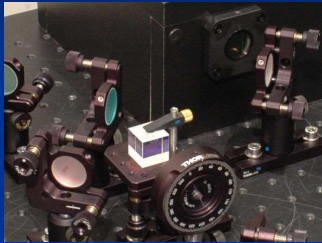


„Und er würfelt doch!“ Quantenphysik am Strahlteiler entdecken



Dr. Patrick Bronner

Lehrer am Friedrich-Gymnasium Freiburg
Fachberater für Physik am Regierungspräsidium Freiburg
Lehrbeauftragter für Physik am Seminar für Lehrerbildung Freiburg



Übersicht

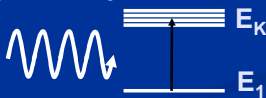
1. Einführung in das Konzept
2. Präparation eines Photons
3. Experimente für Schule und Universität
4. Beispiele aus dem Physikunterricht
5. Ausblick

2

1. Einführung

Das Standardexperiment zur Quantennatur von Licht:

- Photoeffekt: $E_{\text{kin}} = h \cdot f - W_A$ [1]
- Lamb & Scully 1969: Kein eindeutiger Nachweis für die Quantennatur von Licht [2]
- Beweis mit der zeitabhängigen Störungstheorie:
Quantensystem mit zwei energetischen Niveaus
klassische e-m Welle
Fermis goldener Regel: $E_{\text{kin}} \sim f$



[1] A. Einstein: „Über einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt.“
Annalen der Physik, 322 (6), 132 (1905)

[2] E. Lamb Jr. et al., The Photoelectric Effect without Photons (Presses Universitaires de France, Paris, 1969).

3

1. Einführung

Weitere Experimente zur Quantennatur von Licht:

- Doppelspaltversuch (Young 1802)
- Interferenz von abgeschwächtem Licht (Taylor 1909)
- Franck-Hertz-Experiment (1914)
- Compton Streuung (1922)
- Experimente sind klassisch oder semiklassisch erklärbar [3]
→ 1974: Experiment zur Quantennatur von Licht [4]
- Bedeutung für die Schulausbildung:
→ Experimente sind 80 Jahre alt
→ Interpretation ist auch 80 Jahre alt

Warum noch in
Lehrplänen
enthalten?

[3] R. Loudon, The Quantum Theory of Light. (Oxford University Press, Oxford, 2000).

[4] J. F. Clauser, „Experimental distinction between the quantum and classical field-theoretic predictions for the photoelectric effect,“ Physical Review D 9 (4), 853 (1974).

4

1. Einführung

Ansatz des Erlanger Konzepts zur Quantenphysik [5, 6]:

- Etablierung eines zeitgemäßen Curriculums
 - aktueller wissenschaftlicher Stand
 - Methoden der Forschung: Quantenoptik
 - Experimente, die eindeutig die Quantennatur zeigen
 - Einblick in die Quantenphysik für die 10. Klasse (G8) (bevor 70% der Schüler Physik abwählen)
- Phänomenorientierter Zugang am Strahlteiler
 - Quantenphysik ohne Formeln erleben
 - Direkter Einstieg ohne historische Experimente
 - Verknüpfung von Grundlagen und Anwendungen

[5] P. Bronner, A. Strunz, C. Silberhorn, and J. P. Meyn, „Interactive screen experiments with single photons,“
European Journal of Physics 30 (2), 345-353 (2009).

[6] P. Bronner et al., „Und er würfelt doch!“ Praxis der Naturwissenschaften - Physik, 62 (1), 11-14, (2013).

5

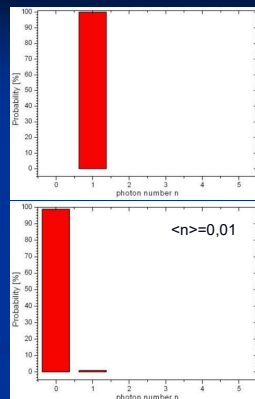
Übersicht

1. Einführung in das Konzept
- 2. Präparation eines Photons**
3. Experimente für Schule und Universität
4. Beispiele aus dem Physikunterricht
5. Ausblick

6

2. Präparation eines Photons

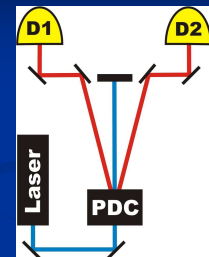
Was ist ein einzelnes Photon?



2. Präparation eines Photons

Trick: Erzeugung von zwei Photonen

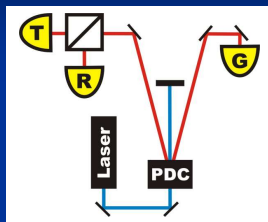
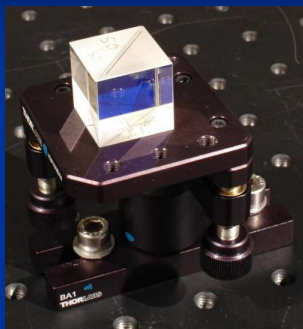
- Parametric Down Conversion (PDC)
- Nullereignisse werden gelöscht
- Einzelne Ereignisse werden gelöscht
- Auswertung nur bei Koinkidenz (2ns)



8

2. Präparation eines Photons

Existiert das Photon als Quantenobjekt?



9

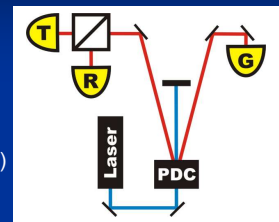
2. Präparation eines Photons

Existiert das Photon als Quantenobjekt?

- Argumentation für die Schule:
Lichtportion teilt sich nicht
→ **Photon**
- Argumentation für Physiker:
Korrelationsfunktion: $g^{(2)}(0)$

Glühlampe: $g^{(2)}(0) = 2$
Laser: $g^{(2)}(0) = 1$
Quanten: $g^{(2)}(0) < 1$

Experiment: $g^{(2)}(0) = 0,0009 \pm 0,0004$
→ **Photon**



10

Übersicht

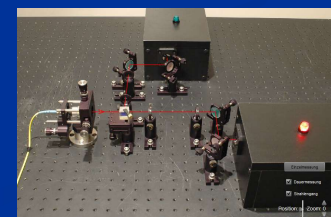
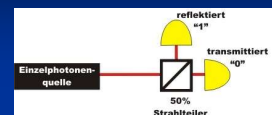
1. Einführung in das Konzept
2. Präparation eines Photons
3. Experimente für Schule und Universität
4. Beispiele aus dem Physikunterricht
5. Ausblick

11

3. Experimente für Schule und Universität

Experimentelles Niveau herunterbrechen

- Angekündigte Zwillingen-photonenquelle als Black-Box
- Detektoren mit einzelnen Lampen
- Photon auf Tastendruck



3. Experimente für Schule und Universität

- 3.1 Quantenzufall
- 3.2 Verschränkung und Nichtlokalität
- 3.3 Quantenkryptographie
- 3.4 Interferenz
- 3.5 Weitere Experimente

13

3.1 Quantenzufall

Kategorien von Zufall:

- Mechanisches Würfeln
 - Deterministisches Chaos
 - Computergenerierter Zufall
 - Echter Zufall?
- Quantenphysik



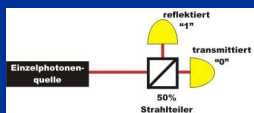
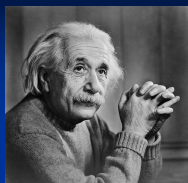
Quelle: Wikipedia: spielbank-wiesbaden-by-RalfR-093

14

3.1 Quantenzufall

Albert Einstein, 1922:

„Es scheint hart, dem Herrgott in die Karten zu gucken. Aber dass er würfelt und sich telepathischer Mittel bedient, kann ich keinen Augenblick glauben.“



Experiment im Klassenzimmer durchführen:
www.QuantumLab.de – Quantenzufall – Kapitel 1

15

3.1 Quantenzufall

Ist das wirklich Zufall?

- Test mit 300MBit am NIST: 99,9% zufällig

Thema für die Schule:

- Mathematikunterricht: Häufigkeiten, Muster, π ,
- Musikunterricht: Würfelmusik - Mozart
- Philosophieunterricht: Kant: In einer Welt ohne Zufall gibt es keinen freien Willen.
- Religionsunterricht: „Hinweis auf etwas, das uns in jeglicher Art überlegen ist.“

Testverfahren	P	β	Ergebnis
Frequency (Monobit) Test	0.4550	1.00	Bestanden
Frequency Test within a Block	0.4190	0.99	Bestanden
Runs Test	0.851383	1.00	Bestanden
Longest-Run-of-Ones in a Block	0.6163	1.00	Bestanden
Binary Matrix Rank Test	0.037566	1.00	Bestanden
Discrete Fourier Transform (Spectral) Test	0.8977	1.00	Bestanden
Non-overlapping Template Matching Test	0.5289	1.00	Bestanden
Overlapping Template Matching Test	0.5341	1.00	Bestanden
Maurers Universal Statistics Test	0.9114	0.99	Bestanden
Linear Complexity Test	0.7197	1.00	Bestanden
Serial Test	0.1240	1.00	Bestanden
Approximate Entropy Test	0.7197	1.00	Bestanden
Cumulative Sums (Cusums) Test	0.0894	0.99	Bestanden
Random Excursions Test	0.5216	0.98	Bestanden
Random Excursions Variant Test	0.4500	1.00	Bestanden



16



© Thorsten Thies – käuflich erworbenes Bild

17

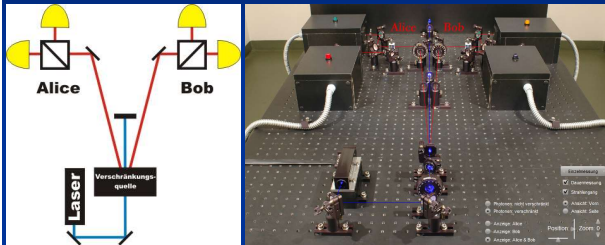
3. Experimente für Schule und Universität

- 3.1 Quantenzufall
- 3.2 Verschränkung und Nichtlokalität**
- 3.3 Quantenkryptographie
- 3.4 Interferenz
- 3.5 Weitere Experimente

18

3.2 Verschränkung

Was ist Verschränkung?

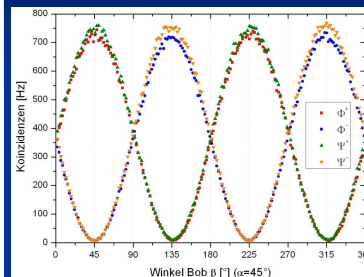


Experiment im Klassenzimmer durchführen:
www.QuantumLab.de – Verschränkung – Kapitel 1

19

3.2 Verschränkung

Diese Erklärung reicht für das Klassenzimmer aus....



$$\begin{aligned} |\Phi^+\rangle &= \frac{1}{\sqrt{2}} (|V_A, V_B\rangle + |H_A, H_B\rangle) \\ |\Phi^-\rangle &= \frac{1}{\sqrt{2}} (|V_A, V_B\rangle - |H_A, H_B\rangle) \\ |\Psi^+\rangle &= \frac{1}{\sqrt{2}} (|V_A, H_B\rangle + |H_A, V_B\rangle) \\ |\Psi^-\rangle &= \frac{1}{\sqrt{2}} (|V_A, H_B\rangle - |H_A, V_B\rangle) \end{aligned}$$

Experiment im Hörsaal durchführen:
www.QuantumLab.de – Verschränkung – Kapitel C

20

3.2 Verschränkung

CHSH-Ungleichung:

$$S = |E(\alpha_1, \alpha_2) - E(\alpha_1, \beta_2) + E(\beta_1, \alpha_2) + E(\beta_1, \beta_2)| \leq 2 \quad (1)$$

$$S = |E(0^\circ, 22.5^\circ) - E(0^\circ, 67.5^\circ) + E(45^\circ, 22.5^\circ) + E(45^\circ, 67.5^\circ)| \leq 2 \quad (2)$$

$$E(\alpha, \beta) = \frac{(ATBT + ARBR) - (ATBR + ARBT)}{(ATBT + ARBR) + (ATBR + ARBT)} \quad (3)$$

$$S = |0.75 - (-0.64) + 0.64 + 0.75| = 2.78 > 2 \quad (4)$$

Wigner-Ungleichung:

$$P_{++}(0^\circ, 30^\circ) \leq P_{++}(0^\circ, 60^\circ) + P_{+-}(30^\circ, 60^\circ) \quad (4)$$

$$0.35 \leq 0.13 + 0.13 \Rightarrow W = 0.35 - 0.13 - 0.13 = 0.09 \leq 0 \quad (5)$$

$$P_{++}(\alpha, \beta) = \frac{ATBT}{ATBT + ARBR + ATBR + ARBT} \quad (6)$$

$$P_{+-}(\alpha, \beta) = \frac{ATBR}{ATBT + ARBR + ATBR + ARBT} \quad (7)$$

3.2 Verschränkung

Hardy-Ungleichung [7]:

$$P(\alpha_{\text{Alice}}, \alpha_{\text{Bob}}) = 9\% \quad (1)$$

$$P(\beta_{\text{Bob}}|\alpha_{\text{Alice}}) = 100\% \Rightarrow P(\alpha_{\text{Alice}}, \beta_{\text{Bob}}) = 0\% \quad (2)$$

$$P(\beta_{\text{Alice}}|\alpha_{\text{Bob}}) = 100\% \Rightarrow P(\beta_{\text{Alice}}, \alpha_{\text{Bob}}) = 0\% \quad (3)$$

$$P(\beta_{\text{Alice}}, \beta_{\text{Bob}}) \geq 9\% \quad (4)$$

$$P(18^\circ_{\text{Alice}}, 18^\circ_{\text{Bob}}) = 9\% \quad (5)$$

$$P(18^\circ_{\text{Alice}}, -34^\circ_{\text{Bob}}) = 0\% \quad (6)$$

$$P(-34^\circ_{\text{Alice}}, 18^\circ_{\text{Bob}}) = 0\% \quad (7)$$

$$P(-34^\circ_{\text{Alice}}, -34^\circ_{\text{Bob}}) \geq 9\% \quad (8)$$

[7] L. Hardy, "Nonlocality for two particles without inequalities for almost all entangled states," Physical Review Letters 71 (11), 1665 (1993).

3.2 Verschränkung

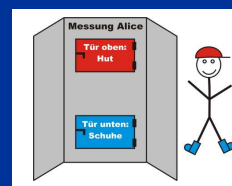
Physikalischer Beweis (nach Hardy):

- Im Unterricht: 15 Minuten Lehrvortrag (12. Klasse – G8)
„Wenn Du es kapiert solltest Du Physik studieren“
„Wenn Du es nicht kapiert, dann ist das nicht schlimm“
- Testverlauf:
 - Annahme einer alltäglichen Begebenheit
 - Aufstellung von 4 logischen Bedingungen
 - Überprüfung im Experiment
- Wenn der Test erfolgreich: Alltagserklärung, Determinismus
- Wenn Test scheitert: Keine Erklärung mehr verfügbar

3.2 Verschränkung

Test der Alltagserklärung im Experiment: Rollenspiel

- 2 Schüler
 - Treffen sich in Umkleide: Hut und/oder Schuhe nach Regeln
 - Laufen in 2 getrennte Kleidungsmessgeräte (Alice, Bob)
 - Werden dort von Alice bzw. Bob unabhängig voneinander gemessen (Ergebnis wird in Liste eingetragen)



Messergebnis Alice				
Person	Messung	Eigenschaft	Ja	Nein
1	Unten	Schuhe		X
2	Oben	Hut	X	
3	Oben	Hut	X	
4	Unten	Schuhe		X
5	Oben	Hut	X	
6	Unten	Schuhe	X	
7				
8				
9				

3.2 Verschränkung

Ankleideregeln in Umkleide / Messergebnis Alice, Bob:

Regel 1: Alice misst oben und Bob misst oben:

9% aller Personenpaare tragen beide einen **Hut**.

Regel 2: Alice misst oben und Bob misst unten:

Immer wenn die Person bei Alice einen **Hut** trägt, hat die Person bei Bob **Schuhe** an.

Regel 3: Bob misst oben und Alice misst unten:

Immer wenn die Person bei Bob einen **Hut** trägt, hat die Person bei Alice **Schuhe** an.

3.2 Verschränkung

Test der Alltagserklärung im Experiment:

Vermutung Regel 4:

Alice misst unten und Bob misst unten:

mind. 9% aller Personenpaare haben beide **Schuhe** an.

Wie kommt man auf die Vermutung?

Logik aus Regeln 1-3 ([Animation auf Homepage](#))

3.2 Verschränkung

Überprüfung der 4 Regeln im Experiment

Übertragung auf Experiment:

Schüler = Photonen

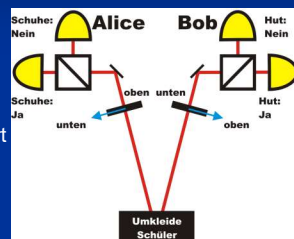
Türe oben = Dreher rechts

Türe unten = Dreher links

Ja = Det. Transmittiert

Nein = Det. Reflektiert

[Experiment](#) auf der Homepage



3.2 Verschränkung

Überprüfung der 4 Regeln im Experiment

Folgerung:

■ Absoluter Widerspruch

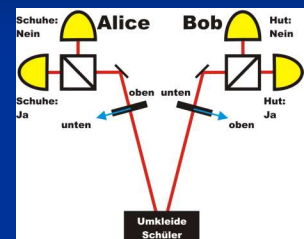
Regel 1, 2, 3 erfüllt

Regel 4 nicht erfüllt

■ Verhalten nicht erklärbar

mit menschlichem Verstand

■ Existenz einer Fernwirkung / Telepathie



3. Experimente für Schule und Universität

3. 1 Quantenzufall

3. 2 Verschränkung und Nichtlokalität

3.3 Quantenkryptographie

3.4 Interferenz

3.5 Weitere Experimente

29

3.3 Quantenkryptographie

One-Time-Pad:

Alice $\xrightarrow{\text{Eve}}$ Bob

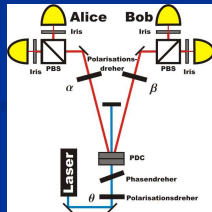
Nachricht		\nearrow	Ergebnis	
+ Schlüssel			+ Schlüssel	
<hr/>			<hr/>	
Ergebnis			Nachricht	

Verfahren von G. Vernan (1918) – [binär](#) auf der Homepage

3.3 Quantenkryptographie

Ekert-Protokoll: Einfachste Erklärung im Klassenzimmer

- Problem: Schlüsselerzeugung
Schlüsselverteilung
- Lösung mit verschränkten Photonen
Alice und Bob erhalten zufälligen
aber gleichen Schlüssel
- Test auf Nichtlokalität (CHSH):
Spion würde sofort entdeckt werden
- 100% sichere Schlüsselerzeugung



31

3.3 Quantenkryptographie

BB84-Protokoll: Analogieexperiment mit hellen Lichtpulsen



Erlanger Schülerlabor zur Quantenphysik

3.3 Quantenkryptographie

Weiterentwicklung der Firma Thorlabs (3.500 €):



Experiment ist im Foyer aufgebaut:
Bitte experimentieren Sie!

33

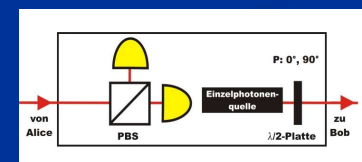
3.3 Quantenkryptographie

BB84-Protokoll: Vorgehen mit Experiment im Unterricht:

- Ein Photon,
zwei Winkel:

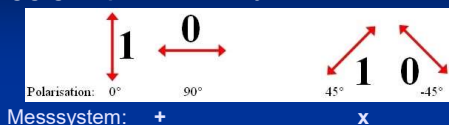


- Kann Lauscher
Schlüssel abfangen?



3.3 Quantenkryptographie

Lösung gegen Spione: 2 Messsysteme

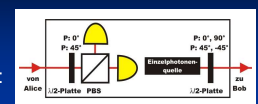


- Absolut Zufällig Wahl der Messsysteme
- Gleiches Messsystem (+, + oder x, x): Ergebnisse eindeutig
- Verschiedenes Messsystem (+, x oder x, +): Ergebnisse zufällig

3.3 Quantenkryptographie

Hat ein Spion eine Chance?

- Eve rüstet auf 2 Messsysteme auf:
- Eve fügt 25% Fehler in eindeutige Messergebnisse ein



Basis Alice = Basis Bob	Basis Eve	Sender Eve	Empfang Bob	Übereinstimmung der Bits bei Alice und Bob
++	+	1 oder 0 in +	Eindeutig	100%
++	x	1 oder 0 in x	Zufall	50%
xx	+	1 oder 0 in +	Zufall	50%
xx	x	1 oder 0 in x	Eindeutig	100%

- Eve anwesend? Test von einigen Bits gleicher Basen
- Eigene Erarbeitung durch Schüler: www.QuantumLab.de

3.3 Quantenkryptographie

Projektarbeit: Quantenkryptographie BB84



37

3. Experimente für Schule und Universität

3.1 Quantenzufall

3.2 Verschränkung und Nichtlokalität

3.3 Quantenkryptographie

3.4 Interferenz

3.5 Weitere Experimente

38

3.4 Interferenz

Analogie-Experiment der Firma Thorlabs (2.000 €)

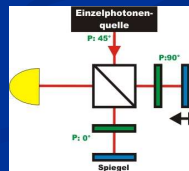
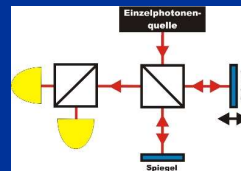
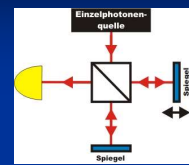
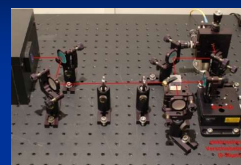


Experiment ist im Foyer aufgebaut:
Bitte experimentieren Sie!

39

3.4 Interferenz

Einzelphotonen-Interferenz im Michelson- Interferometer:



40

3. Experimente für Schule und Universität

3.1 Quantenzufall

3.2 Verschränkung und Nichtlokalität

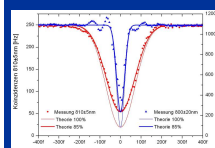
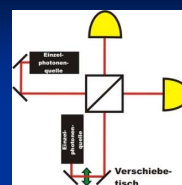
3.3 Quantenkryptographie

3.4 Interferenz

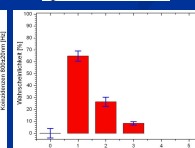
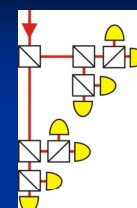
3.5 Weitere Experimente

41

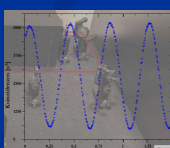
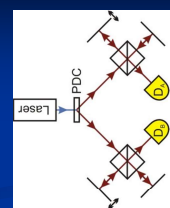
3.5 Weitere Experimente



Hong-Ou-Mandel



Messung Photonenstatistik



Franson-Interferenz

Übersicht

1. Einführung in das Konzept
2. Präparation eines Photons
3. Experimente für Schule und Universität
- 4. Beispiele aus dem Physikunterricht**
5. Ausblick

43

4. Beispiele aus dem Unterricht

Quantenphysik und Weltbild:



© Thorsten Thees

© Fotolia.com

44

4. Beispiele aus dem Unterricht

Lernzirkel: "Und er würfelt doch!"

- Station 1: Zufallszahlen durch Münzwurf
- Station 2: Zufallszahlen mit dem Computer
- Station 3: Zufallszahlen durch einzelne Photonen
- Station 4: Quantenmusik nach Mozart
- Station 5: Verschlüsselung von Daten
- Station 6: Quantenkryptographie und Verschränkung
- Station 7-9: Diskussion: Theologie / Weltbild / Philosophie

Download: <http://primas.ph-freiburg.de/Lernzirkel.zip>

45

4. Beispiele aus dem Unterricht

Imagefilm zum Konzept der Joachim Herz Stiftung:



<https://youtu.be/4zB7WNNzTCI>

46

4. Beispiele aus dem Unterricht

Schülerrückmeldung: Methode Lerntagebuch

Welche Fragen bleiben offen?

Was haben Quantenobjekte, dass sie dazu im Stande sein können mein Weltbild zu verändern?

Welche Fragen bleiben offen?

Wo sind die kleinen grünen Männchen die bestimmen in welche Richtung das Photon abgelenkt wird?
Oder haben sie einen eigenen Willen?

47

4. Beispiele aus dem Unterricht

Abschlussbericht Meine Quantenwelt

Meiner Meinung nach ist das Thema gut geeignet für den Physikunterricht der Klasse, es ist aber sehr schwer zu verstehen, dass man es eigentlich nicht verstehen kann. Um das zu begreifen braucht man, denke ich, viel Zeit. Dennoch war diese Unterrichts einheit ziemlich interessant.

48

Übersicht

1. Einführung in das Konzept
2. Präparation eines Photons
3. Experimente für Schule und Universität
4. Beispiele aus dem Physikunterricht

5. Ausblick

49

5. Ausblick

Quantenphysik im neuen Bildungsplan BW 2016:

Die Schülerinnen und Schüler können	
(1) Gemeinsamkeiten und Unterschiede des Verhaltens von klassischen Wellen, klassischen Teilchen und Quantenobjekten am Doppelspalt beschreiben	
(2) erläutern, wie für Quantenobjekte der Determinismus der klassischen Physik durch Wahrscheinlichkeitsaussagen ersetzt wird	
(3) Experimente zur Interferenz einzelner Quantenobjekte anhand von Wahrscheinlichkeitsaussagen beschreiben und den Ausgang der Experimente erklären	
(4) beschreiben, dass Quantenobjekte zwar stets Wellen- und Teilcheneigenschaften aufweisen, sich diese aber nicht unabhängig voneinander beobachten lassen. Sie können dies anhand der Interferenzfähigkeit und der Welcher-Weg-Information bei einzelnen Quantenobjekten erläutern (zum Beispiel Doppelspalt, Mach-Zehnder-Interferometer)	
2.1 Erkenntnisgewinnung 11	
2.2 Bewertung 4	
3.4.3 Schwingungen	
3.4.4 Wellen	
3.4.5 Wellenoptik	
M 3.3.5 Leertexte Daten und Zufall	
(5) den lichtelektrischen Effekt beschreiben und anhand der Einstein'schen Lichtquantenhypothese erklären (Hallwachs-Effekt, Einstein'sche Gleichung $E_{\text{kin, max}} = h \cdot f - E_A$, Planck'sche Konstante h)	
2.3 Bewertung 4, 11	
(6) erläutern, wie sich Quantenobjekte anhand ihrer Energie und anhand ihres Impulses beschreiben lassen ($E_{\text{kin}} = h \cdot f$, $p = \frac{h}{\lambda}$, de Broglie-Wellenlänge von Materiewellen)	

50

5. Ausblick

Abschaltung der Homepage QuantumLab:

- Interaktive Experimente: Programmierung 2009 mit Flash.
- Internetbrowser wie Safari, Chrome, Explorer ... unterstützen seit 2016 kein Flash mehr.
- Firefox stellt das Flash-Plugin 2017 ein.

→ Das Ende von QuantumLab gegen Ende des Jahres 2017!

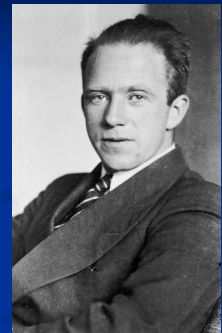
- Rettung von QuantumLab: Umprogrammierung auf HTML5
- Relaunch der Homepage mit modernem Design und schulspezifischeren Inhalten
- Dazu notwendig: Informatiker und Finanzierung!

51

5. Ausblick

"Ich [...] wiederholte ich immer und immer wieder die Frage, ob die Natur wirklich so absurd sein könne, wie sie uns in diesen Atomexperimenten erschien."

(Werner Heisenberg)



52

Danke für Ihre Aufmerksamkeit !

www.QuantumLab.de

bronner@fg-freiburg.de

Projektförderung:

Robert Bosch Stiftung

