







Antworten der Physikdidaktik

- Empirische Untersuchungen an Schülerinnen und Schülern
 - Alltagsvorstellungen
 - Konzeptwechsel
 - Motivation
 - Wirksamkeit von Unterrichtsmethoden
- Innovative Unterrichtskonzepte
 - Experimente, Modelle, Medien,...
 - Fachliche Klärungen



Unser Beitrag

- Innovative Unterrichtskonzepte

 - ExperimenteFachliche Klärungen

Quantenphysik



Quantenphysik in der Schule

- Motivierend
 - Exemplarisch für "Moderne Physik"
 - Aktuelle Anwendung: Quantenkryptographie
- Schwierig zu verstehen
 - Klassisches Weltbild ist sehr stabil
 - Skurrile Quantenwelt als Synonym für fehlenden Lebensbezug
- Vernünftige Forderung: Unterricht darf nicht nur bis zu den Resultaten im Jahre 1916 (Millikan: h-Messung) reichen



Didaktische Rekonstruktion: Fachliche Klärung

- Welche fachwissenschaftlichen Aussagen liegen zu diesem Thema vor, und wo zeigen sich deren Grenzen?
- Welche Genese, Funktion und Bedeutung haben die fachlichen Begriffe, und in welchem Kontext stehen sie jeweils?
- Welche Fachwörter werden verwendet, und welche Termini legen durch ihren Wortsinn lernhinderliche bzw. –förderliche Vorstellungen nahe?

[Kattmann, Duit, Gropengießer und Komorek, Zeitschrift für Didaktik der Physik 3(3) 3-18(1997)]



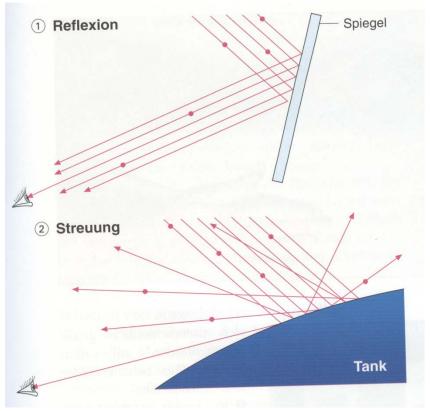
Photon



Kugel-Modell des Photons



Wozu dient 1. und 2. Blende? Wie rauh darf die Fläche sein? Wie groß ist das "Photon"?



[Netzwerk Physik, Schrödel (2006)]



Einstein zum Photoeffekt (1905)

Nach der hier ins Auge zu fassenden Annahme ist bei Ausbreitung eines von einem Punkte ausgehenden Lichtstrahles die Energie nicht kontinuierlich auf größer und größer werdende Räume verteilt, sondern es besteht dieselbe aus einer endlichen Zahl von in Raumpunkten lokalisierten Energiequanten, welche sich bewegen, ohne sich zu teilen und nur als Ganze absorbiert und erzeugt werden können.

[Annalen der Physik IV 17, 132-148 (1905)]



Einstein ganz lesen

6. Über einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt; von A. Einstein.

Die mit kontinuierlichen Raumfunktionen operierende Undulationstheorie des Lichtes hat sich zur Darstellung der rein optischen Phänomene vortrefflich bewährt und wird wohl nie durch eine andere Theorie ersetzt werden.



Rückblick auf den Photoeffekt

• G. Wentzel, Z. f. Physik **40** (1926) 574

Zusammenfassung.

Unter den von Schrödinger berechneten erzwungenen Schwingungen, die eine Lichtwelle in einem wellenmechanischen Atom erzeugt, finden sich auch die Eigenschwingungen des kontinuierlichen Spektrums, welche einem vom Atom ausgehenden Elektronenstrom entsprechen. Schrödingers Störungsformel erlaubt demnach, die Wahrscheinlichkeit photoelektrischer Prozesse zu berechnen (§ 1).

- Semiklassische Theorie: Quanten-Atom + klassische e/m Welle
- Lehrbuchherleitung der Absorption e/m Wellen z.B. in [Bransden & Joachain: Physics of Atoms and Molecules]
- Lamb, Anti-Photon, Appl. Phys. B (1995): Begriff abschaffen.
- Kidd/Ardini/Anton: Evolution of the modern Photon, AJP 1989

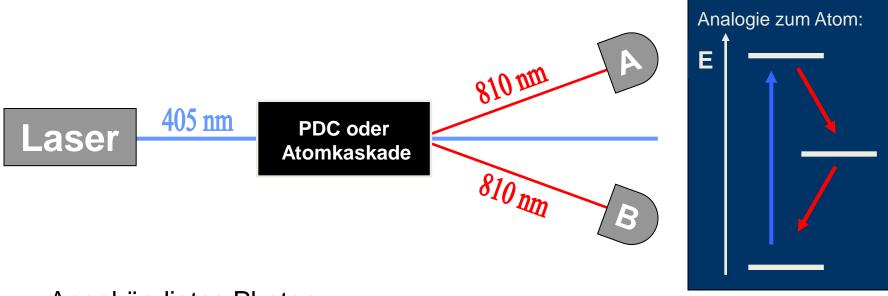


Photon ↔ nichtklassisches Licht

- Schulbeispiele zur Quantenphysik sind semiklassisch
 - Photoeffekt
 - Compton-Effekt [J N Dodd, Eur. J. Phys. 4 (1983) 20 S211]
 - Laser [W. E. Lamb, Phys. Rev. 134, A1429 (1964)]
- QED-Effekte: Spontane Fluoreszenz, parametrische Fluoreszenz
- Quanteneffekt am Strahlteiler [J F Clauser, Phys. Rev D 9, 853 (1974)]
 - 69 Jahre nach Photoeffekt
 - 46 Jahre nach Dirac-Gleichung
 - 14 Jahre nach Laser
- Weitere bahnbrechende Experimente in 1980er Jahren



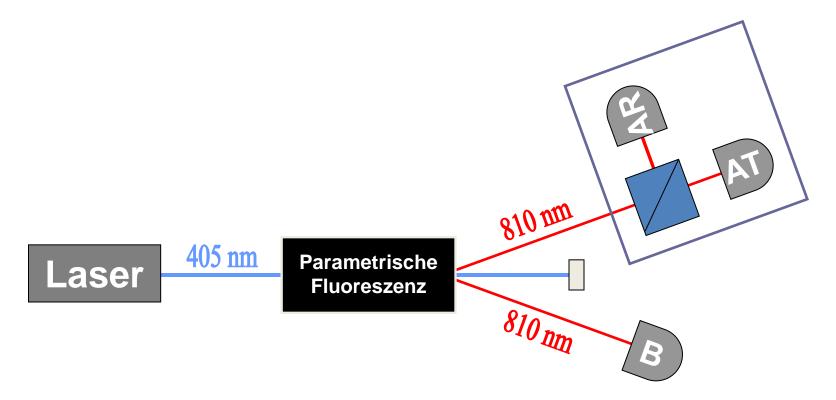
Präparation eines einzelnen Photons |1>



- Angekündigtes Photon
 Detektor A klickt → An Detektor B ist ein Photon |1> präpariert
- Koinzidenzmethode
 An Stelle der statistischen Verteilung der Detektionsereignisse
 (Maxwell + Schrödinger) tritt eine wohldefinierte Ordnung :
 1. Paar, 2. Paar, 3. Paar,...



Experiment: Photon am Strahlteiler [Grangier et al. 1986]



Detektion *entweder* AR *oder* AT, jedoch nicht: keine Detektion, oder (AT und AR) Interpretation: Das Photon ist unteilbare Elementarportion des Lichts



Taylor: Doppelspalt-Versuch mit einzelnen Photonen

[G. I. Taylor, Interference fringes with feeble light, Proc. Cam. Phil. Soc. 1909]

- Keine bahnbrechende fachwissenschaftliche Arbeit
- Wichtige Experiment im Schulunterricht: "Im Apparat ist weniger als ein Photon pro Durchlaufzeit, trotzdem Interferenz"
 - Handreichung RLP Quantenphysik [Leisen]
 - Handreichung PIKO Quantenphysik [Rainer Müller]
 - www.forphys [Horst Hübel]
 - www.leifiphysik.de
 - www.quantenphysik-schule.de
- Taylor hat gezeigt: Interferenz ist intensitätsunabhängig
 - Entspricht der naiven Erwartung
 - Im Originaltext keine Berechnung in der Einheit hv



Folgerungen für den Schulunterricht Quantenphysik



Mögliche Wege zur Quantenphysik

- Historisch
 - Planck, Bohr, ...
 - Konventioneller Ansatz
 - Erfahrungsgemäß ohne die letzten 90 Jahre
- Erläuterung der Theorie
 - Feynman: QED the strange theory of light and matter
 - Klassische Physik ist Spezialfall der QED
 - Vorbild für viele Unterrichtsvorschläge, z.B. Zeigerformalismus
- Phänomen-orientiert
 - Reale Experimente nehmen zentrale Rolle ein
 - Quanteneffekte sind Abweichung von der klassischen Physik
 - Quantenphysik des Lichts ist praktikabel



Erlanger Idee zur Quantenphysik

- Phänomen-orientiert
 - Reale Experimente nehmen zentrale Rolle ein
 - Quanteneffekte sind Abweichung von der klassischen Physik
 - Quantenphysik des Lichts ist praktikabel



Gibt es Quantenphänomene?

- Nein, denn unsere Wahrnehmungswelt ist per definitionem klassisch
- Ja, zuerst das Planck'sche Strahlungsgesetz, und dann
 - Spontane Emission von Atomen
 - Supraleitung
 -
 - Bose-Einstein-Kondensat
- Vergleiche: Experimentelle Bedingungen Regenbogen vs. Bose-Einstein-Kondensat
- Wie kommt man darauf? Theoretisches Vorwissen!



Erlanger Konzept zur Quantenphysik

- Historischer Abriss:
 Planck 1900 Einstein 1905 Heisenberg 1925 Schrödinger 1926
- Theoriegeleitetes vs. phänomengeleitetes Experimentieren
 - Wesensmerkmal der modernen Physik
 - Beispielsweise in der ART: Lichtablenkung bei SoFi 1919
- Demonstration eines bahnbrechenden Experiments [Grangier 1986]
- Photonen: spezifische Quanteneigenschaften des Lichts
 - Interferenz, Polarisation,... sind klassische Erscheinungen [Maxwell]
 - Fock-Zustand |1> als "einzelnes Photon"
- Zielgruppe: Klasse 12



Begriffe unseres Konzepts

- Lichtstrahl: Geometrisches Objekt
- Elektromagnetische Welle: übergreifendes Konzept, enthält den Lichtstrahl als k-Vektor
- Photon: Elementarportion der elektromagnetischen Feldes
 - Mengen-Quantisierung
 - Keine Aussage über Lokalisierung
 - Vermeidung der Redeweise "Photon fliegt"
- Photon ist positive Erweiterung, keine Einschränkung (./. Dualismus)



12. Klasse der Freien Waldorfschule Erlangen, November 2009

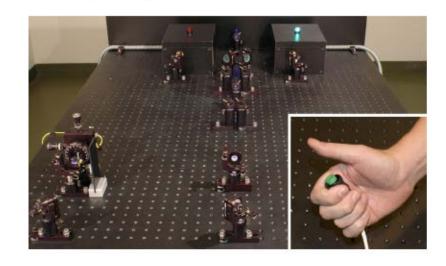


Interaktive Bildschirmexperimente (IBE)

- Kirstein et al.,
 [Eur. J. Phys 28, S115 (2007)]
- Photographie der Experimente
 - Für jede Einstellung separat
- Adobe Flash 9
- Benutzer kann Einstellungen interaktiv ändern
- www.quantumlab.de



Figure 2. Principle of the experiment 'coincidence measurement'.





Quantenphysik kommt in die Schule



Quantenoptik-Experimente für das Klassenzimmer

- F-Praktikum Quantenoptik seit 2002 [E. Galves, M. Beck, etc.]
- Besondere Anforderung Schule
 - Keine Laborumgebung mit Zutrittsverbot bei Detektorbetrieb
 - Laser-Leistung < 1mW
 - Jede zusätzliche Komponente ist erklärungsbedürftig (und teuer)
- Detektorentwicklung durch Andreas Strunz
 - APD mit Sicherheitsschaltung, ohne Lüfter
 - ohne Faserkopplung
 - Experiment ist nur in Blickrichtung der Detektoren dunkel
 - Koinzidenzschaltung von Mark Beck
 [D. Branning, S. Bhandari, and M. Beck, Am. J. Phys. 77, 667-670 (2009)]
 - Fock-State Präparation aus dem Koffer



Lehrervortrag

- Avalanche Photo Diode (APD)

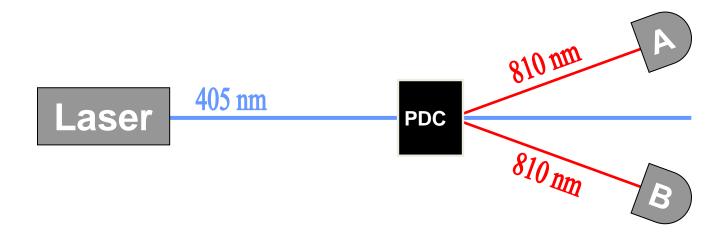
 - Detaillierte Erklärung, Analogie Schneelawine
 - Pulse sind technisch konstruiert, nicht: Natur
- Parametrische Fluoreszenz (PCD)
 - Detektor schaut auf schwach leuchtenden Kristall
 - Weil es so funktioniert. (theoriegeleitet)

Schüleraktivität

- Detektor ausgiebig testen
- Raum f
 ür Vorschl
 äge (was passiert, wenn…)
- Diskussion: Was bedeuten die Zahlen, was muss ich glauben?



Vorstufe zum Experiment





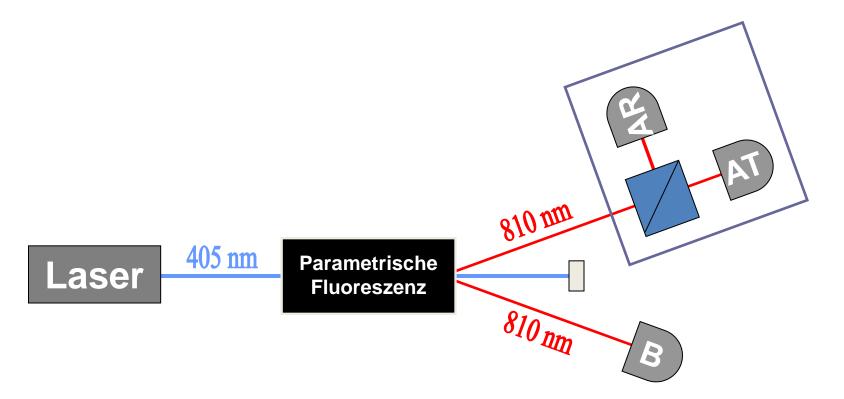
Koinzidenzen

Alice							
Bob							

- Theoriegeleitetes Experimentieren
- Die Koinzidenzen definieren das Experiment, der Rest wird ignoriert
- Experimentieren im Umgebungslicht möglich
 - Photonen sind *nicht* die Atome des Lichts



Experiment: Photon am Strahlteiler [Grangier et al.1986]



Das Photon ist unteilbare Elementarportion des Lichts:

Detektion entweder AR oder AT, jedoch nicht: keine Detektion, oder (AT und AR)

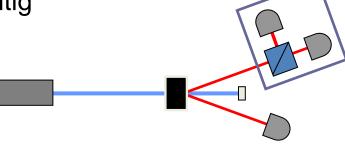


Alice

Bob

Auswertung der Zählraten

- Einfach wäre: Niemals T und R gleichzeitig
 - Leicht: Laser dimmen, ist aber Betrug
- Überzeugend ist leider: $N_{TR} \ll N_T$, N_R
 - Auch: "Licht besteht aus Photonen"



- Statistisch unabhängige Ereignisse: $P_{TR} = P_T P_R$
- Zählrate $N = P \times Zahl$ der Experimente
- Zahl der möglichen Experimente: N_B (Koinzidenzschaltung!)

$$P_{TR} N_B \cdot N_B = P_T N_B \cdot P_R N_B \Leftrightarrow N_{TR} N_B = N_T N_R \Leftrightarrow \frac{N_{TR} N_B}{N_T N_R} = 1 \rightarrow \alpha = 1$$

• Nichtklassisches Licht: $\alpha < 1$

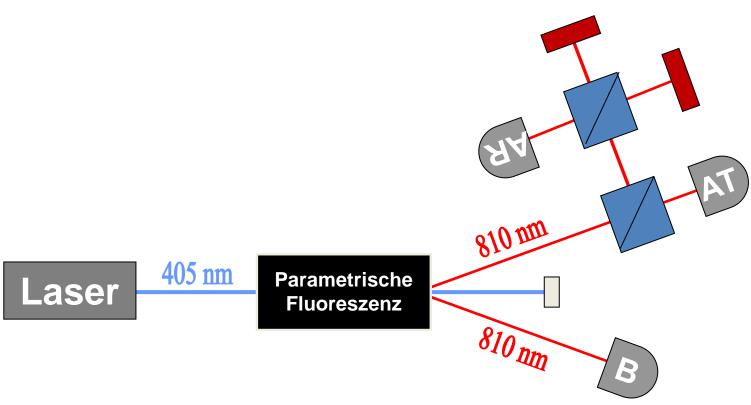


Zählraten beurteilen

- Klassisch vs. Nichtklassisch hat Übergangsbereich
- Technisch: α ist im Justiermodus nicht sehr überzeugend (> 0,2)
- Schüler diskutieren: Kriterium "Nicht-Klassisch"
 - 0,97 ist zu nahe bei 1
 - 0,00001 ist übertrieben
 - Schüler zieren sich
 - Jeder muss seinen Wert nennen (weder richtig noch falsch)
 - Mittelwert (oder andere Konsensfindung)
 - So funktioniert Wissenschaft im Großen auch!
- Hier zeigt sich Quanteneigenschaft nur zahlenmäßig!



Der andere Teil des Experiments [Grangier et al.1986]





Hindernisse

Quanten

- Die übliche Praxis des "Welle-Teilchen-Dualismus des Lichts"
 - Vorkenntnisse sogar bei Schülern der Rudolf Steinerskolen Oslo
- Mechanik als Grundlage der Physik
 - Tastsinn wird über den Sehsinn erhoben, Relikt des 19. Jahrhunderts
- Teilchenmodelle f
 ür Kontinua
 - Körnigkeit impliziert, wo Elementarportionen schon hinreichend wären

Theoriegeleitetes Experimentieren

- Wenig bewusste Rolle des Experiments im Physikunterricht
- Nature of Science ist anerkanntes Problem der Physikdidaktik



Förderung individuelle Interessen

- Leistungsträger sind begeistert
- Physik (fast) ohne Formeln erscheint leichter
- Philosophie: Theoriegeleitetes Experimentieren
 - Physik als kulturelle Handlung
- Geschichte: Authentischer Rückblick
 - kein "modern" für 1920er Jahre
- Sozialkunde: Abhörsicherheit durch Quantenkryptographie



Zusammenfassung

- Quantenphysik aus der Optik entwickelt
- Verzicht auf mechanische Begriffe: Teilchen, Bahn, ...
- Realexperiment f
 ür das Klassenzimmer
- Theoriegeleitetes Experimentieren statt Faktenvortrag "Dualismus"
- Subjektiv: Kommt bei Schülern an

Ausblick

- Randbedingungsfreier Unterrichtversuch → Praktikables Curriculum
- Technischen Fortschritt für weitere Experimente nutzen
- Langfristig: Licht-artiges Verhalten der Materie zeigen



Förderung

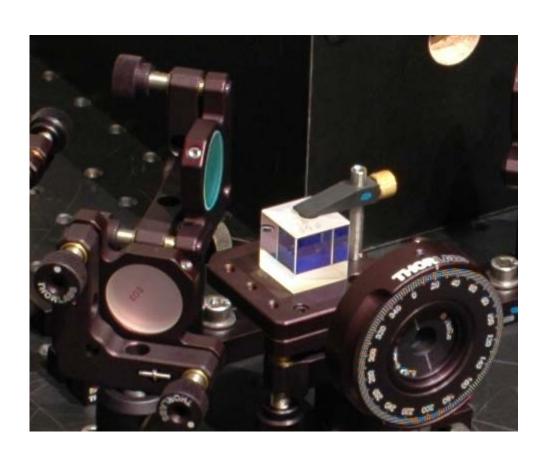
Robert Bosch Stiftung

Universitätsbund der FAU, StMUK









www.quantumlab.de

