

Moderner Physikunterricht auf dem unbeschriebenen Blatt

Jan-Peter Meyn
31.05.2024

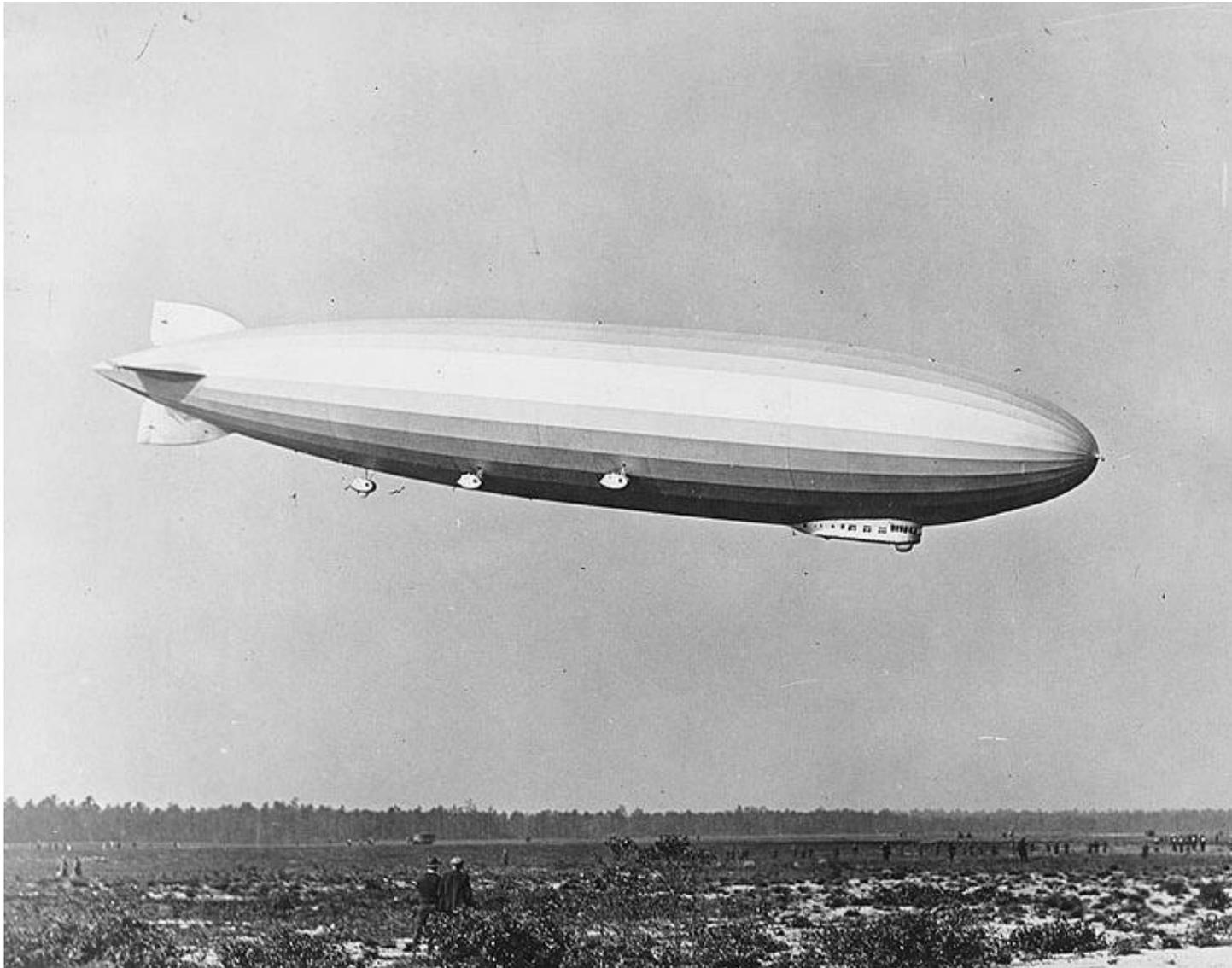


Friedrich-Alexander-Universität
Naturwissenschaftliche Fakultät



Was ist modern?

Modernes Reisen nach Amerika



Wikipedia,
U.S. Naval Historical Center NH 42024

Moderne Photographie



Wikipedia;
Urs Tillmanns,
ETH Zürich

Moderne Architektur

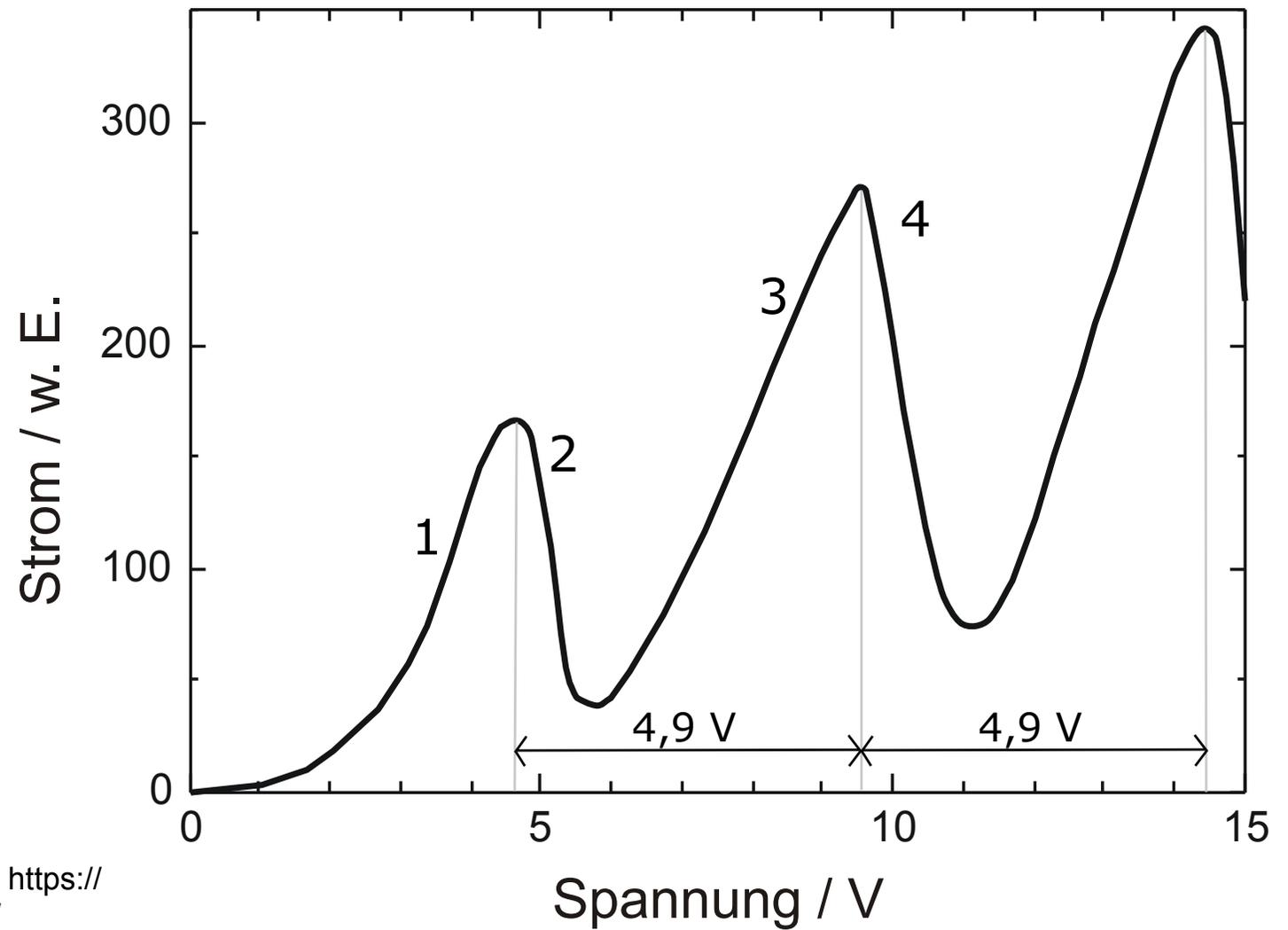
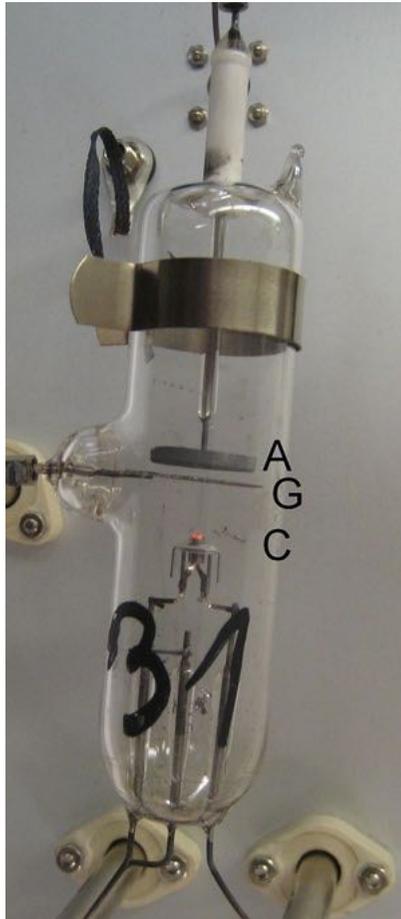


Wikipedia,
Marc Lauterbacher

Moderne Artillerie



Moderne Physik



E. A. Schiff, CC BY-SA 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=31897728>

Moderne Physik (PhysLab I)

Aufgrund der Corona-Pandemie bieten wir auch in diesem Jahr wieder anstatt eines Präsenzkurses mehrere Online-Kurse an.

Die "Moderne Physik" begann etwa um 1900, d. h. aus heutiger Sicht sind manche Themen schon ziemlich alt. Doch die Auswirkungen der Relativitätstheorie und der Quantenphysik waren gewaltig und die durch sie gewonnenen Erkenntnisse haben die heutige Computertechnik, die Lichtquelle "Laser" sowie unsere aktuellen Navigationssysteme überhaupt erst ermöglicht. Die technische Entwicklung auf Basis dieser Theorien geht immer weiter, insofern sind diese unverändert "modern".

Aktuell stehen bei uns folgende Online-Experimente zur Wahl, von denen jede/r eines pro Kurstag wählen kann: Photoeffekt, Franck-Hertz-Versuch sowie Radioaktivität

Außerdem informieren wir euch über das Studium der Physik (Mono-Physik und Lehramt-Physik) und geben kleine Einblicke in die Forschungsgebiete unseres Fachbereichs.

(Anm.: Die Kurse "Moderne Physik - PhysLab 1 bis 3" sind identisch - also bitte nur einen davon wählen!)

Kritik an „Moderner Physik“

Weltbild des 19. Jahrhundert

- Gut gemeint: Schüler im mechanischen Weltbild abholen
- *Quantenmechanik*
- Passt nicht zum Wesen der Quantenphysik
 - Ort, Impuls
 - Unschärfe, Dualismus
- Geräte sind oft original 1920er Jahre
 - Ausnahme: Messverstärker auf Operationsverstärker-Basis



Alt = schlecht ?

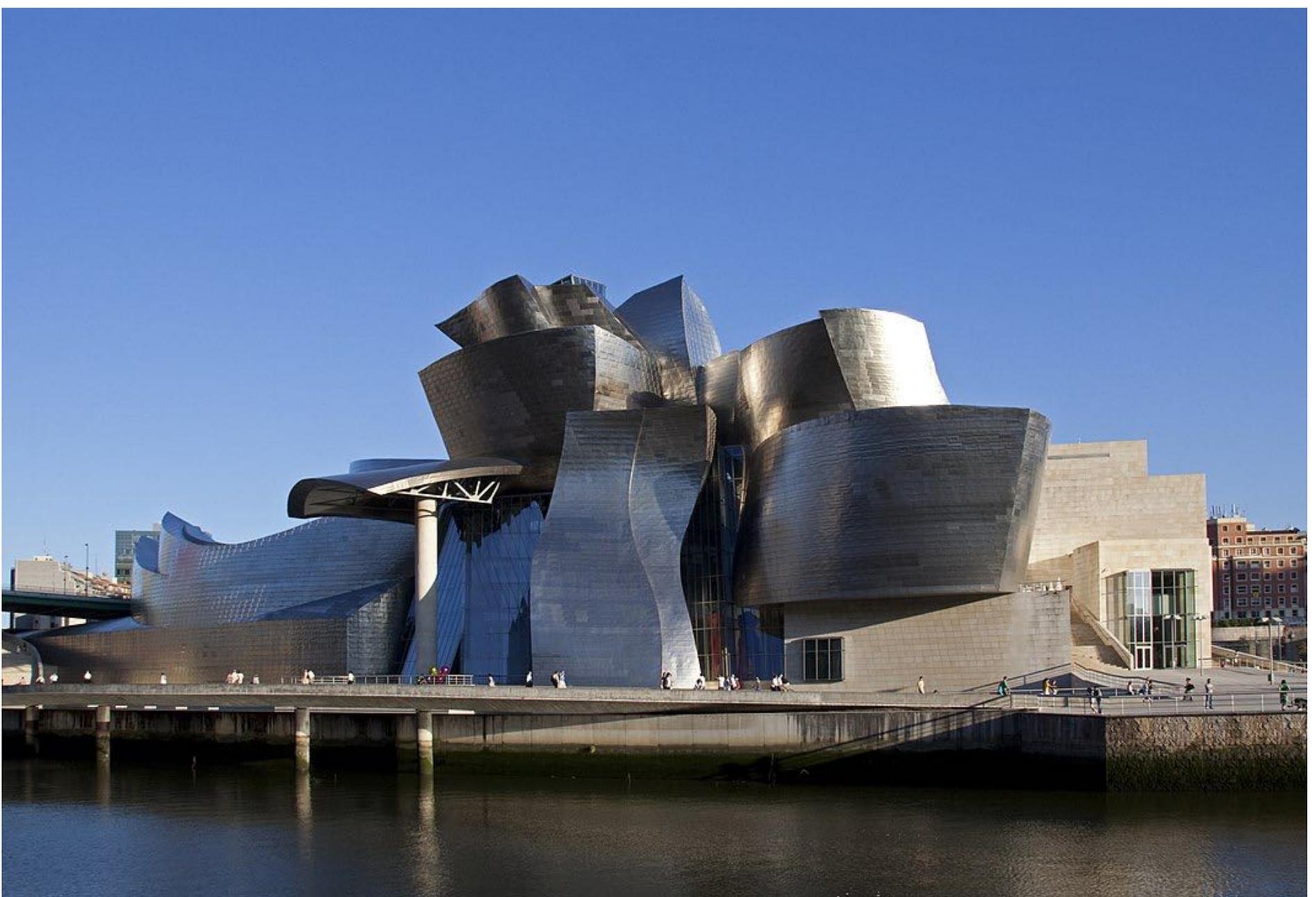
Begehrter Altbau im *Jugendstil*



Wegweisende Architektur 1926

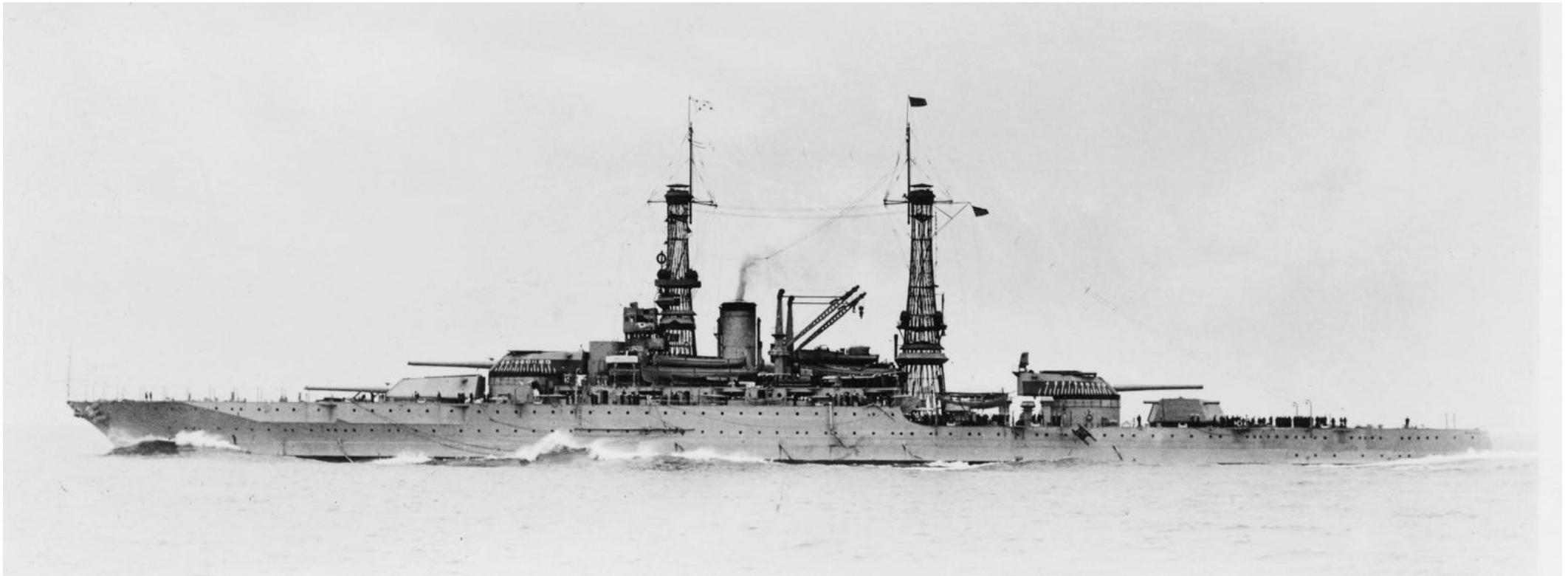


Wladyslaw, CC BY-SA 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=11830214>



Wegweisende Militärtechnik 1918

- Antrieb durch Elektromotoren 4 x 5200 kW
- Kühlanlage mit Kältemittel R 744 (CO₂)



[https://de.wikipedia.org/wiki/USS_New_Mexico_\(BB-40\)](https://de.wikipedia.org/wiki/USS_New_Mexico_(BB-40))



Wegweisende Physik im frühen 20. Jahrhundert

- Einstein 1905: Reale Quanten statt thermodynamischer Rechentrick
 - *Über einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichts betreffenden heuristischen Gesichtspunkt (s.u.)*
- Bohr 1913: Stationäre Zustände im Atom
 - Original-Arbeit: 70 Seiten Mathematik und Begriffe, aber keine Bilder
 - Graphik „Bohr’sches Atommodell“ ist Erfindung späterer Autoren
- Ehrung wegweisender Arbeiten mit Nobelpreis
 - Einstein 1921
 - Bohr 1922
 - Franck und Hertz 1925
 - Charles Édouard Guillaume 1920

Invar-Stahl

- Pendel-Uhren
- Laser-Resonatoren
- Laminierwerkzeug GFK



www.uhrenbausatz.de

Ersetze *moderne Physik* durch *wegweisende Physik*

- Historischen Kontext bewusst machen
- Bedeutung für aktuelle Wissenschaft und Technik
 - aktuell = Jahr 2022
- Begriffe aus der aktuellen Fachsprache
- Quantenphysik eignet sich prinzipiell sehr gut
 - aber: Lehrtradition ist verkorkst
- Entwicklung eines neuen Unterrichtskonzepts auf der **tabula rasa**

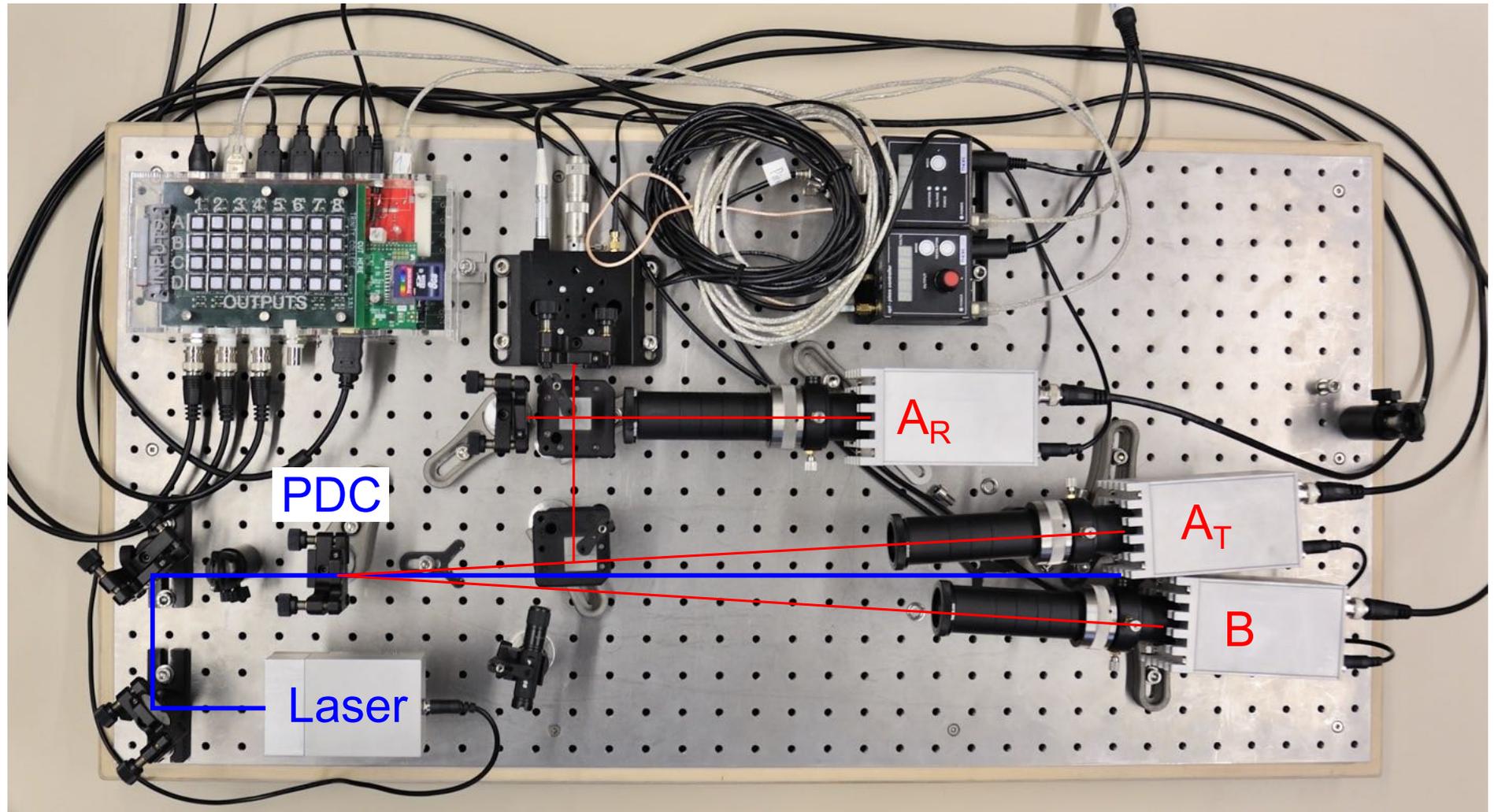


Quantenphysik als Quantenoptik



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
- Quantenexperimente sind in besonderem Maße theoriegeleitet
 - Kein Mangel, sondern Gelegenheit „Nature of Science“



Didaktische Rekonstruktion: Photon

- [Kattmann, et al., Zeitschrift für Didaktik der Physik 3(3) 3-18(1997)]
- Welche Genese, Funktion und Bedeutung haben die fachlichen Begriffe, und in welchem Kontext stehen sie jeweils?

[...]

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 60, 77-84 (1995)]

[Kidd/Ardini/Anton: Evolution of the modern Photon, Am. J. Phys. 1989]

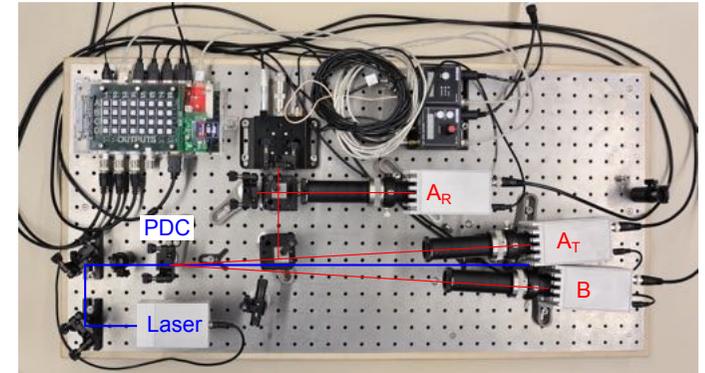
[Meyn: Zur Geschichte des Photons, PdN Nr. 1/62, S. 24-28 (2013)]



Skizze des Unterrichtskonzepts

Theoriegeleitetes Experiment

- Konzept Photon muss vor dem Aufbau bekannt sein
- Lehrervortrag zur Begründung des Experiments
 - Planck 1900 - schwarzer Strahler
 - Einstein 1905 - Elementarportion ist real
 - Bohr 1913 - stationärer Zustand
 - Heisenberg und Schrödinger 1926 - Formalismus
 - 1928...1974 Quantentheorie des Lichts, ohne Experiment
 - Clauser 1974 - erste Hinweise auf Lichtquanten
 - Grangier 1986 - typisches Exp. der jungen Quantenoptik
- Originalarbeit Grangier 1986 lesen



EUROPHYSICS LETTERS

15 February 1986

Europhys. Lett., 1 (4), pp. 173-179 (1986)

Experimental Evidence for a Photon Anticorrelation Effect on a Beam Splitter: A New Light on Single-Photon Interferences.

P. GRANGIER, G. ROGER and A. ASPECT (*)

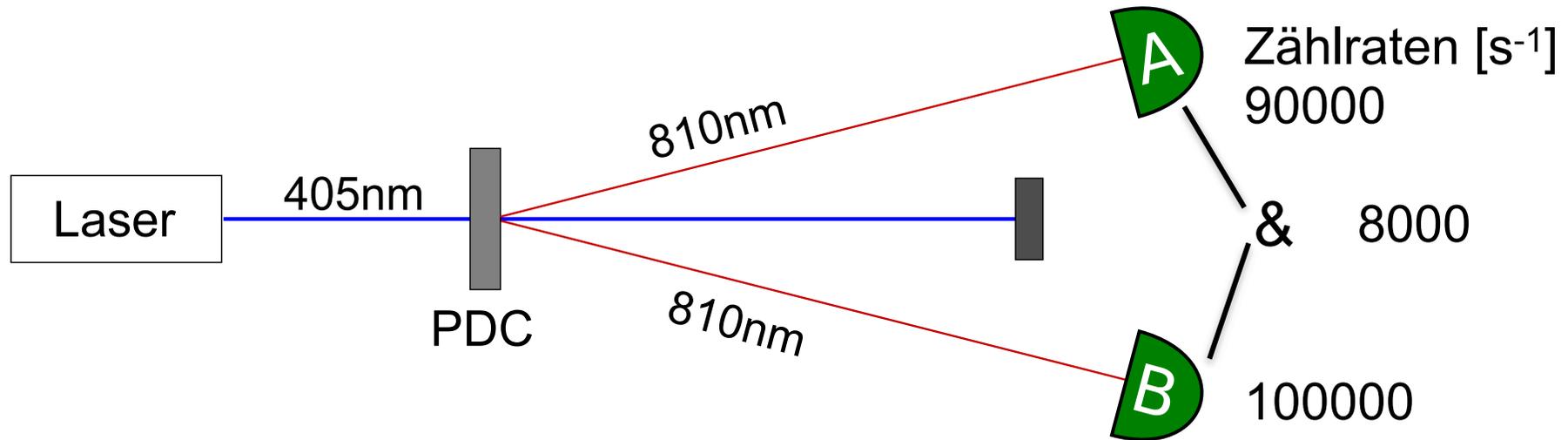
Institut d'Optique Théorique et Appliquée, B.P. 43 - F 91406 Orsay, France

(received 11 November 1985; accepted in final form 20 December 1985)

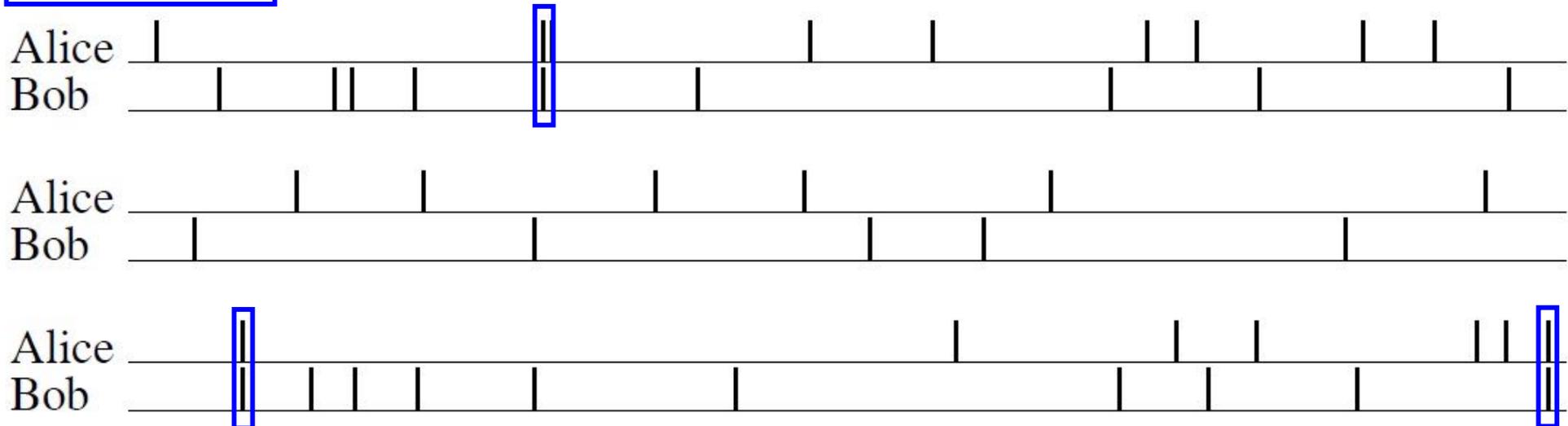
PACS. 42.10. – Propagation and transmission in homogeneous media.

PACS. 42.50. – Quantum optics.

Präparation einzelnes Photon im Sinne $|1\rangle$



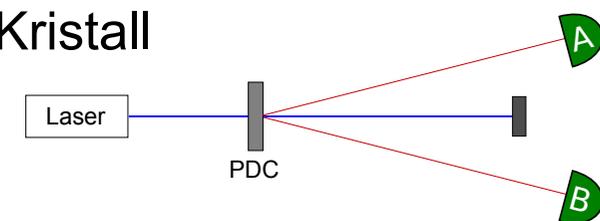
Koinzidenzen



Detektoren

- Avalanche Photo Diode (APD)
 - Lawinendetektor: macht Pulse, Zählrate \sim Intensität des Lichts
 - Detaillierte Erklärung, Analogie Schneelawine
 - Pulse sind technisch konstruiert, nicht: Natur

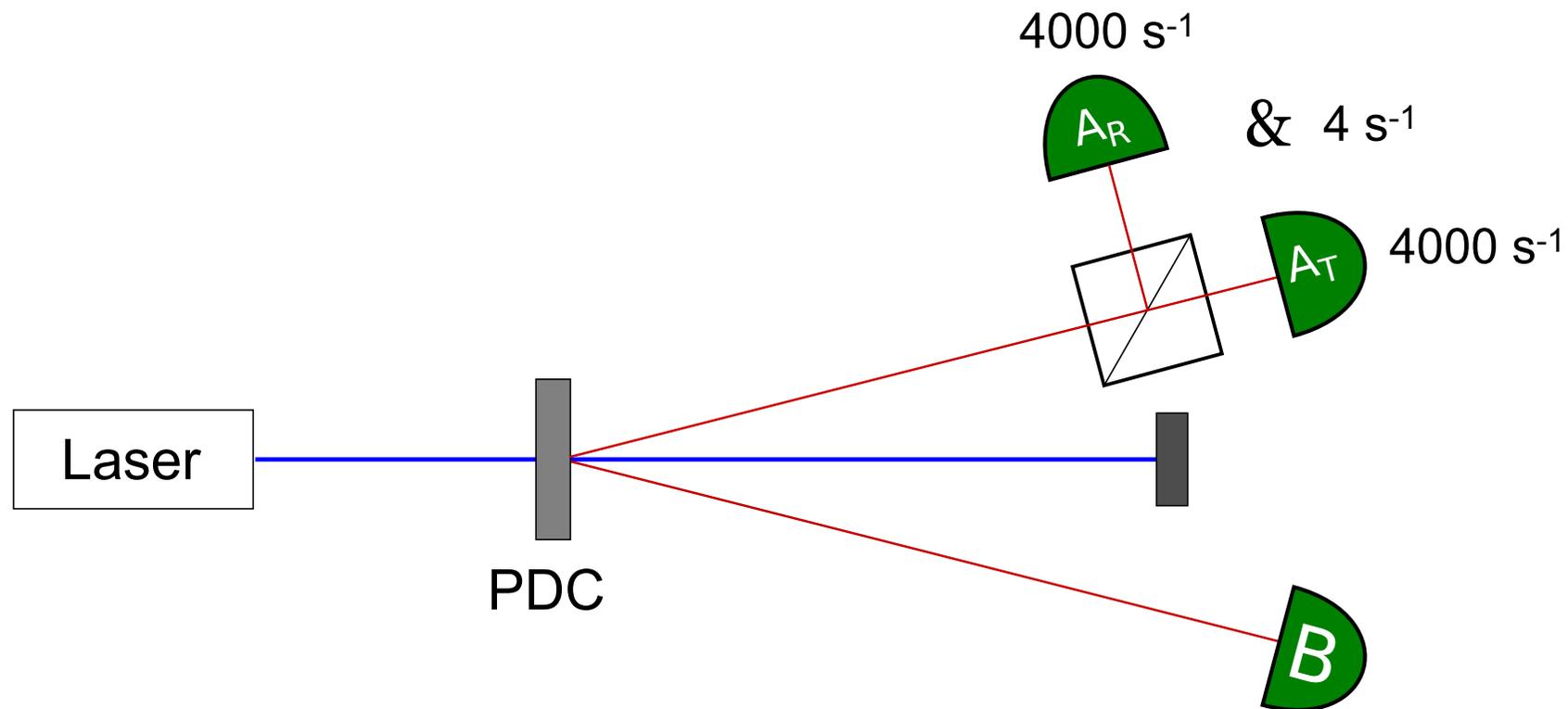
- Parametrische Fluoreszenz (PCD)
 - Detektor schaut auf schwach leuchtenden Kristall
 - Weil es so funktioniert. (theoriegeleitet)



- Mögliche Schüleraktivität
 - Detektor ausgiebig testen
 - Raum für Vorschläge (was passiert, wenn...)
 - Diskussion: Was bedeuten die Zahlen, was muss ich glauben?

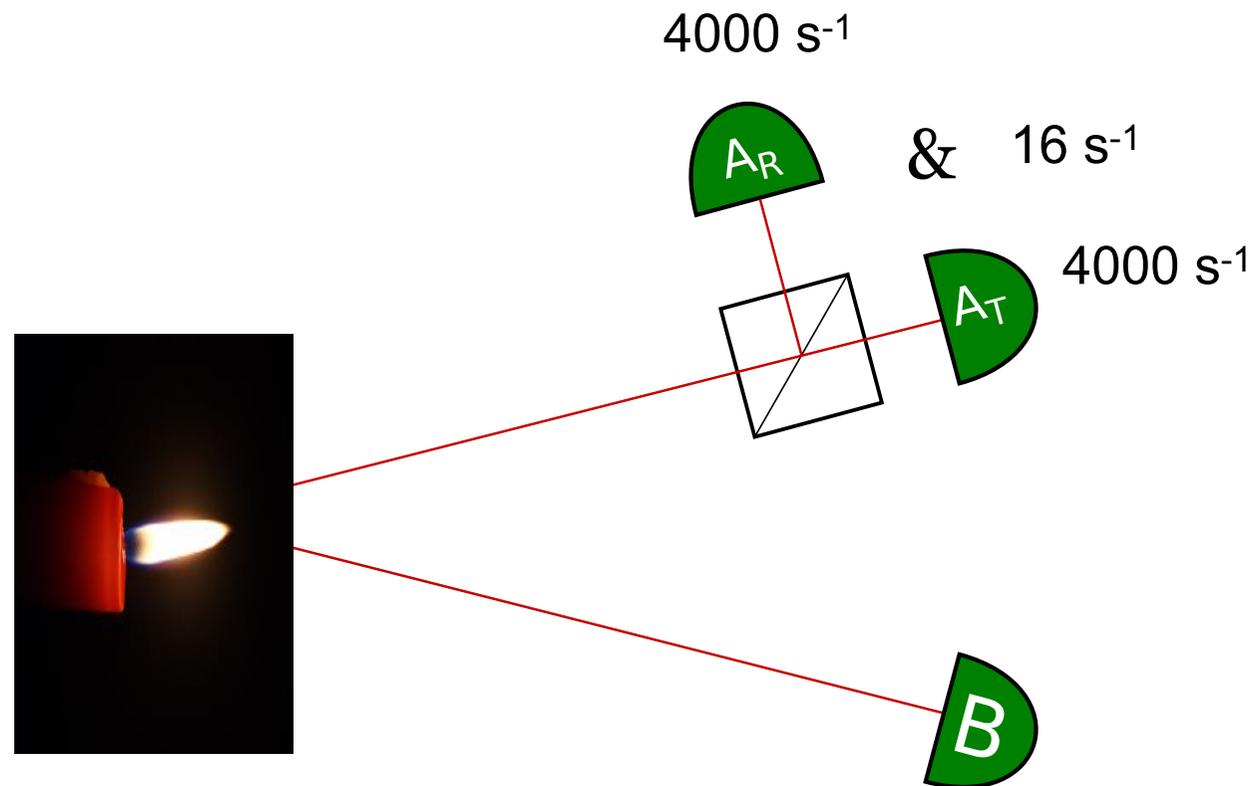
Antikorrelation am halbdurchlässigen Spiegel

- Koinzidenzen mit Bob werden ausgewertet



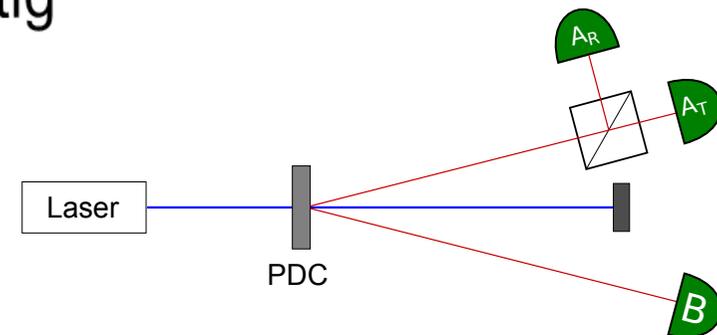
Antikorrelation am halbdurchlässigen Spiegel

- Koinzidenzen mit Bob werden ausgewertet



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!)

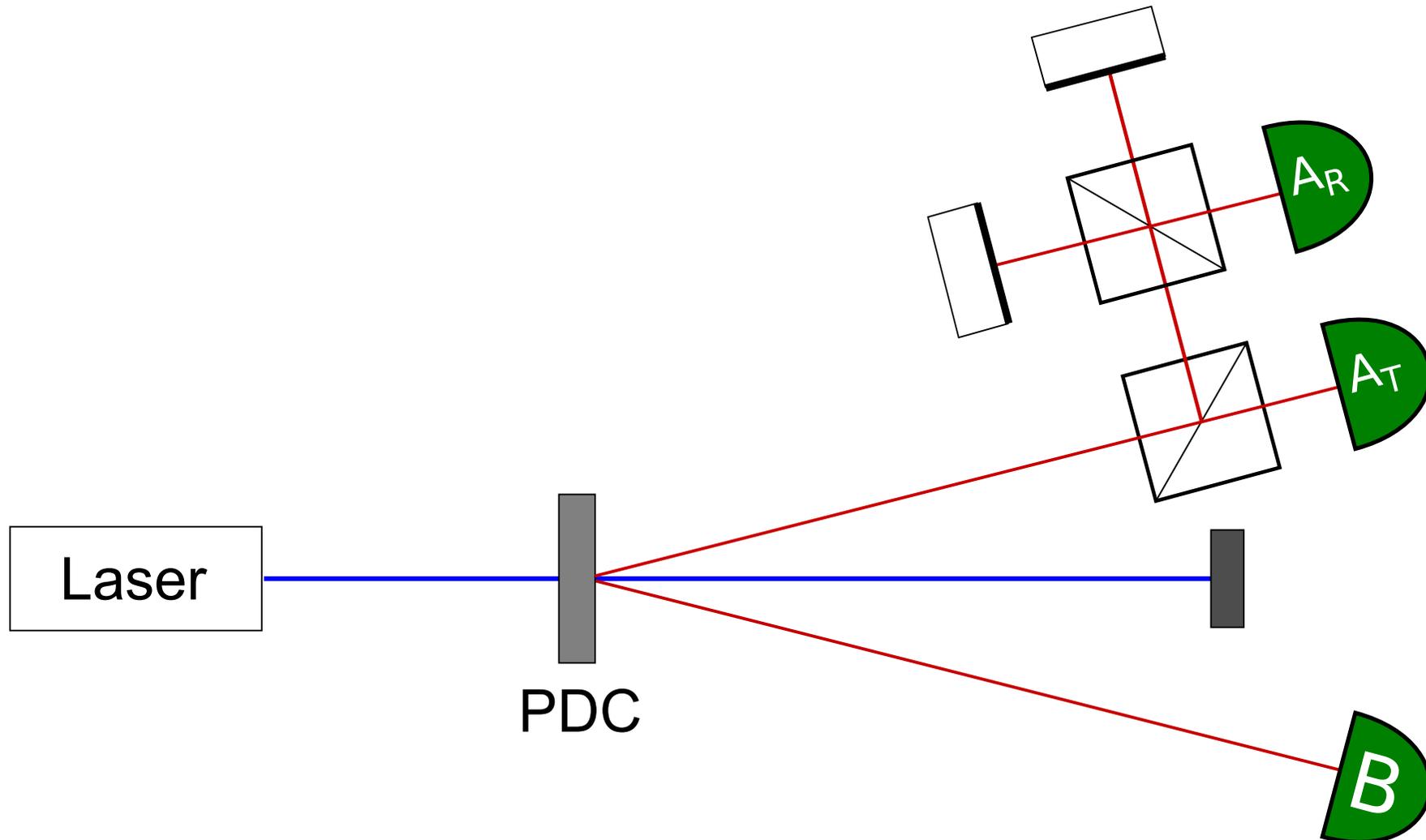
$$P_{TR} N_B \cdot N_B = P_T N_B \cdot P_R N_B \Leftrightarrow N_{TR} N_B = N_T N_R \Leftrightarrow \frac{N_{TR} N_B}{N_T N_R} = 1 \rightarrow \alpha = 1$$

- Nichtklassisches Licht: $\alpha < 1$

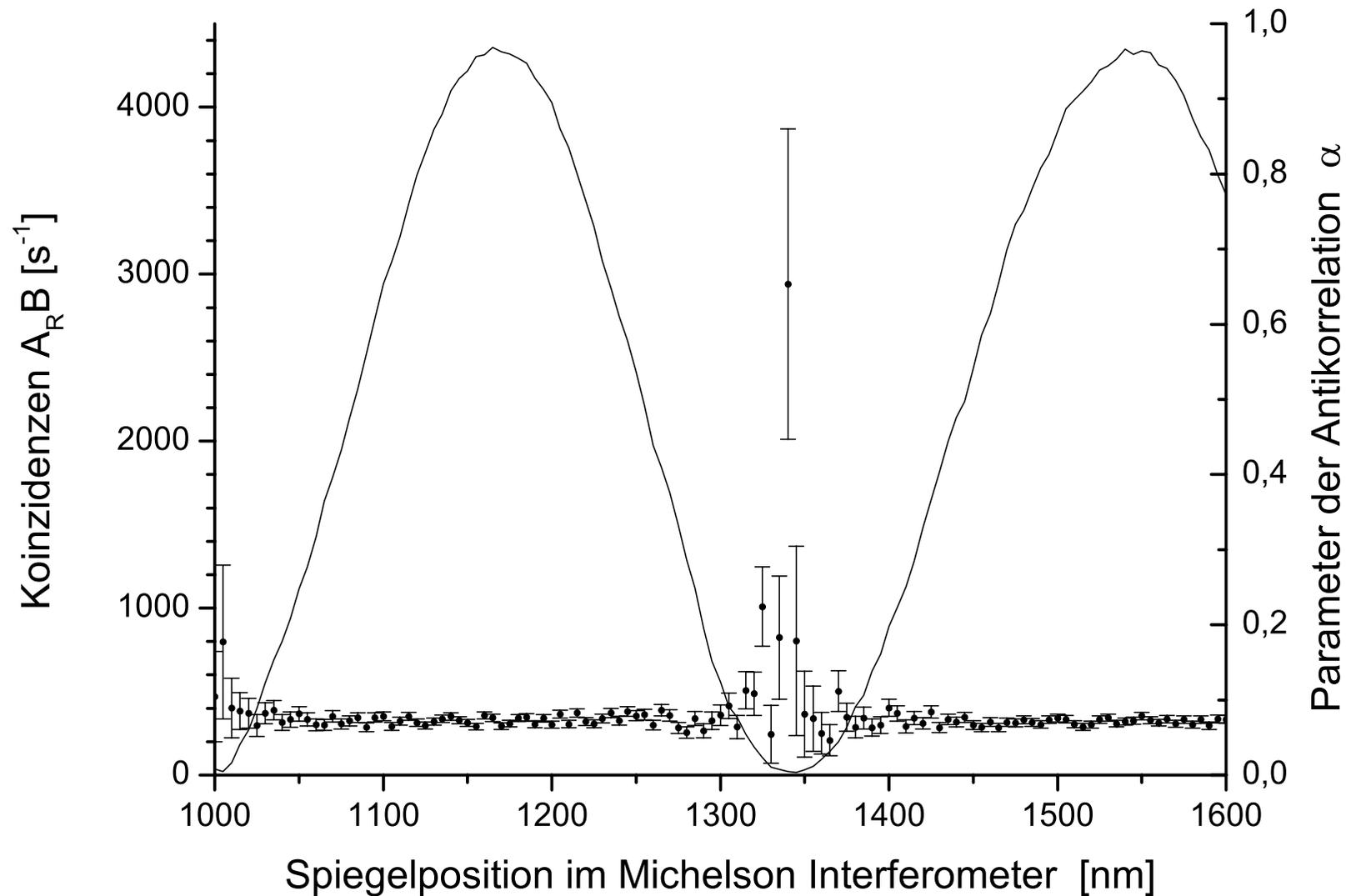
Zählraten beurteilen

- Klassisch vs. Nichtklassisch hat Übergangsbereich
- Technisch: α ist im Justiermodus nicht sehr überzeugend ($> 0,2$)
- Schüler diskutieren: Kriterium „Nicht-Klassisch“
 - $\alpha = 0,97$ ist zu nahe bei 1
 - $\alpha = 0,00001$ ist übertrieben
 - Schüler zieren sich
 - Jeder muss seinen Wert nennen (weder richtig noch falsch)
 - Mittelwert (oder anderer Konsens)
 - So funktioniert Wissenschaft im Großen auch!

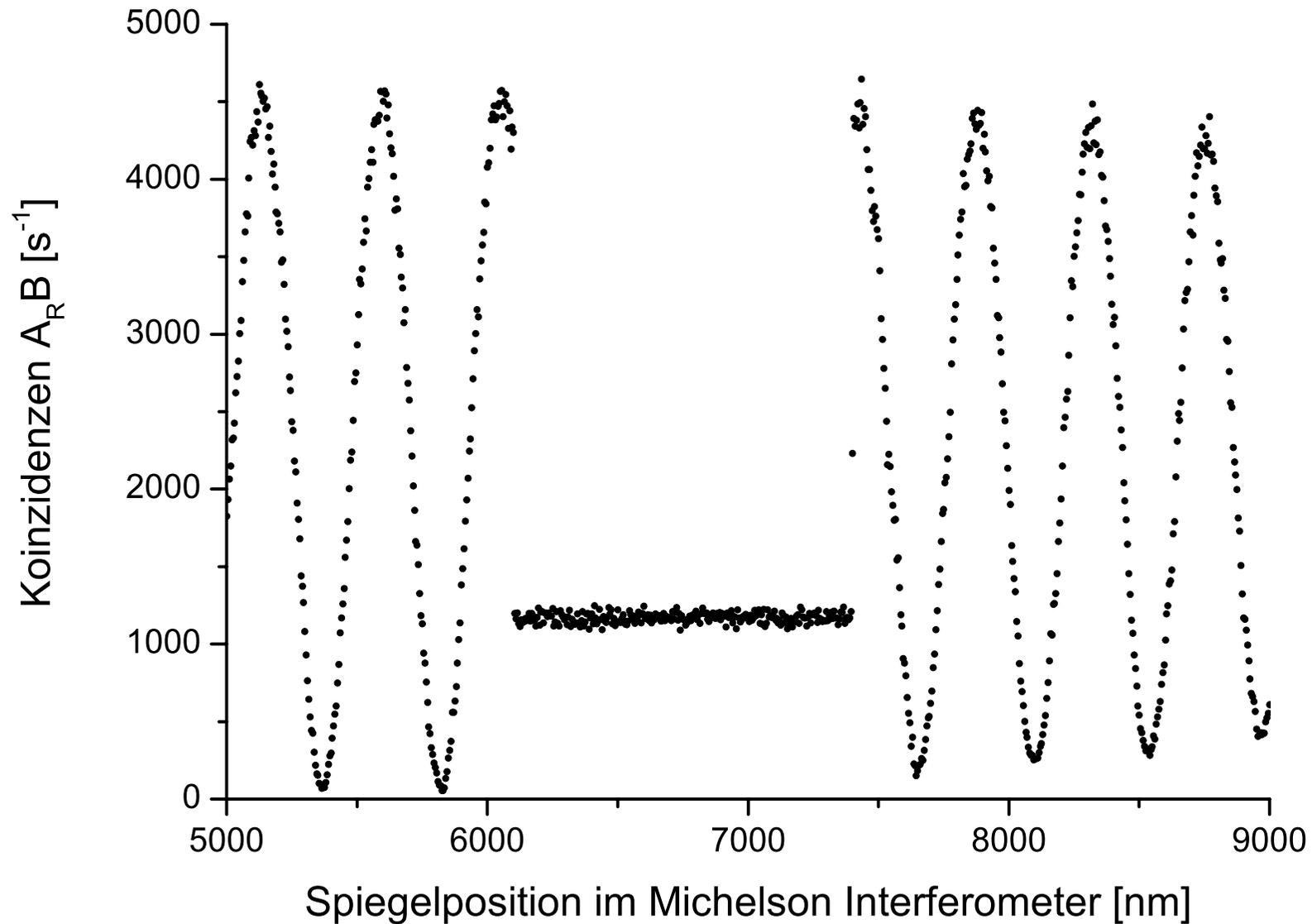
Photonen im Michelson-Interferometer



Interferenz einzelner Photonen

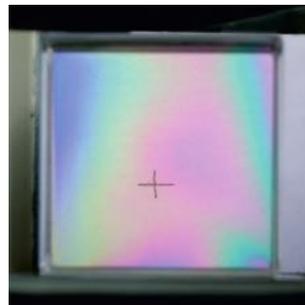
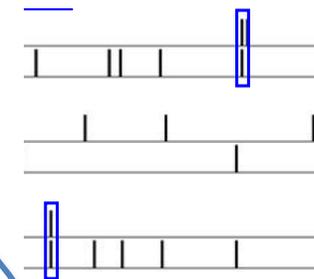


Unterbrechung



Hierarchie der Lichtmodelle

Photon
zeitlicher Bezug
Elementaranregung



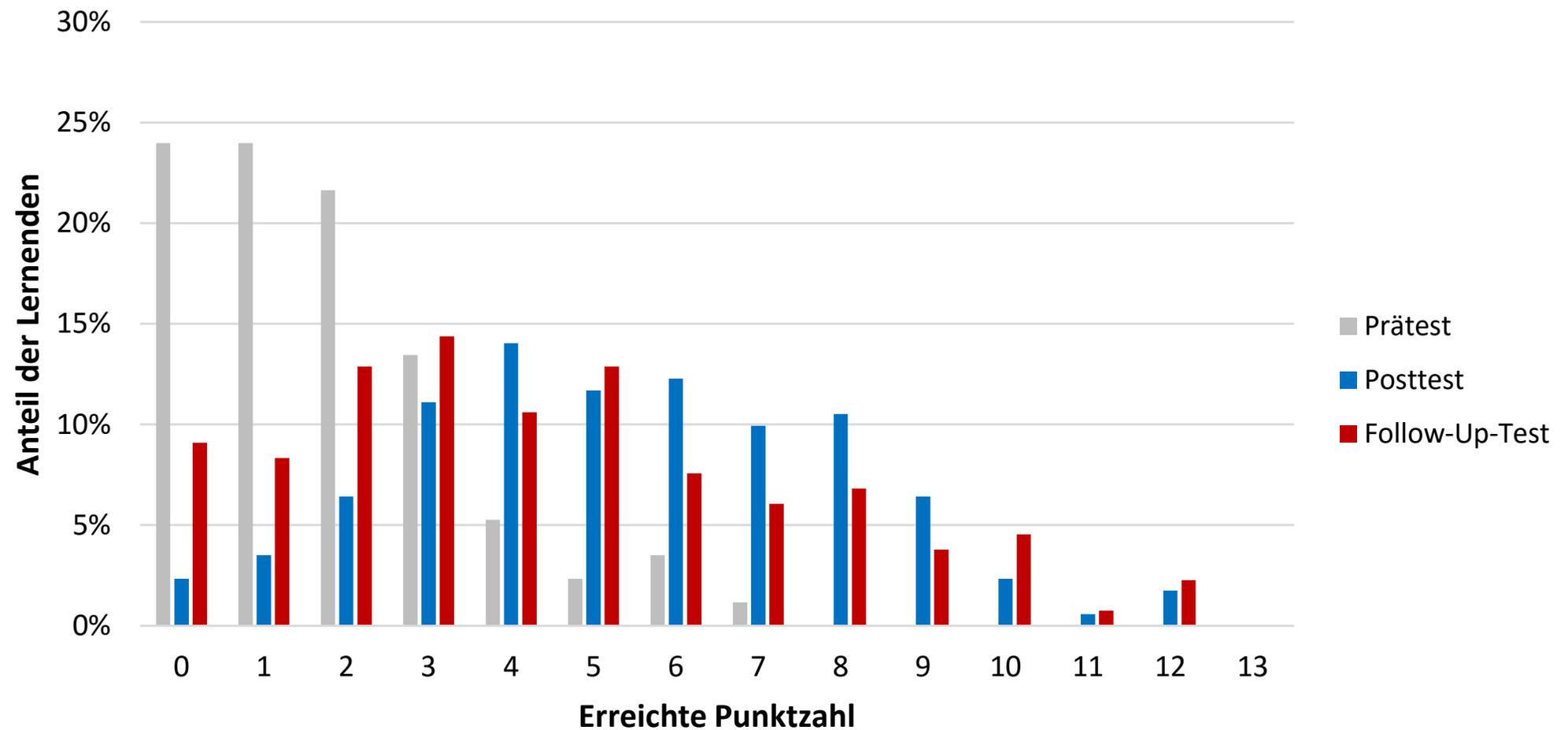
e/m Welle
Beugung
Interferenz
Superposition

Strahlen
gerade Sichtverbindung
Sehen vs. Tasten
Geometrische Konstruktion

Evaluation des Unterrichtskonzepts

- **Philipp Bitzenbauer:** Quantenoptik an Schulen. Studie im Mixed-Methods Design zur Evaluation des Erlanger Unterrichtskonzepts zur Quantenoptik, [Dissertation 2020](#)
 - Randbedingung: Gymnasium mit wenig Zeit
 - Historische Erzählung entfällt aus Zeitgründen
 - Originalarbeit Grangier entfällt wegen Sprachbarriere
 - Photodetektoren im Detail verstehen
 - Übernahme in den eigenen Unterricht möglich
 - Arbeitsmaterialien in Anhang A
- Forschungsfrage: Wie gut ist das Unterrichtskonzept?

Lernzuwachs durch Testfragen nachweisen



Urteil der beteiligten Lehrkräfte

Bewertung der Arbeitsblätter und ihres Einsatzes

