



# Das Erlanger Konzept zur Quantenphysik

Jan-Peter Meyn

jan-peter.meyn@physik.uni-erlangen.de

1. Motivation: Physik des 21. Jahrhunderts
2. Moderner Physikunterricht mit Quanten
3. Das Photon als Quantenobjekt
4. Quantenphysik kommt aus der Optik
5. Folgerungen für den Unterricht

KOPFER® STÄLLEN

**TÄGLICH FAHREN WIR 27 MIO. MENSCHEN.  
UND JEDEN, WOHIN ER WILL – ODER MUSS.**



# Moderne Physik im Unterricht

- Aktuelle Themen fördern das Interesse
  - ...und damit den Lernerfolg

- Themen in den Medien

- Energie
- Medizin
- Kosmologie
- Quantencomputer



- Die Physik des 21. Jhd. ist zu selten Gegenstand des PU

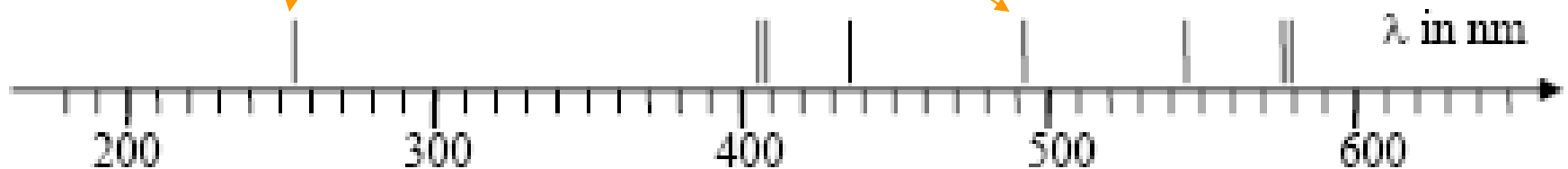
# Rückblick: Bayerische Abituraufgabe

- These  
*Abituraufgaben spiegeln wesentliche Unterrichtsinhalte wieder*
- Ein Beispiel für viele in Bayern, vermutlich auch anderswo

# Spektralanalyse (Abitur 2006)

Im Rahmen des **Experimental-Praktikums** soll das Emissionsspektrum einer Quecksilberdampf Lampe untersucht werden.

- Skizzieren Sie einen geeigneten Versuchsaufbau. Womit können Spektrallinien im nahen UV-Bereich visuell nachgewiesen werden?
- Die folgende Abbildung zeigt schematisch das mit einem Prisma erzeugte Spektrum einer Quecksilberdampf Lampe. Ordnen Sie den Spektrallinien die Farben blau, **blaugrün**, gelb, grün oder violett zu, bzw. geben Sie an, ob sie dem **UV**-Bereich angehören.



# Moderne Themen

# Aktuelle Vorschläge zur Quantenphysik

- F. Bader: Eine Quantenwelt ohne Dualismus, 1996
  - Simulationsprogramme mit Anleitung
- Münchner Unterrichtskonzept zur Quantenmechanik [Müller und Wiesner, z.B. Am. J. Phys **70**, 200 (2002)]
  - Einbindung in Fortbildungsprogramm milq, ISB Handreichung, etc.
- J. Küblbeck, R. Müller: Die Wesenszüge der Quantenphysik, 2002
  - Theoretische Grundlagen und Beschreibung moderner Experimente
- ...viele Simulationen, **keine neuen Experimente**

# Kanonische Experimente zur QM

1. Öltröpfchenversuch [Millikan 1911]
  2. Franck-Hertz-Versuch [1914]
  3. Photoeffekt mit K-Zelle [Millikan 1916]
  4. Compton-Effekt [1923]
  5. ggf: Quantenradierer [J. Küblbeck, PdN-Ph, 8/49, 22 (2000)]
- Begriff des Photons wird benutzt, aber nicht authentisch motiviert
    - Interpretation 3-5: Licht als elektromagnetische Welle [Schrödinger 1927, Mandel et al. 1964, Dodd 1983, ...]



# Experimente mit einzelnen Quanten

- Atom
  - Innere Freiheitsgrade, Falle möglich, Ofen + Hochvakuum notwendig
- Elektron
  - Leicht herstellbar, lokalisierbar (Falle), Hochvakuum notwendig, Manipulation mit e/m Feldern
- Photon
  - Leicht herstellbar, Manipulation mit Schulwissen Optik in normaler Umgebung

# Argumente für die Physik des Photons

- Experimente sind in der Schule „prinzipiell realisierbar“
  - Kosten < 1 Jahresgehalt Physiklehrer, kein extra Raum notwendig
  - Versuchsanordnungen sind leicht verständlich

# Argumente gegen die Mechanik

„Surrile“ Quantenwelt = Unvereinbarkeit mit mechanischem Weltbild

## ■ Materiewellen

- Young'scher Doppelspaltversuch für Elektronen
- Welle-Teilchen Dualismus
- „Welcher Weg“ Experimente

## ■ Nichtlokalität

- Einstein-Podolsky-Rosen „Paradoxon“  
(Dekohärenz vs. Informationstransport)

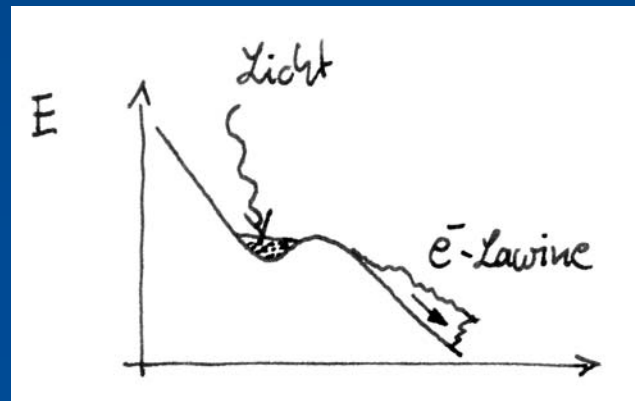
# Folgerungen

- Moderner Unterricht braucht moderne Experimente
- Optik ist grundlegend für die Quantenphysik
- Mechanische Begriffe führen zu Konflikten
  
- Photon: ein gutes Beispiel für Quantenobjek
  
- Literatur
  - Greenstein and Zajonc: *The quantum challenge*, 2003
  - Audretsch: *Die sonderbare Welt der Quanten*, 2008

# Was ist ein Photon?

# Schwaches Licht vs. Photonen

- Empfänger für schwaches Licht
  - Auge und photographischer Film sind zu unempfindlich
  - Prinzip: System im metastabilen Zustand wird ausgelöst
    - Photomultiplier
    - Avalanche Photo Diode
  - Auslösung erzeugt makroskopisches Signal: „Klick“
- „Klick“ ist kein Nachweis der Quantisierung des Lichts!
  - Klassisches Modell: Licht hebt das metastabile System über den Potentialwall

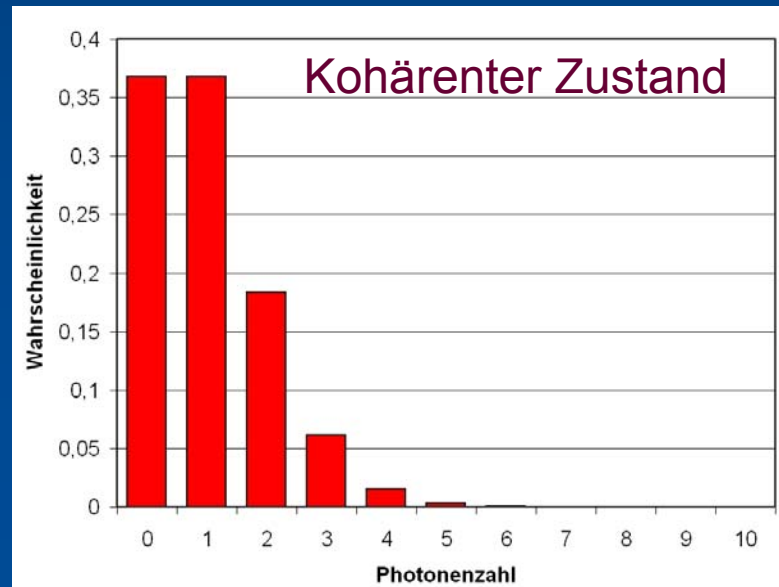


# Schwaches Licht am binären Detektor

- Erwartetes Signal bei elektromagnetischer Welle

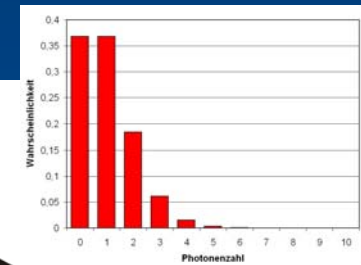
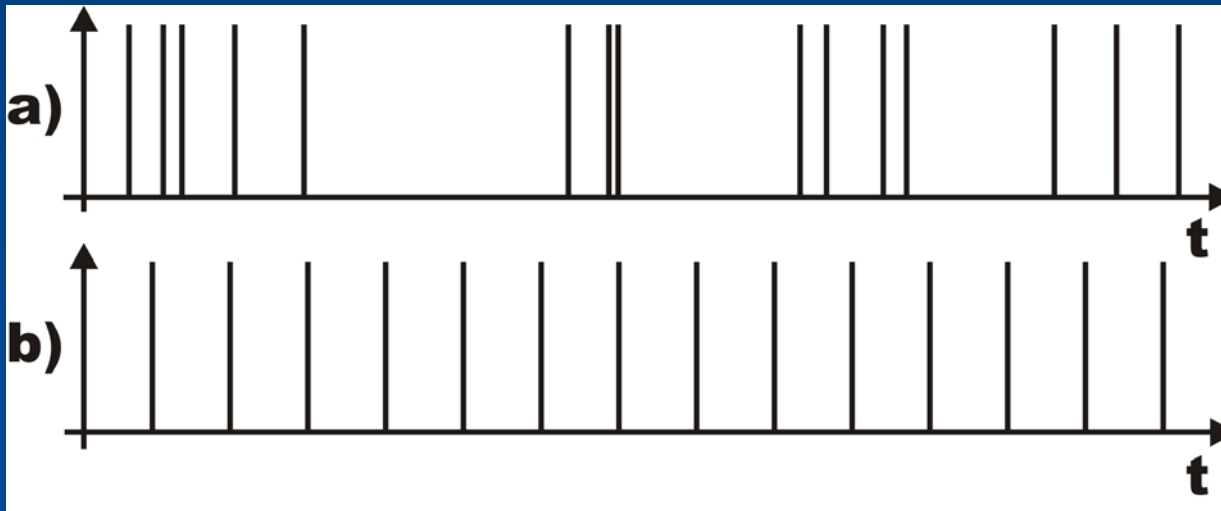


- Wahre Aussage: Photon wird absorbiert → click
- Falsche Aussage: click → Licht besteht aus einzelnen Photonen†



# Einzelne Photonen

- Schwaches Laserlicht (e/m Welle, coherent state)
- Ein-Photon-Zustand (number state oder Fock state)
  - Zu jedem Zeitpunkt  $t_n$  ist genau ein Photon vorhanden
  - Nicht-klassisches Licht

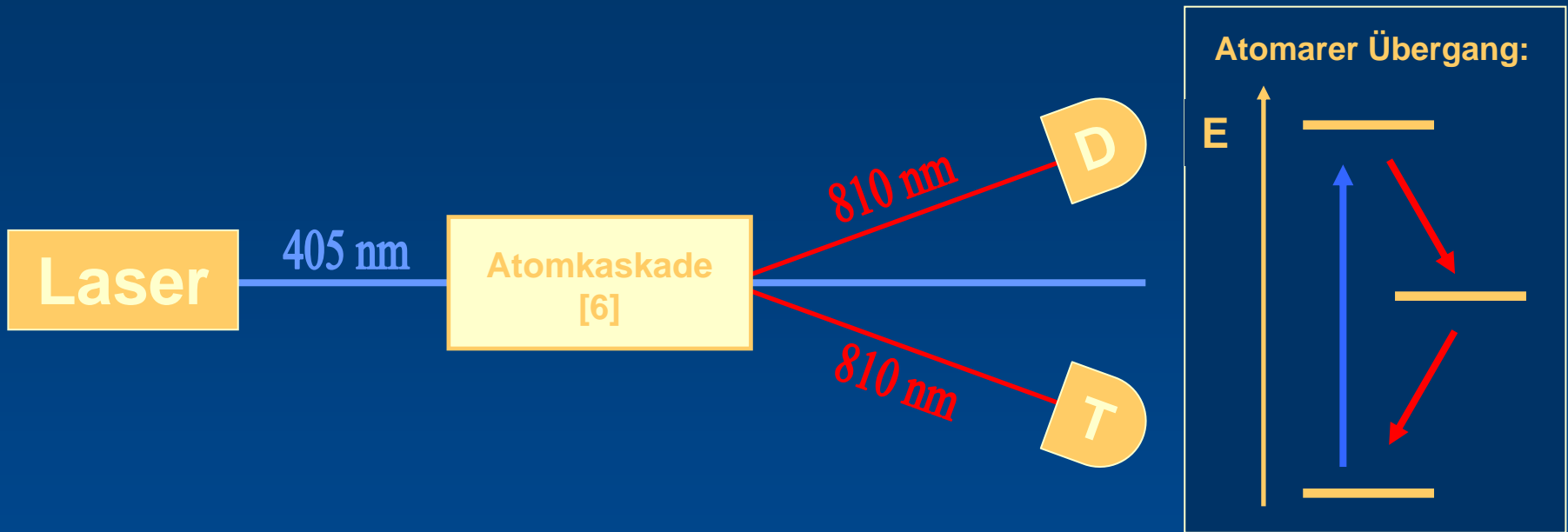




# Photonen auf Bestellung

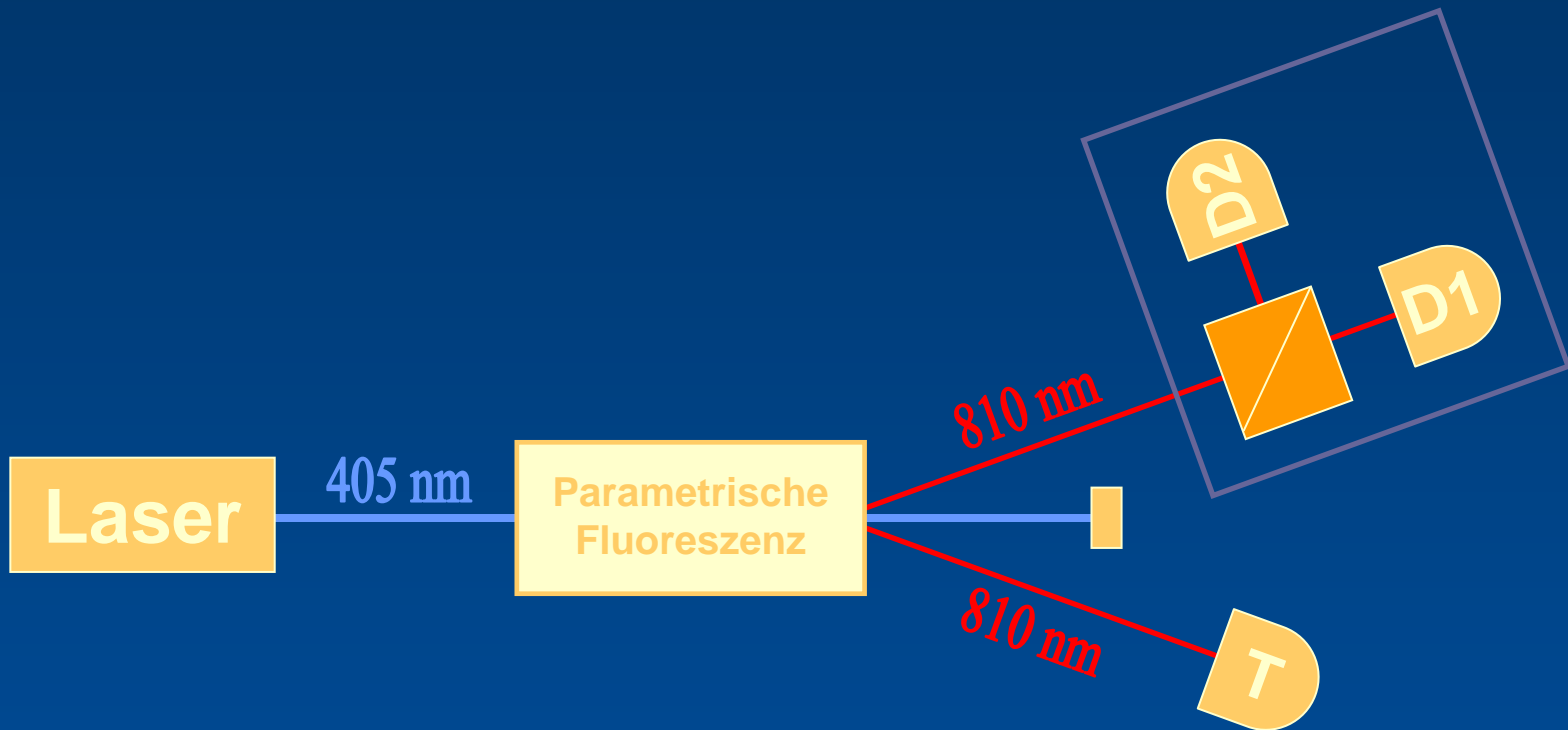
- Aktuelle Forschungsgebiet
- Alternative: Angekündigte Photonen
  - Stochastisches Auftreten in der Zeit
  - Bestimme Zeitpunkt
  - Ersetze Zeitachse durch Ereignisachse
  - Jedes Ereignis ist ein Ein-Photon-Ereignis

# Angekündigte Photonen



Parametrische Fluoreszenz: Photonenpaar durch nichtlineare Wechselwirkung.

# Einzelne Photonen am Strahlteiler



- Experimentelle Beobachtung: Entweder D1 oder D2 wird ausgelöst.
- Angekündigtes Licht ist nur in wohl definierter Portion sichtbar
  - Das Photon existiert als unteilbares Quantum

# Intensitätskorrelation

Glühlampenlicht	$g^{(2)}(0) = 2$
Laserlicht	$g^{(2)}(0) = 1$
Nicht-klassisches Licht	$g^{(2)}(0) < 1$
Experimentell erreichbar	$g^{(2)}(0) < 0,001$

[J. Thorn, et al., Observing the quantum behavior of light..., Am. J. Phys. 72, (2004)]

# Photonen sind...

- Photonen sind Objekte der Quantenelektrodynamik
  - ...und nicht der Quanten*mechanik*
- Herstellung außerhalb des Formalismus der nichtrelativist. QM
  - Spontane Emission
  - Parametrische Fluoreszenz
- Für Photonen gibt es kein sinnvolles mechanisches Modell

[R. Kidd, J. Arduini and A. Anton, Am. J. Phys. 57(1) 27-35 (1989)]

[W. E. Lamb: *Anti-Photon*, Appl. Phys. B **60**, 77-84 (1995)]

# Photon ist kein Teilchen

- ...denn
  - Alle Gesetze der Optik gelten auch für nichtklassisches Licht
    - Ersetze Intensitätsverhältnisse durch Sichtbarkeitswahrscheinlichkeit
    - Gleichzeitige Beobachtung von Interferenz und Unteilbarkeit
  - Quantisierung nur in der Menge, nicht im Ort
- Scheinbare Körnigkeit entsteht durch Messvorgang
  - Detektion im ortsauflösenden Detektor
  - Erklärung durch Zufallsprozess ausreichend (Simulation)
  - Weitergehende Erklärung: Dekohärenz

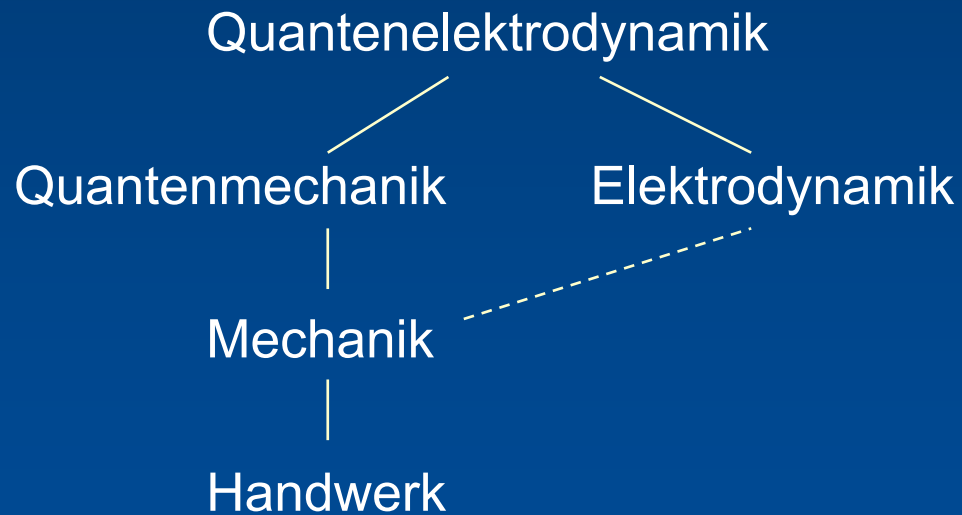
# Gibt es Teilchen?

- Lichtartiges Verhalten von impulsarmen Objekten
  - Elektronen, Neutronen, C60-Moleküle am Doppelspalt
  - Frage nach dem Weg ist sinnlos
  - Analogie zum Licht ist vollständig
- Körnigkeit der Materie ist nur in der Menge feststellbar
  - Elektronen lassen sich nicht greifen im Sinne des Handwerks
  - Atome in Falle:  $\Delta x \cdot \Delta p = \hbar/2$  im vibr. Grundzustand:  
→ große Ausdehnung in flachem Potential (→ BEC)
- Vgl. [Art Hobson, The Physics Teacher **45**, 96-99 (2007)]

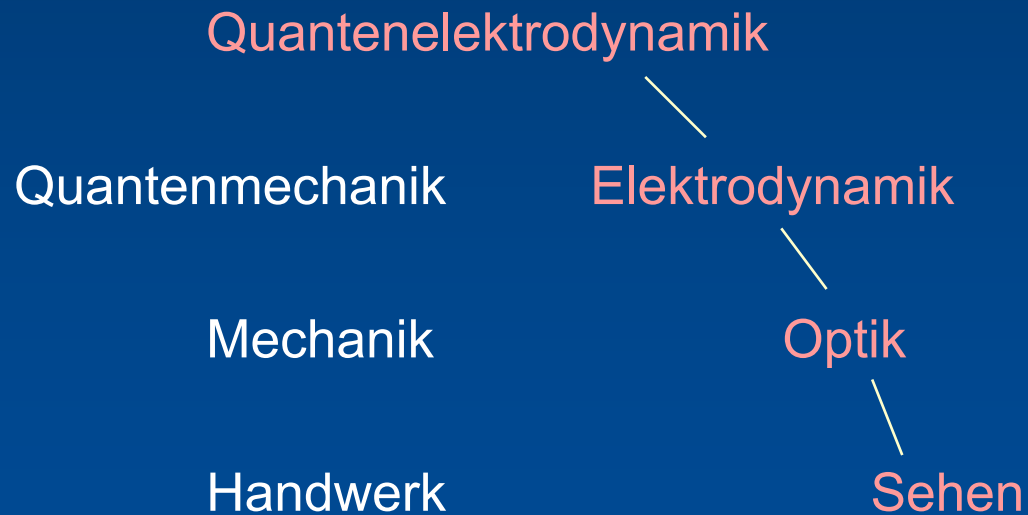
# Alternatives Curriculum



# Kanonischer Aufbau der Physik



# Ein anderer Weg in die Physik



# QED vs. QM

- Spontane Reaktion: QED ist zu schwer
  - Feynman-Konzept ist mindestens „akzeptiert“
  - Wesenszüge der Quanten sind in beiden Fällen gleich
  - Mathematischer Formalismus ist entbehrlich
  - Optik und Mechanik sind gleichwertige Grundlagen
- Aktuelle Themen werden durch Feldtheorien beschrieben
  - Frühes Universum
  - LHC
  - Quantenkryptographie

# Quantenphysik im Unterricht

# Möglichkeiten der Einführung

## ■ Historisch

- Mechanik der kleinen Teilchen
- Planck, Bohr, ...
- Konventioneller Unterricht
- Erfahrungsgemäß ohne die letzten 80 Jahre

## ■ Erläuterung der Theorie

- Feynman: QED – the strange theory of light and matter
- Zeigerformalismus
- Vorbild für viele Unterrichtsvorschläge, z.B. [Bader 1996, Werner 2000]
- Klassische Physik ist Spezialfall der QED

## ■ Phänomen-orientiert

- Reale Experimente nehmen zentrale Rolle ein
- Quanteneffekte sind Abweichung von der klassischen Welt

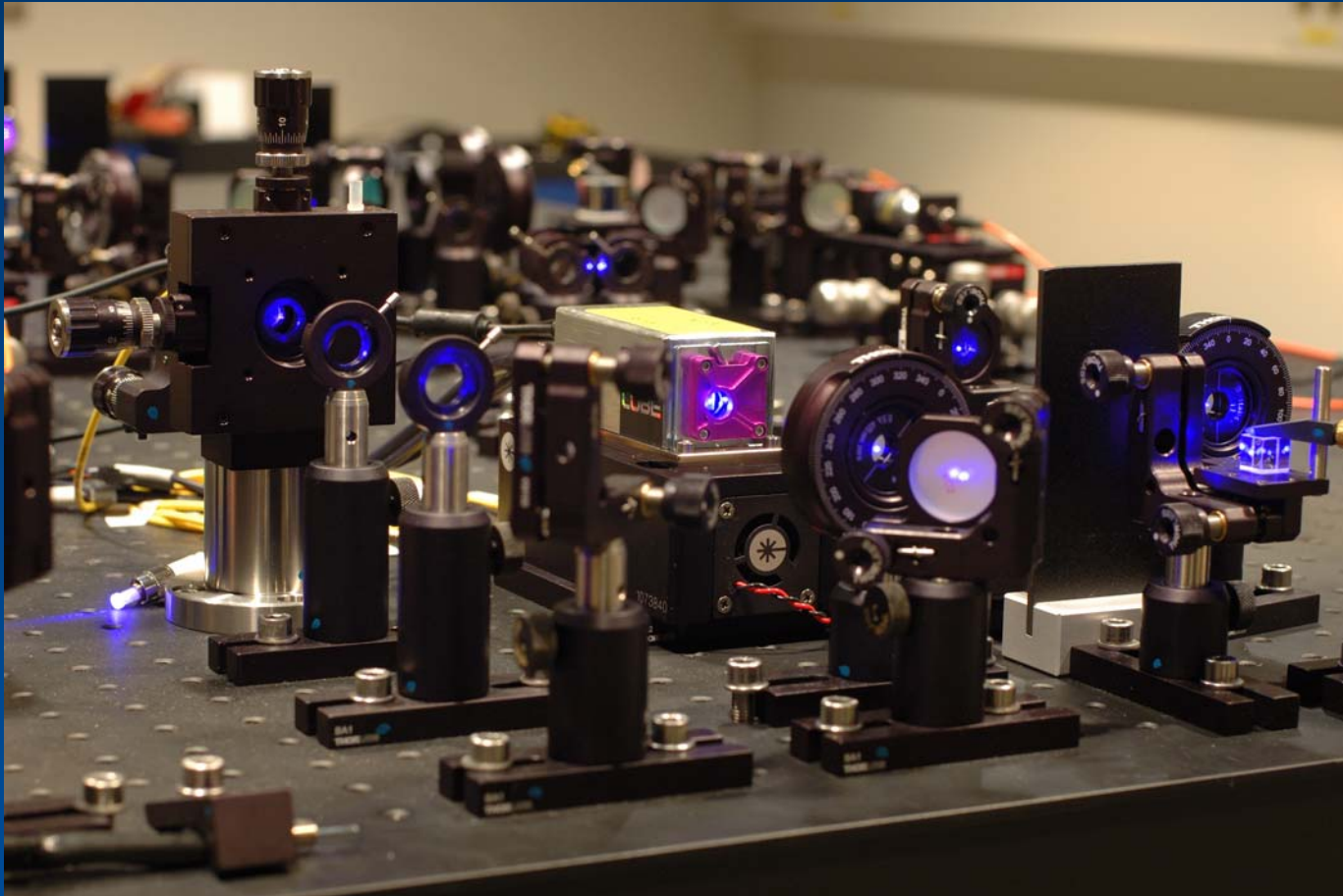
# Erlanger Konzept zur Quantenoptik

- Experimente leiten durch das Curriculum
  - Quantenphänomene im Experiment entdecken
  - Theoretische Vorhersagen (qualitativ) überprüfen
  - Wissenschaftliche Methoden exemplarisch zeigen
- Funktion der Experimente steht im Vordergrund
  - Erscheinung vs. Präparation einer Erscheinung
  - Enge Kopplung an wissenschaftlichen Fortschritt
- Photonen: spezifische Quanteneigenschaften des Lichts
  - Interferenz ist klassische Eigenschaft
- Geeignet für 12. Klasse, manches auch für die 10. Klasse

# Nutzung des technologischen Fortschritt

- UV-Laser ist Grundlage moderner QO-Experimente
- z.B. Coherent Innova 300
  - 46kg + 40kg Netzteil
  - 1,20m lang
  - 10l/min Kühlwasser
  - 32kW elektrische Leistung
  - Ca. k€ 100
- Seit 1999 verfügbar: Diodenlaser 405nm
  - < 1kg
  - Faustgroß
  - < 10 W Anschlussleistung
  - Geringere Gefahr für die Haut (405nm statt 361nm)
  - Ca. k€ 10

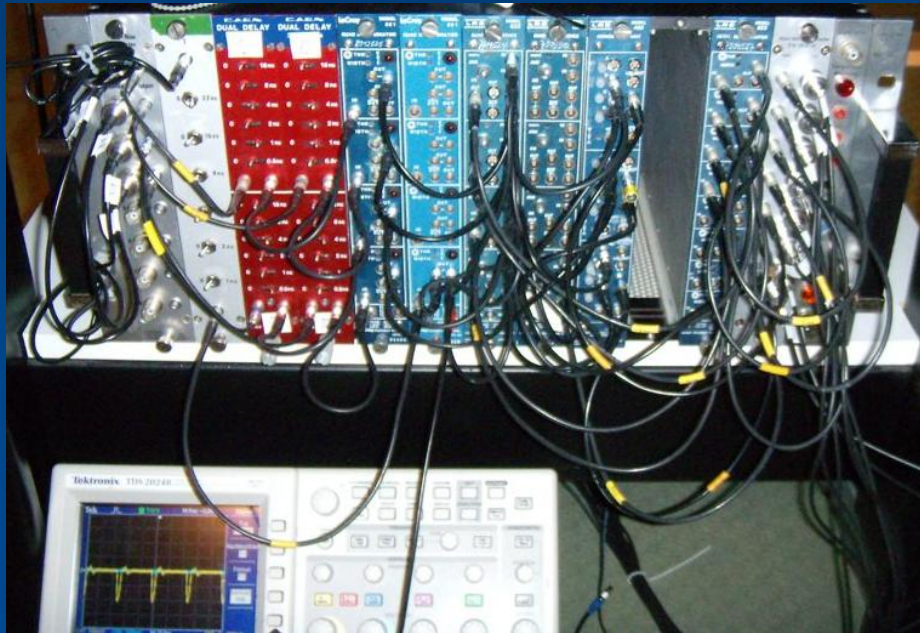
# Erlangen Quantenoptik-Labor





# Auswertung qo. Experimente

Datenaufnahme an Avalanche-Photo-Diodes (APD)



Datenrate: bis 200 kBit/s



Zulassungsarbeit  
Andreas Strunz

Datenrate: 3 kBit/s

# Interaktive Bildschirmexperimente

# Übergang Klassisch-Quanten

# Übergang klassisch → Quanten

## ■ Klassische Optik

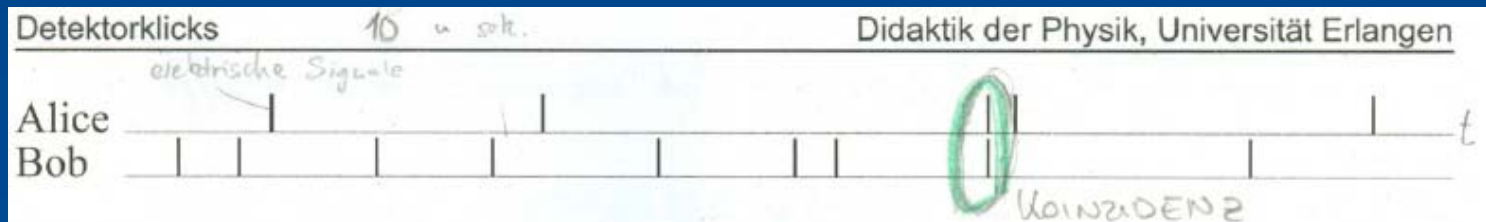
- Geometrische Beziehungen
- Nichtlokalität
  - Entfernte Objekte bestimmen Orientierung im Raum
  - Alle Teile der Linse tragen gleichermaßen zum Bild bei
  - Einengung macht Beugung

## ■ Quanten-Optik

- Zeitliche Beziehungen: Koinzidenzmethode
- Nichtlokalität: Verschränkung

# Einführung des Begriffs: Photon

- 12. Klasse Waldorfschule
  - Modellfreie Optik: kein e/m Feld bekannt!
  - Geometrische Beziehungen und Nichtlokalität vertieft
- Motivation: APD als empfindliche Detektoren für Licht
- Schüleraktivität: Detektorsignale analysieren
  - Einzelsignale und dark-counts gehören dazu!



Gleichzeitige Ereignisse bei Alice und Bob nennt man

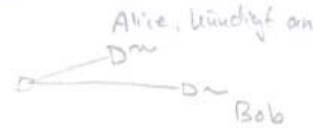
## KOINZIDENZEN

(Ordnung im Chaos =>)

Die Aufzählung der Koinzidenzen ist eine feste Ordnung  
(1. Koinzidenz, 2. Koinzidenz, ...)

Jede Koinzidenz nennen wir:

**PHOTON** - bei Alice, angezündigt durch  
Bob oder Photon bei Bob  
angezündigt bei Alice



Es entspricht nicht dem Wesen des Lichts zu sagen:

~~„Licht besteht aus Photonen“~~

Gute Aussage:

[Nadja Morgenstern]

Aus dem Licht können einzelne Photonen präpariert werden.

# Anschluss an den KPK

- Sek I
  - Lichtwege
  - Farben
- Sek II
  - (3) 4.15 Elementarportionen von Wellen
  - Aber: „Manchmal verhält sich Licht wie ein Strom kleiner in unregelmäßigen Abständen fliegender Körper“
- Vorschlag: Körper/Teilchen... ersatzlos streichen

# Ganz konkret...

- Unterrichtskonzept für K10 von Patrick Bronner
- Fortbildung mit Experimenten
  - 29.6 und 30.6.2009
  - Speziell für Referendare
  - Gemeinsam mit der Seminarkurs J. Küblbeck
  - Vorbereitung: [www.quantumlab.de](http://www.quantumlab.de)



# Zusammenfassung

- Physikunterricht: Authentisch, modern, mit Experimenten
- Quantenoptik erfüllt die Bedingungen
- Experimentelle Technik ist verfügbar
- Begriff: Nichtlokalität ist positive Eigenschaft
- Grenze K/Q: Zeitliche Beziehungen
- Unterrichtskonzepte in der Entwicklung

[www.quantumlab.de](http://www.quantumlab.de)



# Erlanger Konzept zur Quantenphysik

- Handwerk → Mechanik ~~Quantenmechanik~~
- Optik → Elektrodynamik → Quantenoptik
- Zeige Quantenobjekt als nicht-klassisches Objekt im Experiment
  - Experimente mit einzelnen Photonen (Fock-states)
- Begriffe und Methoden sind aufwärtskompatibel
- Anbindung an aktuelle Forschungsthemen möglich

**Optik**

**Mechanik**

*QED*

Quanten

*QM*

*ED*

Klassisch

*KM*

## Optik

*Photon  
am  
Doppelspalt*

## Mechanik

*Wellenpaket  
im  
Gravitationsfeld*

Quanten

*Beugung e/m  
Wellen am  
Doppelspalt*

Klassisch

*Freier Fall*

# Lehrplan zur Quantenphysik

- Grundlage: Optik
  - Licht als elektromagnetische Welle (alternativ: *Optik der Bilder*)
  - Beugung *oder* Interferenz
  - Polarisierung
- Detektoren für schwaches Licht
- Koinzidenzmethode: Präparation eines Photons
  - Grundaufbau per IBE oder Realexperiment
- Experimente mit einzelnen Photonen
  - Zufall am Strahlteiler
  - Doppelspalt oder Michelson: Licht bleibt Licht, trotz Portionierung
- Verschränkung
  - Optional für 12. Klasse, Schwerpunkt „Nichtlokalität“
- Materie kann sich wie Licht verhalten (alternativ zur Verschränkung)
- Ggf. innere Freiheitsgrade: Atom- und Molekülspektren

# m.E. unpassend sind

- Irreführende Simulationen
  - Geräusch und andere Show-Effekte
  - Lokalisierte Teilchen, Bahnen
- Behauptung „Licht besteht aus Photonen“
  - Auch: „Licht besteht aus Spektralfarben“, Widerspruch HOMI
- Transportmechanismen
  - Es kommt nur auf *Zeitpunkte* an
- Mechanische Modelle, insbesondere Massepunkt
  - sind schon in der Wärmelehre gescheitert...
- Schrödinger-Gleichung
- Begriffe: *Mechanik, Dualismus, Teilchen, Wellenfunktion*