

Michael Rode

# Quantenobjekte mit Ruhemasse zuerst

Beschreibung eines erprobten Unterrichtsgangs

KLASSENSTUFE: Sek. II

ZEITUMFANG: etwa 30 Unterrichtsstunden à  
45 Minuten

THEMEN: Quantenphysik

KOMPETENZEN: vgl. „Ziele“ bei 1.–10.

METHODEN: Demonstrationsexperimente,  
Lernaufgaben, Schülerexperiment

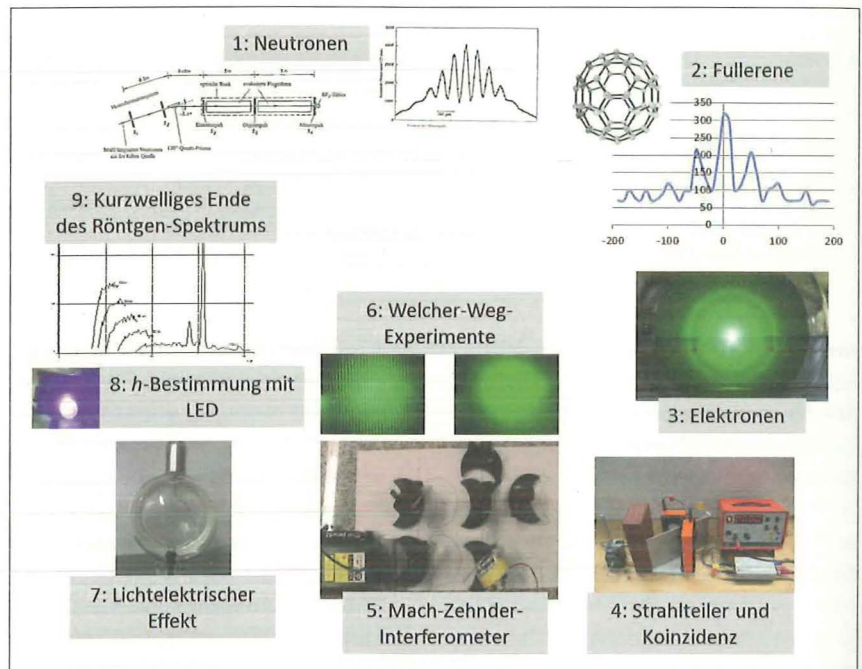
MATERIALIEN: bei: [CDJMRode@t-online.de](mailto:CDJMRode@t-online.de)

Die Unterrichtseinheit Quantenphysik schließt an meiner Schule direkt an den Unterricht über Interferenz und Licht an. Ganz am Anfang steht die Auseinandersetzung mit Interferenz bei Quantenobjekten mit Ruhemasse. Erst sehr spät wird das Photon eingeführt, Experimente zum lichtelektrischen Effekt stehen fast am Ende der Unterrichtseinheit. **Abbildung 1** stellt den Unterrichtsverlauf (im Uhrzeigersinn) in kompakter Form dar.

## Lernvoraussetzungen

In meinem Unterricht ist die Zeigerdarstellung ein wesentliches Element der Vernetzung (s. dazu auch den entsprechenden Beitrag auf S. 27–29). Daher führe ich sie bereits bei der Behandlung von Schwingungen ein und benutze sie im Zusammenhang mit Wellen durchgehend. Eine frühe Einführung hat neben der Vernetzung den weiteren wichtigen Vorteil, dass beim Einstieg in die Quantenphysik nicht mehrere neue Elemente zur gleichen Zeit erarbeitet werden müssen, sondern das wesentliche Werkzeug schon angemessen bekannt ist.

Die Lernenden sollten beim Einstieg in die Quantenphysik über folgende Kenntnisse und Fertigkeiten verfügen (in Anlehnung an das Kerncurriculum Physik für die Oberstufe am Gymnasium in Niedersachsen auf



1 | Überblick über die zentralen Experimente. Die Nummerierung entspricht der Reihenfolge der Behandlung im Unterricht.

meinen Unterricht hin ausformuliert): Sie ...

- verwenden die Zeigerdarstellung zur Beschreibung von harmonischen Schwingungen und von Wellen,
- erkennen in grundlegenden Experimenten mit Ultraschall, Mikrowellen und Licht das Vorliegen von Superposition, auch am Michelson-Interferometer,
- beschreiben je ein Experiment zur Bestimmung der Wellenlänge von Ultraschall bei stehenden Wellen, Schall mit zwei Sendern, Mikrowellen mit dem Michelson-Interferometer sowie weißem und monochromatischem Licht mit einem Gitter,
- bestimmen die resultierenden Zeiger in diesen Experimenten durch Zeigeraddition.

Grundlegendes zur Einführung in die Zeigerdarstellung findet sich in [1].

Zu den wesentlichen Experimenten gibt es sowohl Aufgabenmaterial als auch dynamische Geometrie-Dateien, die auf Wunsch beim Verfasser abgerufen werden können.

## Unterrichtsskizzen

### 1. Neutronenbeugung und de-Broglie-Relation

**Ziele:** Die Lernenden erkennen, dass auch massereiche Objekte zur Interferenz gebracht werden können. Sie erschließen aus Messdaten die de-Broglie-Relation.

**Zeitbedarf:** etwa 3 Unterrichtsstunden

**Verlaufsskizze:** Der Unterricht beginnt mit einer Lernaufgabe, die inhaltlich Kasten 2 im fachlichen Basis-



artikel entspricht. Das zugrundeliegende Experiment [2] ist besonders gut geeignet, weil es eine einfache Doppelspalt-Anordnung enthält, die so gut dokumentiert ist, dass die Lernenden auf der Grundlage ihrer Kenntnisse vom Licht dem Phänomen selbstständig eine Wellenlänge zuordnen können. Erst nach Bestimmung der Wellenlänge wird mitgeteilt, dass es sich um ein Experiment mit Neutronen handelt. Aus der Beschriftung der Hochachse in Verbindung mit den Abmessungen der Apparatur und der Geschwindigkeit der Neutronen kann man dann entnehmen, dass zu jedem Zeitpunkt nur höchstens ein Neutron in der Apparatur unterwegs ist. Ausdrücklich erwünscht ist, dass an dieser Stelle mehr Erstaunen und Fragen als sichere Deutungen auftauchen! An geeignetem Material wird anschließend die Abhängigkeit der Wellenlänge von der Geschwindigkeit der Neutronen untersucht. Das Ergebnis wird mit der de-Broglie-Gleichung verglichen.

**Experimente** stehen nicht zur Verfügung. Das Material ist aber so gut vergleichbar mit Doppelspaltexperimenten und so gut dokumentiert, dass ein Originalexperiment kaum Vorteile bieten würde.

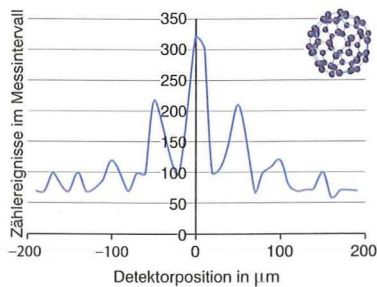
**Anknüpfungen:** Das Experiment kann später, in der Kernphysik, wieder aufgegriffen werden, wenn es um das Prinzip des Detektors mit seiner borhaltigen Füllung geht. Das Prinzip der Detektion sehr enger Interferenzmuster kann beim Experiment zur Interferenz von Gamma-Photonen (s. Versuchskartei auf S. 49–50) wiedererkannt werden.

## 2. Interferenz bei Fullerenen und Elektronen

**Ziele:** Die Lernenden interpretieren die jeweiligen Interferenzmuster stochastisch, erläutern Interferenz bei einzelnen Quantenobjekten und übertragen ihre Kenntnisse von der Neutronenbeugung auf andere Objekte.

**Zeitbedarf:** 2 – 3 Unterrichtsstunden

**Verlaufsskizze:** Es wird mit vorbereitetem Material gearbeitet. Bewährt



**2 | Interferenzmuster zum Experiment mit Fullerenen.** Das Beugungsobjekt hatte einen Spaltabstand von 100 nm, der Abstand Beugungsobjekt–Detektor betrug 1,25 m [3]. Oben rechts im Bild ist ein Fullerene-Molekül (C60) dargestellt.

hat sich das Interferenzexperiment mit Fullerenen [3]. Gut geeignet ist auch der Film von Tonomura [4], in dem die Interferenz einzelner Elektronen nachgewiesen wird. Insbesondere dieser Film hilft bei der Hinführung zur stochastischen Interpretation der Interferenzmuster. Diese Interpretation kommt häufig spontan von den Lernenden selbst.

**Experimente:** Zum Experiment mit Fullerenen (C60-Moleküle) gibt es gut geeignetes Material [3]. **Abbildung 2** zeigt eines der zugehörigen Interferenzmuster (nach [3]).

Von Tonomura u. a. [4] wurde 1987 erstmalig im Film festgehalten, wie einzelne Elektronen sich in einem Interferenzmuster anordnen. Verwendet wurde dazu statt eines Doppelspalts eine Anordnung mit einem elektrisch realisiertem Biprisma, das in den Wirkungen analog zum Doppelspalt ist.

**Ausblicke:** Es ist eine ungeklärte Frage, ob es eine Obergrenze für die Größe von Objekten gibt, die man zur Interferenz bringen kann. Entsprechende Experimente werden weiterhin durchgeführt ([6], [7]).

## 3. Elektronenbeugung

**Ziele:** Die Lernenden übertragen das Erlernte auf ein Demonstrationsexperiment. Sie überprüfen die de-Broglie-Gleichung und wiederholen wichtige Aspekte zu Elektronenröhren. Sie interpretieren rotationssymmetrische Interferenzmuster als Hinweis auf regellos angeordnete beugende Objekte.

**Zeitbedarf:** 2–3 Unterrichtsstunden

**Verlaufsskizze:** Das Experiment wird vorgestellt als eine Möglichkeit, das bisher Erlernte im Physikraum selbst zu sehen, an Bekanntes angeschlossen, interpretiert und messend untersucht.

**Experimente:** s. Artikel „Experimente“ auf S. 20–26

## 4. Unteilbarkeit von Photonen: Koinzidenzexperiment; Widerspruch zur Interferenz

**Leitfrage:** Wie soll man sich die Interferenz einzelner Objekte „mit sich selbst“ vorstellen? Teilen sich diese Objekte z. B. an Doppelspalten?

**Ziele:** Die Lernenden beschreiben den Aufbau eines Koinzidenzexperimentes und erläutern seine Funktion. Sie interpretieren das Ergebnis des Experimentes als Hinweis auf die Existenz unteilbarer Objekte in Licht bzw. Gammastrahlung. Sie verwenden für diese Objekte die Bezeichnung Photon.

**Zeitbedarf:** 3 Unterrichtsstunden

**Verlaufsskizze:** Die Leitfrage wird aufgeworfen. In einer Lernaufgabe oder auch im Lehrervortrag wird ein Experiment (s. u.) vorgestellt, durchgeführt und gedeutet. In einer anschließenden Lehrerinformation wird die Bezeichnung Photon für die unteilbare Energieportion des Lichtes eingeführt.

**Experimente:** Unter dem Titel „Überprüfung der Unteilbarkeit von Photonen durch Koinzidenzmessung“ wird in der Versuchskartei ein Koinzidenzexperiment mit Gamma-Photonen beschrieben, das mit Schulmitteln durchgeführt werden kann.

**Ertrag:** Nur ein Teil der Leitfrage konnte beantwortet werden: *In Interferometern mit Strahlteilern teilen sich → Quantenobjekte nicht.*

Offen bleibt, wie man sich dann die Interferenz vorstellen soll.

Als Neben-Ertrag konnten die Lernenden erkennen, dass auch Licht aus unteilbaren Portionen bestehend gedacht werden kann. Diese Erkenntnis beruht auf einer wissenschaftlich deutlich solideren Basis als die Einführung über den lichtelektrischen Effekt (s. fachlicher Basisartikel auf S. 16).



## 5. Pfadregeln und Zeiger: klassische Wahrscheinlichkeit und quantenphysikalische Wahrscheinlichkeitsamplitude

**Leitfrage:** Wie passt die Vorstellung von unteilbaren Objekten mit deren Interferenzfähigkeit zusammen?

**Ziele:** Die Lernenden beschreiben die Vorgänge in einem Mach-Zehnder-Interferometer unter den zwei einander widersprechenden Annahmen „Würfeln über das Schicksal klassischer Kugeln“ und „Beschreibung in der Zeigerdarstellung“. Sie ersetzen die klassisch bestimmten Wahrscheinlichkeiten durch Zeiger. Sie wenden die  $\rightarrow$  Pfadregeln für Wahrscheinlichkeiten auf  $\rightarrow$  Zeiger/Wahrscheinlichkeitsamplituden an und führen dabei die Schritte Zeigermultiplikation, Zeigeraddition und Bilden des Betragsquadrats aus. Sie deuten so die Interferenzmuster am Mach-Zehnder-Interferometer erneut. Am Ende können sie die folgenden Regeln anwenden:

- Wenn zu einem experimentellen Ergebnis am selben Detektor mehrere klassisch denkbare Verbindungen beitragen (ODER-Ereignis,  $\rightarrow$  *Superposition*), werden zuerst die zugehörigen Zeiger addiert. Das Quadrat der resultierenden Länge ist ein Maß für die Nachweiswahrscheinlichkeit.
- Wenn in den einzelnen Pfaden wegen verschiedener Etappen entlang der Verbindungen UND-Verknüpfungen auftreten, bedeutet das entsprechend dem Vorgehen entlang eines Pfades im Baum: „Zeiger multiplizieren“.
- Zur korrekten Vorhersage von Ergebnissen in Interferenzexperimenten muss man die klassischen Wahrscheinlichkeiten durch die  $\rightarrow$  *Wahrscheinlichkeitsamplituden* bzw. Zeiger ersetzen und sachgerecht multiplizieren, addieren und das Quadrat der Beträge bilden.
- Dabei müssen Regeln über Phasensprünge beachtet werden (s. Regeln 4–5 im Beitrag zum Zeigermodell auf S. 27–29)

**Zeitbedarf:** 3 Unterrichtsstunden

**Verlaufsskizze:** Das Verfahren wird ähnlich wie im Beitrag zum Zei-

germodell in einer Lernaufgabe vorgestellt und erarbeitet.

In vielen Bundesländern sind die Lernenden mit  $\rightarrow$  Pfadregeln aus der Stochastik gut vertraut. Bisherige Erfahrungen in verschiedenen Lerngruppen haben gezeigt, dass die Übertragung auf die neue Sichtweise ohne wesentliche Schwierigkeiten und mit nur moderater Anleitung vermittelbar ist.

**Experimente:** Es bietet sich an, noch einmal ein Interferometer mit Licht aufzubauen, damit über die Existenz eines Interferenzmusters die klassische Teilchenvorstellung widerlegt werden kann.

**Ertrag:** Die Experimente stützen zwar die Annahme, dass Photonen sich am Strahlteiler niemals teilen, dennoch kann man offenbar auch ungeteilte Photonen in eine  $\rightarrow$  *Superposition* bringen – wozu man ja mindestens zwei Pfade benötigt. Die Interferenz findet dabei nicht zwischen Bruchteilen des Photons statt (und in Übertragung der Ergebnisse aus dem Neutronen-Experiment auch nicht zwischen je zweien oder mehreren). Man wird akzeptieren müssen, dass die Interferenz zwischen abstrakt zu denkenden „Möglichkeiten“ eintritt. Die Nachweiswahrscheinlichkeit liegt dabei bereits dann fest, wenn das Photon die Quelle noch nicht verlassen hat, weil sie ja ein Abstraktum ist. Die nicht nur von Lernenden oft aufgeworfene Frage, woher das Photon wisse, wie die experimentelle Situation „vor ihm“ ist, muss offen bleiben. „Wir können nicht mehr tun, als das Verhalten zur Kenntnis zu nehmen und uns zu freuen, dass das Modell eine zutreffende Voraussage macht“ (nach R. Feynman).

## 6. Welcher-Weg-Information am Mach-Zehnder-Interferometer

**Leitfrage:** Kann man irgendwie herausfinden, welchen Weg die Photonen durch das Interferometer genommen haben?

**Ziele:** Die Lernenden interpretieren ein  $\rightarrow$  *Welcher-Weg-Experiment* unter den Gesichtspunkten  $\rightarrow$  *Nichtlo-*

*kalität* und  $\rightarrow$  *Komplementarität*. Insbesondere verbinden sie die Deutung des Experimentes mit der Aussage: „Erst die Kenntnis des gesamten Versuchsaufbaus legt das Interferenzgeschehen fest“.

**Zeitbedarf:** ohne Schülerexperiment 3 Unterrichtsstunden; mit Schülerexperiment 5–6 Unterrichtsstunden.

**Verlaufsskizze:** Nach Aufwerfen der Frage wird ein Experiment mit dem Mach-Zehnder-Interferometer vorgestellt. In diesem Experiment erhält man die Welcher-Weg-Information durch Absorption einiger Photonen (s. a. Versuchsvariante  $\rightarrow$  „Knallertest“ [8]).

Dieses Experiment zeigt m. E. alle wesentlichen Aspekte und ist mit den zur Verfügung stehenden Mitteln angemessen zu deuten. Es wird daher vorgeschlagen, es im Unterricht bei diesem Experiment zu belassen.

Verfeinert werden könnte das Vorgehen mit Polarisation – man setzt in jeden der beiden Pfade ein relativ zum anderen orthogonal polarisierendes Filter, um so die Welcher-Weg-Information aus dem Polarisationszustand der registrierten Photonen zu gewinnen. Ein entsprechendes Experiment ist sogar als Schülerexperiment möglich. Allerdings bereitet es Schwierigkeiten, das Experiment mit den vorhandenen Mitteln vollständig zu deuten. Man wäre daher gezwungen, eine neue Ad-hoc-Regel der Art „Interferenz tritt nur auf, wenn sich keine Welcher-Weg-Information gewinnen ließe“ einzuführen.

Wer damit zufrieden ist, kann die Polarisations-Experimente mit Gewinn einsetzen, eben auch mit dem Vorteil, dass nach langer Abstinenz wieder ein Schülerexperiment möglich ist.

Wer die Einführung der Ad-hoc-Regel nicht schätzt, müsste in der Zeigerdarstellung Polarisationsmerkmale in die Pfade einführen und sorgfältig darüber nachdenken, wie das Produkt  $\Psi' \cdot \Psi$  schülergerecht motiviert und angemessen berechnet werden könnte. Für



entsprechende Anregungen bin ich jederzeit dankbar.

**Experimente:** Siehe **Kasten 1**.

**Ertrag:** Die Lernenden können an diesem Experiment schulgerechte Elementarisierungen der Begriffe Nichtlokalität und Komplementarität kennenlernen. Nichtlokalität wird hierbei so verstanden, dass der Ausgang eines Experiments (erst) nach Kenntnis des gesamten Versuchsaufbaus vorhersagbar ist. Dabei scheiden klassische Vorstellungen von lokalen Wirkungen (des Absorbers) auf registrierte Photonen aus.

Komplementarität zeigt sich in diesem Experiment dadurch, dass bei Kenntnis des „eingeschlagenen Pfades“ die Wellenlänge nicht mehr messbar ist.

### 7. Aufgaben

**Ziele:** Übung und Vertiefung

**Zeitbedarf:** 2–3 Unterrichtsstunden

### 8. Lichtelektrischer Effekt

**Leitfrage:** Wenn man die Existenz von Photonen akzeptiert, sollte es möglich sein, deren Energie zu messen.

**Ziel:** Die Lernenden beschreiben ein Experiment zum äußeren lichtelektrischen Effekt mit der Vakuum-Fotозelle.

**Zeitbedarf:** 4 Unterrichtsstunden; zusätzlich 2 Unterrichtsstunden, falls vorbereitend ein Analogexperiment mit einer Vakuumröhre durchgeführt wird.

**Verlaufsskizze:** Von der Leitfrage ausgehend wird in einer Lernaufgabe das Prinzip des Experiments erarbeitet. Bei Bedarf kann man dieses Prinzip im Schülerexperiment an Vakuum-Dioden vertiefend erkunden. In meinem Unterricht kommt nach Abschluss der Experimente A. Einstein zu Wort mit dem in **Kasten 2** auszugsweise abgedruckten Text [10]. Dieser Text zeigt m.E. deutlich, wie vorsichtig Einstein formuliert. Insbesondere beachte man die im Text deutlich lesbare Schlussrichtung „Annahme der Existenz von Photonen ⇒ Deutung der Auslösung von Elektronen“.

**Experimente:** Vgl. den Beitrag „Experimente“ in diesem Heft.

## Welcher-Weg-Information

### Aufbau und Durchführung

Ein Mach-Zehnder-Interferometer wird mit grünem Laser-Licht betrieben (s. **Abb. 3**). In einem der Ausgänge beobachtet man das in **Abbildung 4** abgebildete Interferenzmuster. Zunächst befindet sich kein Gegenstand im Strahlengang.

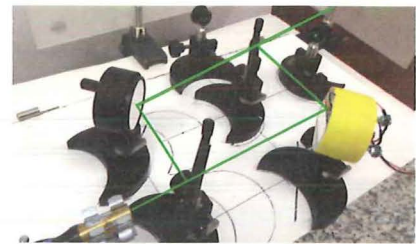
Analog zum sog. → „Knallertest“ nach [8] wird nun eine Figur in den Strahlengang gestellt (s. **Abb. 5**). Auf dem Beobachtungsschirm sieht man nun **Abbildung 6**.

### Deutung

Das Experiment zeigt trotz seiner Einfachheit deutlich den Aspekt von → *Nichtlokalität*, der im fachlichen Basisartikel (Kasten 3 und 4) als „erst die Kenntnis des gesamten Versuchsaufbaus entscheidet über das Interferenzmuster“ beschrieben wurde.

### Hinweise

- Eine kleine Figur wurde gewählt, weil das Erstaunliche dieses Experimentes besonders hervortritt, wenn man sich vorstellt, dass man es mit Röntgenphotonen durchführen könnte. Dann könnte man die Existenz eines absorbierenden Körperteils mit deutlich reduzierter Strahlenbelastung nachweisen.
- In die gleiche Richtung zielen die Experimente zum sog. Quanten-Zeno-Effekt [12], in denen der Anteil der von der Figur absorbierten Photonen weit unter 50% gesenkt werden kann.
- Das Experiment ist in der vorliegenden Version mit einem Laser kein Einzelphotonen-Experiment und könnte daher auch klassisch gedeutet werden. Es erhält seinen Wert erst durch die Mitteilung, dass vergleichbare Experimente mit Einzelphotonen durchgeführt wurden und identische Ergebnisse erbracht haben.
- Unter der Bezeichnung „delayed choice“ wurden vergleichbare Experimente durchgeführt, in denen die Welcher-Weg-Information erst dann abgeschaltet hat, wenn das Photon nach klassischer Auffassung „sich am Strahlteiler längst entschieden hat“ [13].



**3** | Aufbau eines Mach-Zehnder-Interferometers in der Version von Leybold mit einem grün strahlenden Diodenlaser



**4** | Interferenzmuster in einem der Ausgänge ohne Gegenstand im Strahlengang. Interessant in diesem Muster sind die *dunklen* Streifen. Sie kennzeichnen die Orte, an die niemals ein Photon gelangt. Nur sie zeigen das Vorliegen von Interferenz an. Sie machen das Muster unterscheidbar vom Ergebnis eines potenziellen Würfelspiels: Bei diesem gäbe es nur gleichbleibende Helligkeit.



**5** | Eine Figur im Strahlengang symbolisiert den Absorber aus dem „Knallertest“-Experiment.



**6** | Vorher dunkle Stellen werden jetzt beleuchtet. Die auf diese Stellen treffenden Photonen verraten die Existenz des Gegenstandes im Strahl. Dabei steht aber sicher fest, dass diese Photonen „den Gegenstand niemals gesehen haben“ können.



## Über die Erzeugung von Kathodenstrahlen durch Belichtung fester Körper

Die übliche Auffassung, dass die Energie des Lichtes kontinuierlich über den durchstrahlten Raum verteilt sei, findet bei dem Versuch, die lichtelektrischen Erscheinungen zu erklären, besonders große Schwierigkeiten, welche in einer bahnbrechenden Arbeit von Herrn Lenard dargelegt sind.

Nach der Auffassung, dass das erregende Licht aus Energiequanten von der Energie  $h \cdot \nu$  bestehe, lässt sich die Erzeugung von Kathodenstrahlen durch Licht folgendermaßen auffassen. In die oberflächliche Schicht des Körpers dringen Energiequanten ein, und deren Energie verwandelt sich wenigstens zum Teil in kinetische Energie von Elektronen. Die einfachste Vorstellung ist die, dass ein Lichtquant seine ganze Energie an ein einziges Elektron abgibt; wir wollen annehmen, dass dies vorkomme. Es soll jedoch nicht ausgeschlossen sein, dass Elektronen die Energie von Lichtquanten nur teilweise aufnehmen. Ein im Innern des Körpers mit kinetischer Energie versehenes Elektron wird, wenn es die Oberfläche erreicht hat, einen Teil seiner kinetischen Energie eingebüßt haben. Außerdem wird anzunehmen sein, dass jedes Elektron beim Verlassen des Körpers eine (für den Körper charakteristische) Arbeit  $P$  zu leisten hat, wenn es den Körper verlässt. Mit der größten Normalgeschwindigkeit werden die unmittelbar an der Oberfläche normal zu dieser erregten Elektronen den Körper verlassen. Die kinetische Energie solcher Elektronen ist  $h \cdot \nu - P$ .

Mit den von Herrn Lenard beobachteten Eigenschaften der lichtelektrischen Wirkung steht unsere Auffassung, soweit ich sehe, nicht im Widerspruch. Wenn jedes Energiequant des erregenden Lichtes unabhängig von allen übrigen seine Energie an Elektronen abgibt, so wird die Geschwindigkeitsverteilung der Elektronen, d. h. die Qualität der erzeugten Kathodenstrahlung von der Intensität des erregenden Lichtes unabhängig sein; andererseits wird die Anzahl der den Körper verlassenden Elektronen der Intensität des erregenden Lichtes unter sonst gleichen Umständen proportional sein.

Albert Einstein (1905)

Quelle: [10]

**Ertrag:** Wenn man schon davon überzeugt ist, dass es Photonen gibt, kann man mit dieser Annahme den lichtelektrischen Effekt sinnvoll und elegant deuten; mit dem Experiment kann man die Energie der ausgelösten Elektronen messen und auf die Energie einzelner Photonen schließen. Die Lernenden können erkennen, wie vorsichtig ein nachdenklicher Physiker wie Einstein formuliert (s. **Kasten 2**), und über Gründe für seine Vorsicht nachdenken.

### 9. $h$ -Bestimmung mit Leuchtdioden im subjektiven Verfahren

**Ziel:** Die Schülerinnen und Schüler erläutern die experimentelle Bestimmung des Planck'schen Wirkungsquantums mit LED (KC Niedersachsen). Sie führen dabei ein

Schülerexperiment durch und werten es fachgerecht aus. Sie schätzen Messunsicherheiten ab und bewerten das Ergebnis ihrer Arbeit. Zur Deutung der Vorgänge ziehen sie Kenntnisse über Halbleiterdioden heran und vertiefen ihre Kenntnisse über den Zusammenhang von elektrischer Energie und Spannung. Sie übertragen die Einstein'sche Formulierung seiner Deutung des lichtelektrischen Effekts auf dieses Experiment. Diese lange Liste macht deutlich, dass es bei diesem Experiment um mehr und anderes als die Bestimmung von  $h$  geht.

**Zeitbedarf:** 2–3 Unterrichtsstunden

**Verlaufsskizze:** Das Experiment wird als Schülerexperiment durchgeführt und im Rahmen einer Lernaufgabe ausgewertet und gedeutet.

**Experimente:** S. Hinweise im Beitrag „Experimente“ in diesem Heft.

**Ertrag:** Die Ausführung und die Deutung des Experimentes liefert Beiträge rund um Halbleiter, z. B. zu Bandlücke und Halbleiter-Modell. Es besteht ein enger Bezug zum kurzwelligen Ende des Röntgenspektrums sowie zur Deutung der Energieübertragungen zwischen Licht und Materie.

In der Kernphysik kann das Erlernen helfen, Teile der Funktionsweise eines Halbleiterdetektors zu verstehen.

### 10. Röntgenstrahlung als Analogie; kurzwelliges Ende des Bremspektrums

**Ziel:** Die Lernenden erläutern die Entstehung des Röntgen-Bremspektrums als Energieübertragung von Elektronen auf Photonen (KC Niedersachsen).

**Zeitbedarf:** je nach Anlage 1–2 Unterrichtsstunden

**Verlaufsskizze:** Das zugehörige Experiment wird als Demonstrationsexperiment vorgestellt, ausgewertet und in Analogie zum LED-Experiment gedeutet.

**Experimente:** sind nur mit einem Schulröntengerät möglich.

**Ertrag:** Die Lernenden lernen eine wesentliche Quelle für Röntgenstrahlung kennen.

### Ergänzungen

Wenn noch Zeit zur Verfügung steht oder wenn, was nicht selten geschieht, Lernende nach der Verschränkung fragen, schließt sich noch ein Abschnitt von 2–3 Unterrichtsstunden an. Grundlage für das zu Besprechende ist Kasten 5 im fachlichen Basisartikel.

Nach Erscheinen dieses Artikels wird für Kurse „auf erhöhtem Niveau“ in Niedersachsen die Behandlung der Unbestimmtheitsrelation zwischen Ort und Impuls verpflichtend. Zu diesem Thema habe ich noch keine breite Unterrichtserfahrung. Kernbestandteile eines möglichen Unterrichts skizziere ich in Kasten 6 im fachlichen Basisartikel.



## Literatur

- [1] Barth, M. (Hrsg.): Schwingungen und Wellen. NiU Physik 22 (2011), Nr. 125.
- [2] Gähler, R.; Zeilinger, A.: Wellenoptische Experimente mit sehr kalten Neutronen. In: Physik und Didaktik 22 (1994), Nr. 3, S. 217 ff.
- [3] Arndt, M. u. a.: Wann wird ein QO klassisch. In: PhiUZ (2006), Nr. 1, S. 24 ff.
- [4] Tonomura, A. (o. J.) – <http://www.hitachi.com/rd/research/em/movie.html> [16.02.2017].
- [5] Tonomura, A. u. a.: Demonstration of single-electron buildup of an interference pattern. In: Am Journal of Physics 57 (1989), S. 117 ff.
- [6] Hackermüller, L.: Matter-wave interferometer for large molecules. In: PhysRevLett 88 (2002).
- [7] Arndt, M.; Hornberger, K.: Testing the limits of quantum mechanical superpositions. – *ArXiv:1410.0270v1* (2014).
- [8] Elitzur, A.; Vaidmann, L.: Quantum Mechanical Interaction- Free Measurements. – [arxiv.org/pdf/hep-th/9305002.pdf](http://arxiv.org/pdf/hep-th/9305002.pdf) (1993).
- [9] Greenstein, G.; Zajonc, A.: The Quantum Challenge. Boston: Jones & Bartlett, 2006, S. 29f.
- [10] Einstein, A.: Über die Erzeugung von Kathodenstrahlen durch Belichtung fester Körper. Zitiert nach: Samburski, S.: Der Weg der Physik. München: DTV, 1978. S. 649 ff.
- [11] Rode, M. (2016). – <https://www.geogebra.org/m/t2y8FjNk> [21.04.2017].
- [12] Kwiat, P.G. u. a. (1999): High efficiency quantum interrogation measurement via the quantum Zeno effect. – *arXiv:quant-ph/990983v1* (27.009.1999).
- [13] Jacques, C.: Experimental Realization of Wheeler's Delayed-Choice GedankenExperiment. – *ArXiv.quant-ph/0610241v1 28Oct2006* (2006) (Zitat 19.10.2013).
- [14] Dürr, S.; Nonn, T.; Rempe, G.: Origin of quantum mechanical complementarity probed by a „which way“ experiment in an atom interferometer. In: Nature 395 (1998), S. 33–37.

## Und die zehn Fragen?

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

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

Die Unterrichtseinheit verwendet konsequent die Wahrscheinlichkeitsdeutung. Zwar wird von klassisch denkbaren Pfaden gesprochen und es wird auch der Begriff Wellenfunktion benutzt. Gerade durch die Betonung der Verbindung von klassischen Pfadregeln und Zeigerdarstellung kann aber deutlich werden, dass die Wellenfunktion ein Abstraktum ist und keine reale Wellenbewegung beschreibt.

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

Der Einstieg erfolgt nicht über Photonen; der lichtelektrische Effekt wird erst spät und nur als Messexperiment verwendet. An die Stelle von lichtelektrischem Effekt und Taylor-Experiment tritt ein Koinzidenz-Experiment. Andere Experimente werden in ihrer Rolle als Analog-Experimente gekennzeichnet.

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

Der Unterrichtsvorschlag macht die Grenzen der Anschaulichkeit deutlich. Gleichwohl verwendet er mit der Zeigerdarstellung ein anschauliches Hilfsmittel. Dessen Anschaulichkeit bleibt aber im Bereich des Abstrakten, indem Zeiger nur als Symbole verwendet und verstanden werden.

**4. Trägt der Unterrichtsvorschlag zur Entmystifizierung des Sachgebietes bei?****5. Eröffnet der Unterrichtsvorschlag Wege zu einer mehr als oberflächlichen Durchdringung?**

Durch die Verbindung von Pfadregeln und Zeiger-Mathematik kann deutlich werden, dass die Anwendung mathematischer Verfahren den Ausgang der Experimente statistisch zutreffend vorhersagt. Wer Zeit und Lust dazu hat, kann zeigen, dass auch verschränkte Zustände den gleichen elementaren Regeln gehorchen. Man muss allerdings akzeptieren, dass niemand weiß, wieso sich Quantenobjekte nach abstrakten Modellen richten.

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

Die mit der Zeigerdarstellung verwendete Darstellungsform ist eine schulgerechte Elementarisierung der Beschreibung durch  $\Psi$ -Funktionen. Die zugrundeliegende Pfadintegralmethode ist etabliert und zu anderen Beschreibungen der Quantenphysik äquivalent.

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

Diese Voraussetzungen sollten schon bei der Behandlung von Schwingungen und Wellen gelegt werden, damit man sie in der Quantenphysik als Werkzeug ohne große Mühe benutzen kann.

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

Material kann beim Verfasser abgerufen werden.

**9. Sind Experimente, Analogexperimente bzw. Modellationen einfach zugänglich?**

Für alle wesentlichen Experimente gibt es entweder bewährtes Experimentiermaterial oder geeignete Unterlagen aus der Literatur. Modellationen findet man unter [11].

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

Die Unterrichtseinheit ist gekennzeichnet durch eine große Anzahl von handlungsorientierten Aufgaben, begleitet durch einige Experimente, die arbeitsteilig oder auch im Schülerexperiment durchführbar sind.

Material kann beim Verfasser abgerufen werden