

## Zugänge zur Quantenmechanik: Fokus auf Photonen

Informationen zu den verschiedenen Zugängen

	<b>Münchener Unterrichtskonzept (Müller/Wiesner)</b>	<b>Erfahrungsbasiertes Lernen (Seiter et al.)</b>	<b>Kriterien nach Rode/Barth (Basisartikel NiU 162)</b>
Primäres Ziel	Begriffs- und Deutungsverständnis, anschließender Einblick in Formalismus.	Erfahrungsaufbau via Realexperimente; Reflexion von Kausalität/Zufall.	Auswahl und Bewertung von Unterrichtskonzepten; Klärung fachlicher Kernideen für die Schule.
Typ des Zugangs	Konzeptionell- theoretisch, mit klarer Begriffssprache (qualitativer Basiskurs); später formal (quantitativer Aufbaukurs).	Phänomenologisch, erfahrungsbasiert, wenig Mathematik.	Kein direkter Zugang / Kurs, sondern Raster und Kriterien zur Kursgestaltung mit Empfehlungen.
Zentrale Inhalte	Dynamische Eigenschaften, Born-Interpretation, Ensemble, Messprozess, Unbestimmtheit, Wellenfunktion, Operator, Potentialtopf, Atommodell.	Einzelphoton-Strahlteiler, Polarisation, Mach-Zehnder, Quantenradierer, Verschränkung; Fokus auf Komplementarität und stochastisches Verhalten.	Wesenszüge von Quantenobjekten, unterschiedliche Konzepte (historisch, Zeiger, Berliner, Münchener etc.), Kriterienkatalog, Glossar.
Umgang mit Mathematik	Hoch im Aufbaukurs: Einführung von Wellenfunktion, Operatoren, Eigenwertgleichungen; Kompromisse bei komplexen Zahlen.	Minimal: qualitativ, keine formale QM, Schwerpunkt auf Zählraten und Wahrscheinlichkeitsaussagen.	Betonung, dass Mathematik nur elementar einsetzbar ist; Empfehlung von Zeigermodell als Brücke.
Rolle von Experiment/Medien	Schlüsselsequenzen vor allem als Simulationen (Mach-Zehnder, Doppelspalt, Elektronenbeugung)	Reale quantenoptische Aufbauten (Quantenkoffer).	Breite Palette: Schulversuche, Filme, Simulationen; Warnung vor „falscher Anschaulichkeit“.
Umgang mit Lernschwierigkeiten	Explizite Analyse typischer Fehlvorstellungen (Bohr-Bild, permanente Lokalisierung, falsche Unbestimmtheitsdeutung) und Einbau in Kursstruktur.	Aufgreifen von Alltagsvorstellungen zu Determinismus/Zufall und Welle/Teilchen über Konfrontation von Erwartungen mit Beobachtungen.	Systematische Warnung vor „falschen Freunden“ und Kriterien, um genau solche Fallen zu vermeiden.

# Zugänge zur Quantenmechanik: Fokus auf Photonen

Sprachliche Repräsentationsformen von Photonen und Welle-Teilchen-Dualismus

Aspekt	Münchener Unterrichtskonzept (Müller/Wiesner)	Erfahrungsbasiertes Lernen (Seiter et al.)	Kriterien nach Rode/Barth (Basisartikel NiU 162)
Begrifflichkeit für Photonen	„Photon“ als Energiequant des Lichts, später allgemein als Quantenobjekt im Ensemble.	Zunächst „Energieportion des Lichts“, erst nach Klärung des Dualismus als „Photon“	Konsequent „Quantenobjekt“, Photon als spezieller Fall.
Einstieg in den Photonenbegriff	Photoeffekt, dann Mach-Zehnder und Doppelspalt mit Einzelphotonen.	Photoeffekt/Absorption → Energieportion; dann Realexperimente mit Einzelphotonen	Historische Entwicklung (Photoeffekt) und moderne Einzelphoton-Experimente
Betonung wellenartiger Aspekte	Interferenzmuster in Mach-Zehnder/Doppelspalt, Aufbau aus vielen Ereignissen; Deutung über Wahrscheinlichkeitsverteilungen	Interferenz in Mach-Zehnder, Quantenradierer, delayed choice; Variation der Zählraten als Interferenzsignal.	Interferenz als Kern: „Quantenobjekte interferieren mit sich selbst“, Superposition mehrerer Wege.
Betonung teilchenartiger Aspekte	Punktförmige Flecken/Detektorereignisse, Energieübertragung als Ganzes, Strahlteiler-Antikorrelation in Simulationen	Strahlteiler-Experiment: nie gleichzeitige Koinzidenzen an beiden Ausgängen, Detektion diskreter Ereignisse.	„Quantenobjekte werden in Detektoren stets als Ganzes nachgewiesen“, Einzelereignisse stochastisch.
Umgang mit Dualismus-Begriff	Welle-Teilchen-Dualismus als Problemthema; Ziel: Vereinheitlichung über Wellenfunktion/Wahrscheinlichkeitsinterpretation (Ensemble).	Dualismus wird zunächst als naive Frage („Welle oder Teilchen?“) aufgegriffen, dann als unzulässige Wesensaussage zurückgewiesen.	Dualismus explizit als nicht hilfreich kritisiert; Quantenobjekt als „Drittes“ statt „mal Welle, mal Teilchen“
Aussagen zu Weg/Ort des Photons	Zeigt explizit, dass Photonen im Interferometer im Allgemeinen keine Eigenschaft „Ort/Weg“ haben; Weg-Zuordnung zerstört Interferenz.	Welcher-Weg-Fragen werden über Komplementarität und Quantenradierer thematisiert; Fokus auf „was beobachtbar ist“, nicht auf „welchen Weg“.	Betont, dass über Ort/Verlauf vor der Detektion keine sinnvollen Aussagen möglich sind; nur Apparatur + Wahrscheinlichkeiten.
Typische sprachliche Leitlinie	Klarer Unterschied zwischen „Eigenschaft haben“ und „Eigenschaft messen“; vorsichtige Verwendung von „Photon geht Weg ...“.	Vermeidung von Aussagen, die Photonen feste Eigenschaften zuschreiben;	Vermeidung von Seinsaussagen („Licht ist Welle/Teilchen“); Warnung vor

		Beschränkung auf Zählraten, Korrelationen, Interferenz.	„falschen Freunden“ in der Sprache.
Ziel im Hinblick auf Schülervorstellungen	Abbau klassischer Teilchen-/Bahnvorstellungen, Aufbau eines Ensemble-Bildes mit nichtklassischem Eigenschaftsbegriff.	Emanzipation von unreflektierten Alltagsbildern; Einsicht, dass „Photon = Welle/Teilchen“ keine sinnvolle Frage ist, nur statistische Kausalität.	Etablierung eines Begriffs „Quantenobjekt“ mit klaren, nichtklassischen Wesenszügen; explizite Demontage des naiven Dualismus.

## Zugänge zur Quantenmechanik: Fokus auf Photonen

Sprachregeln und Beispielformulierungen für den Unterricht basierend auf den verschiedenen Zugängen

### Münchener Unterrichtskonzept (Müller/Wiesner)

Über Photonen wird konsequent im Ensemblebild gesprochen. Interferenz beschreibt Wahrscheinlichkeitsverteilungen vieler identisch präparierter Photonen. Es können keine Aussagen zum Ort oder Weg einzelner Photonen getroffen werden,

#### Beispielsatz zum Verhalten von Photonen am Doppelspalt:

Wenn identisch vorbereitete Photonen nacheinander durch den Doppelspalt laufen, entsteht auf dem Schirm ein Interferenzmuster aus vielen Einzelpunkten. Jedes Photon trifft als Ganzes zufällig an einem Ort ein. Jedoch folgt die Gesamtheit der Einschläge einer Wahrscheinlichkeitsverteilung.

### Erfahrungsbasiertes Lernen (Seiter et al.)

Zunächst wird von Energieportionen des Lichts gesprochen, deren Eigenschaften nur aus Zählraten und Interferenzbildern erschlossen werden. Aussagen über den Ort oder Weg oder Eigenschaften werden zunächst bewusst ausgelassen. Im Fokus steht Beobachtbares.

#### Beispielsatz zum Verhalten von Photonen am Doppelspalt:

Wenn Photonen durch den Doppelspalt geschickt und die Ereignisse auf dem Schirm gezählt werden, so entsteht mit der Zeit ein Interferenzbild. Es kann nicht vorhergesagt werden, wo die nächste Energieportion auftrifft, wohl aber in welchen Bereichen viele und in welchen Bereichen fast gar keine Ereignisse zu erwarten sind

### Kriterien nach Rode/Barth

Photonen werden als Quantenobjekte bezeichnet, die weder Welle noch Teilchen sind. Die Zuschreibung von Eigenschaften wird vermieden. Es wird sich auf die Überlagerung von Möglichkeiten, Interferenz der Wahrscheinlichkeitsamplituden, fokussiert.

#### Beispielsatz zum Verhalten von Photonen am Doppelspalt:

Am Doppelspalt zeigt sich das Photon als Quantenobjekt. Es interferiert mit den eigenen Möglichkeiten, so dass bestimmte Bereiche des Schirms bevorzugt, andere Bereiche ausgeschlossen sind. Jedes Photon wird nur als unteilbares Ganzes nachgewiesen.