltversuchen, immer auch durch instruierende bzw. präzisierende Phasen geprägt, in denen ich quantenphysikalische Sichtweisen darstellte und die Schüler diese dann selbstständig auf neue Phänomene anwendeten (z. B. für die Analyse von Filmen zum Taylorversuch bei geringen Intensitäten, weitere Beugungsversuche). Da ich mich immer auf die Argumente des jeweiligen Kurses eingelassen habe, verliefen die Diskussionen je Kurs stets anders.

Am Ende der Phase wurden diese neuen Eigenschaften von den neuen „Quantenobjekten“ aufgeschrieben, in Art einer Bedienungsanleitung wie bei Herleitungen (s. [4]); auch hier bedarf es durchaus wieder der Lehrerlenkung. Danach wurde ein vorbereiteter Text mit „Eigenschaften von

Quantenobjekten“ verteilt, auf Übereinstimmung mit dem Tafelanschrieb getestet und angepasst. Diese Liste begleitete uns dann den weiteren Unterricht und wurde fortgeschrieben. Die voll entwickelte Liste findet sich im fachlichen Basisartikel auf S. 9. Von dieser Liste wird am Ende dieser Phase die linke Spalte verteilt.

### 4. Teil: Weitere Eigenschaften von Quantenobjekten

Es folgten nun im vierten Teil weitere Problemstellungen (z. B. mithilfe der in Kasten 1 im didaktischen Basisartikel auf S. 3 genannten Simulationsfilme), die neue, nicht-klassische Eigenschaften von Quantenobjekten zeigen. Diese wurden nach und nach in die Liste „Eigenschaften von Quantenobjekten“ aufgenommen (s. o. und fachlicher Basisartikel), z. B.

- Bei Experimenten mit einem einzelnen Quantenobjekt in einer Apparatur interferiert es mit sich selbst.
- Es gilt eine Unbestimmtheitsrelation für Ort und Impuls (die nicht klassisch erklärbar ist).
- Quantenobjekte zeigen Komplementarität und Nichtlokalität.

Immer wieder wurden Phasen zugelassen oder angeregt, die sich mit „Anschaulichkeit“ befassen. Diese war im Unterricht zur Wellenoptik dringender Wunsch für und notwendiges Kriterium eines „guten Lichtmodells“ gewesen, war aber für die Quantenphysik bzw. die  $\Psi$ -Funktion und ihre Eigenschaften offensichtlich nicht mehr in gleicher Weise erreichbar. Vor allem betonte ich, dass es „ohne Mathematik nicht geht“, ohne das aber wirklich explizit zeigen zu können. Oft erläuterte ich immerhin die Schrödingergleichung und berichtete über mathematische Arbeitsweisen aus dem Studium. Dass Anschaulichkeit letztlich eine Frage der Gewöhnung ist, versuchte ich an den (elektromagnetischen) Wellen zu zeigen, die für die Lerngruppe sicher auch zu Beginn der Sek. II noch völlig unanschaulich waren.

Abschließend ging es um Anwendungen des Quantenmodells auf bislang ungeklärte Probleme, was das Modell erneut legitimierte, z. B.:

- Der Potentialtopf erklärt die diskreten Energieniveaus im Atom und liefert neue Eigenschaften für gebundene Elektronen.
- Mit Spin und Pauliprinzip wird der Aufbau des (aus der Chemie bekannten) Periodensystems ansatzweise verstehbar.
- Knallertest und Verschränkung zeigen weitere unerwartete Quantenphänomene, letztere weist sogar den Weg zu Quantencomputern und Verschlüsselungsmöglichkeiten.
- Die Übertragung auf Atomkerne im Folgeunterricht erklärt die hohen Energiewerte im Kern und den Tunneleffekt bei Alphateilchen.

### Abschluss

Am Ende des Kurses war die Liste „Eigenschaften von Quantenobjekten“ vollständig und zur Abiturvorbereitung sehr beliebt: Zu jedem Satz konnte man wiederholen, woher man diese Eigenschaft kannte, wie man sie nachweist und wo sie sich auswirkt. Oft haben wir noch über Deutungsfragen gesprochen (s. dazu den Artikel von Uhl auf S. 41–46). Eine Abschlussdiskussion war immer obligatorisch.

„Wir haben ja jetzt verstanden, dass Quantenobjekte weder Teilchen noch Wellen sind, aber es wäre schon schöner, wenn man das entscheiden könnte. Oder wenn man genau wüsste, durch welchen Spalt sie vorher geflogen sind. Aber das geht ja nicht.“ Solche oder ähnliche Schüleräußerung kamen am Kursende fast immer: Ich hatte und (!) zeigte dafür Verständnis, aber betonte auch, dass ich persönlich damit kein Problem habe. Die Welt ist halt so, wie sie ist – warum sollte sie sich an einen Wunsch nach (persönlicher) Anschaulichkeit halten? Und da ist man schon ein wenig in der Philosophie ...

### Klausuren und Leistungsbewertung

Neben mündlicher Leistung und Bewertung von Protokoll und Vortrag zum Praktikum gab es zwei Klausuren. Die erste Klausur hatte als neues Experiment häufig 10 aus **Kasten 1** (und bereitete damit die dritte Phase vor) oder 20 bzw. 21 (dazu [1], S. 44–47

## Und die zehn Fragen?

Abschließend soll der beschriebene Unterricht noch in Bezug auf die „10 Fragen“ an Unterrichtskonzepte unter die Lupe genommen werden (vgl. Kasten 3 im didaktischen Basisartikel).

### 1. Werden durch die Sprechweisen überholte Modellvorstellungen verfestigt?

Die Unterrichtseinheit schließt explizit an die klassische Physik an und erweitert sie zur Quantenphysik. Dass diese Erweiterung nicht nur ein Anhängsel ist, wird spätestens im 3. Teil deutlich bzw. muss dort deutlich gemacht werden. Halbklassische Argumentationen (Bohrmodell, Dualismus) werden nicht verwendet bzw. es wird bei Nachfragen ihre Fehlerhaftigkeit diskutiert.

### 2. Vermeidet der Unterrichtsvorschlag „falsche Freunde“ unter den Experimenten?

Die Begrenztheit der Experimente wurde von mir immer hervorgehoben, wobei im 1. Teil im Rahmen der Inszenierung die Gefahr besteht, dass die Lerngruppe dies als unbedeutende Ergänzung wertet. Erfolgreich war dagegen der Anspruch, die Eindeutigkeit der Interpretation im Rahmen des neuen Quantenmodells immer in Frage zu stellen: So wurde z. B. der Fotoeffekt von einem Schüler als klassisches Resonanzphänomen interpretiert.

### 3. Geht der Unterrichtsvorschlag angemessen mit Anschaulichkeit um?

Der Unterrichtsvorschlag macht die Grenzen der Anschaulichkeit deutlich. Dies geschieht nach und nach und ist erklärtes Unterrichtsziel. Letztlich erlebt die Lerngruppe in den Diskussionen wirklich, dass die naive Anschaulichkeitsforderung in den Modellkriterien aus dem Vorunterricht nicht haltbar ist.

### 4. Trägt der Unterrichtsvorschlag zur Entmystifizierung des Sachgebietes bei?

Zumindest leistet er Mystifizierungen keinen Vorschub, da die Modellerweiterung nur ein weiteres Glied in einer Kette von konsequenten Erweiterungen ist und Experimentalergebnisse eben akzeptiert werden müssen.

### 5. Eröffnet der Unterrichtsvorschlag Wege zu einer mehr als oberflächlichen Durchdringung?

Das sollte so sein, auch wenn diese Durchdringung argumentativ und fachmethodisch angelegt ist und mathematische Verfahren nur exemplarisch nutzt. In Unterricht und Klausur sind dafür Problemstellungen nötig, die Argumentieren erfordern. Dies muss auch die Lerngruppe gewohnt sein.

### 6. Sind Darstellung, Aussagen und Interpretation anschlussfähig?

Der Unterricht erwächst aus dem Vorunterricht und kann im Studium ausgebaut werden.

### 7. Sind die mathematischen und modellbezogenen Voraussetzungen vorhanden?

Auch dies ergibt sich aus dem Vorunterricht für die Nutzung des Zeigerformalismus für Wellen und das zentrale Thema Lichtmodell.

### 8. Ist ausgearbeitetes und hinreichend erprobtes Unterrichtsmaterial zugänglich?

Kann beim Autor angefordert werden.

### 9. Sind Experimente, Analogexperimente bzw. Modellierungen einfach zugänglich?

In der Literatur sowie in diesem Heft bzw. in den o. g. Materialien

### 10. Eröffnet das Material möglichst vielfältige Handlungsmöglichkeiten für Lernende?

In den ersten Teilen liefern die Experimente und vor allem das Praktikum vielfältige Handlungsmöglichkeiten, danach finden sie sich in den Problemstellungen für die weitere Erarbeitung. Voraussetzung ist aber, dass die Lerngruppe so trainiert ist, die komplexe Handlungsmöglichkeit „Fachdiskussion“ zu nutzen und sie für wertvoll hält. Dies zu entwickeln, erfordert einen speziellen Unterrichtsstil und eine sehr langfristige Planung.

und S. 23). Die zweite erfasste auch Teile der Kernphysik und hatte Aufgaben für die letzten Teile der Einheit Quantenphysik.

Neben den üblichen Aufgaben, die sich mehr oder weniger direkt auf den Unterricht bezogen, gab es immer auch solche, die darüber hinausgingen, aber mit bekannten Methoden zu bearbeiten waren, z. B.:

- Ein Röntgenspektrum mit Mehrfachlinien liefert die Hypothese von aufgespaltenen Energieniveaus in Zirkon.
- Eine Aufgabe zur Auswertung einer Absorptionskante bei Röntgenstrahlung findet sich in UP 131, S. 44 ff.
- Das (neue) Experiment mit dem Quantenradierer wird kritisch interpretiert und als klassisch deutbar identifiziert.
- Ein Text zum (neuen) Tunneleffekt wird quantenphysikalisch interpretiert
- Originalzitate von Weizsäcker und von Neumann werden quantenphysikalisch eingeordnet.

Die kompletten Aufgabenstellungen können beim Autor angefordert werden.

## Literatur

- [1] Barth, M. (Hrsg.): Röntgenstrahlung. NiU Physik 23 (2012), Nr. 131.
- [2] Barth, M.: Mit Geschichte über Erkenntnisprozesse lernen. Urteilen und Einschätzen im historischen Kontext. In: NiU Physik 24 (2013), Nr. 134, S. 44–48.
- [3] Barth, M. (Hrsg.): Wellenoptik. NiU Physik 26 (2015), Nr. 150.
- [4] Barth, M.: Herleiten lernen und kommunizieren. Frontalunterricht als Meister-Lehrling-Situation. In: NiU Physik 24 (2013), Nr. 135/136, S. 66–71.
- [5] Barth, M. (Hrsg.): Elektromagnetische Wellen. NiU Physik 27 (2016), Nr. 156.
- [6] Dorn Bader Physik 12/13. Hannover: Schroedel, 2000.
- [7] Barth, M.: Prozessbezogene Kompetenzen. Eine Lanze für historische Zugänge. In: PdN Physik 59 (2010), Nr. 4, S. 23–28.
- [8] Barth, M.: Experimentell, fachmethodisch und kommunikativ. Anregungen für ein prozessbezogenes Praktikum. In: NiU Physik 27 (2016), Nr. 129/130, S. 26–33
- [9] Leisen, J.: Unterrichtsgespräch. In: Mikelskis-Seifert, S.; Raabe T. (Hrsg.): Physik-Methodik. Berlin: Cornelsen, 2006, S. 119–121.