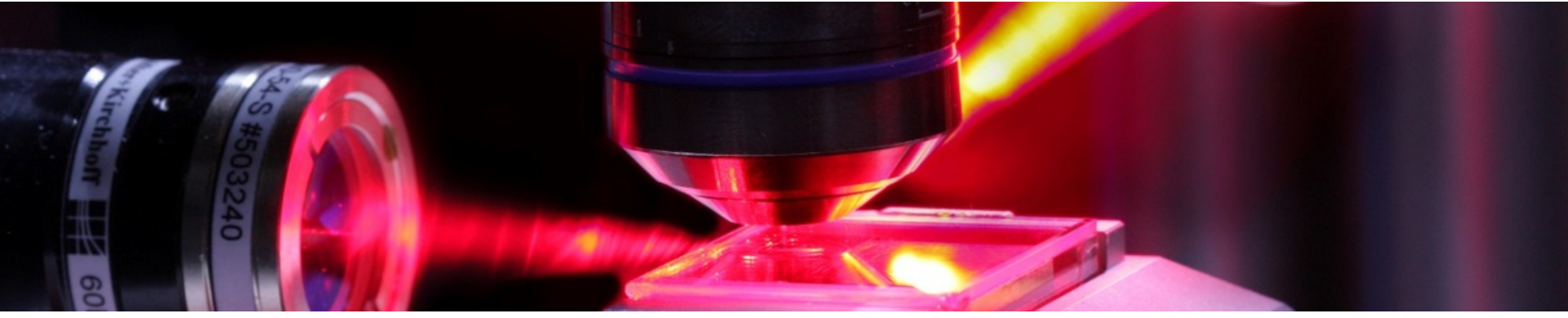
universität innsbruck



Quantenphotonik

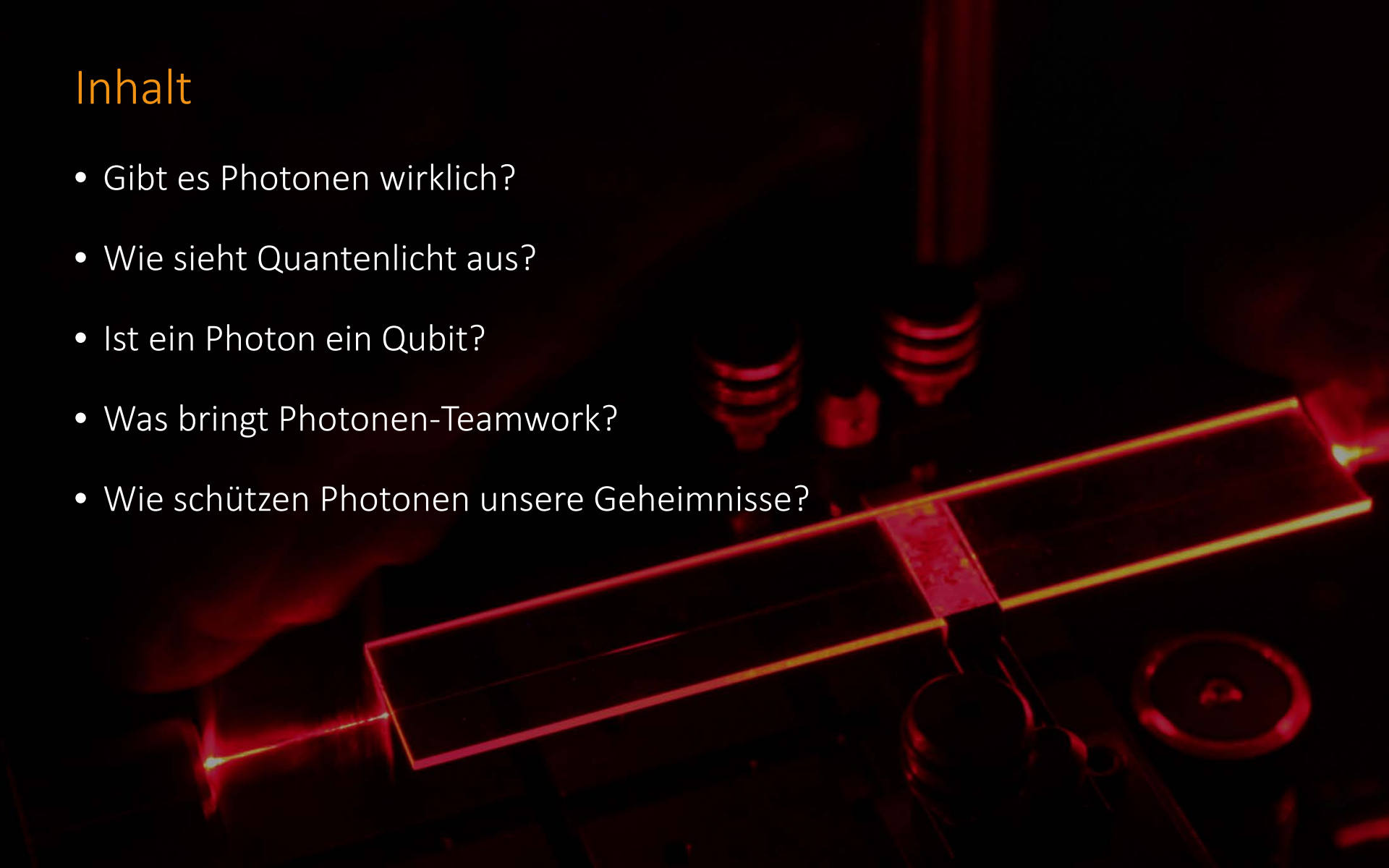
Quantenzustände des Lichts nutzbar machen

Gregor Weihs

Institut für Experimentalphysik

Inhalt

- Gibt es Photonen wirklich?
- Wie sieht Quantenlicht aus?
- Ist ein Photon ein Qubit?
- Was bringt Photonen-Teamwork?
- Wie schützen Photonen unsere Geheimnisse?



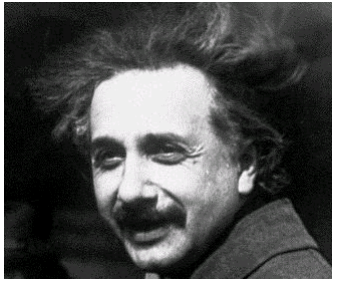
Photonen

- Max Planck (1900) konnte die Farbe eines glühenden Körpers nur erklären indem er behauptete das Licht bestünde aus Teilchen!

- Einstein (1905) erklärte damit, wie Licht Elektronen aus Metallen austreten lässt.

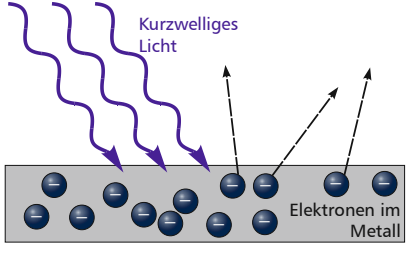
- Wie passt das mit den Welleneigenschaften zusammen?

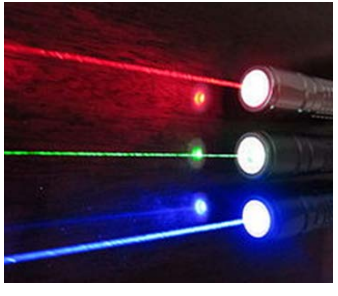
Bild von John, Lizenz CC BY-SA 2.5
https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Dieselrainbow.jpg



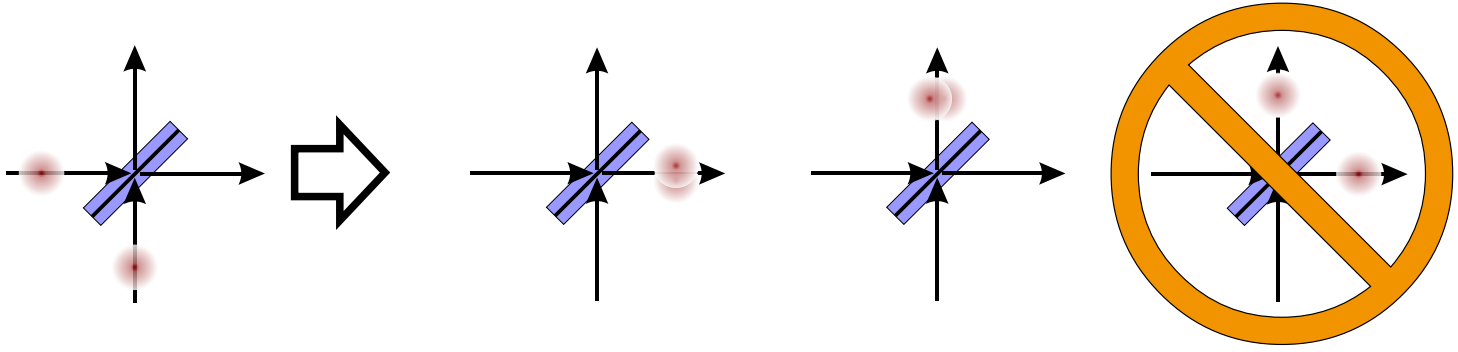
Welche Beobachtungen zeigen uns, dass es Photonen gibt?

- NO Schwarzkörperstrahlung?
- MAYBE Photoelektrischer Effekt ?
- MAYBE Laser?
- YES Quanteninterferenzeffekte

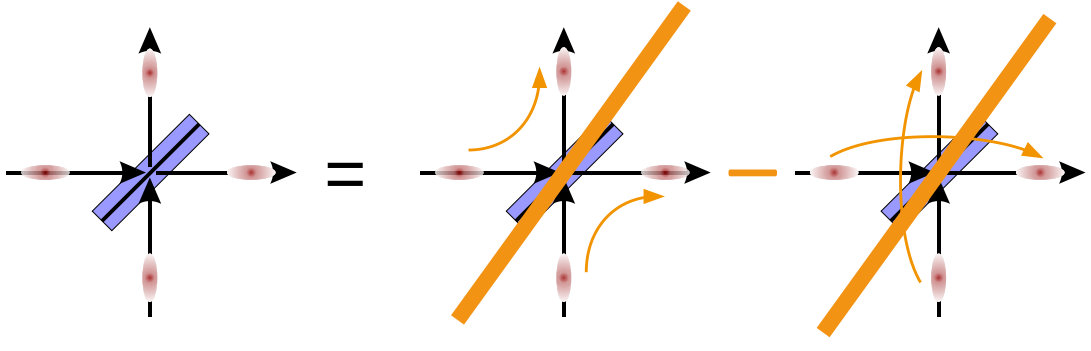




Hong-Ou-Mandel Interferenz

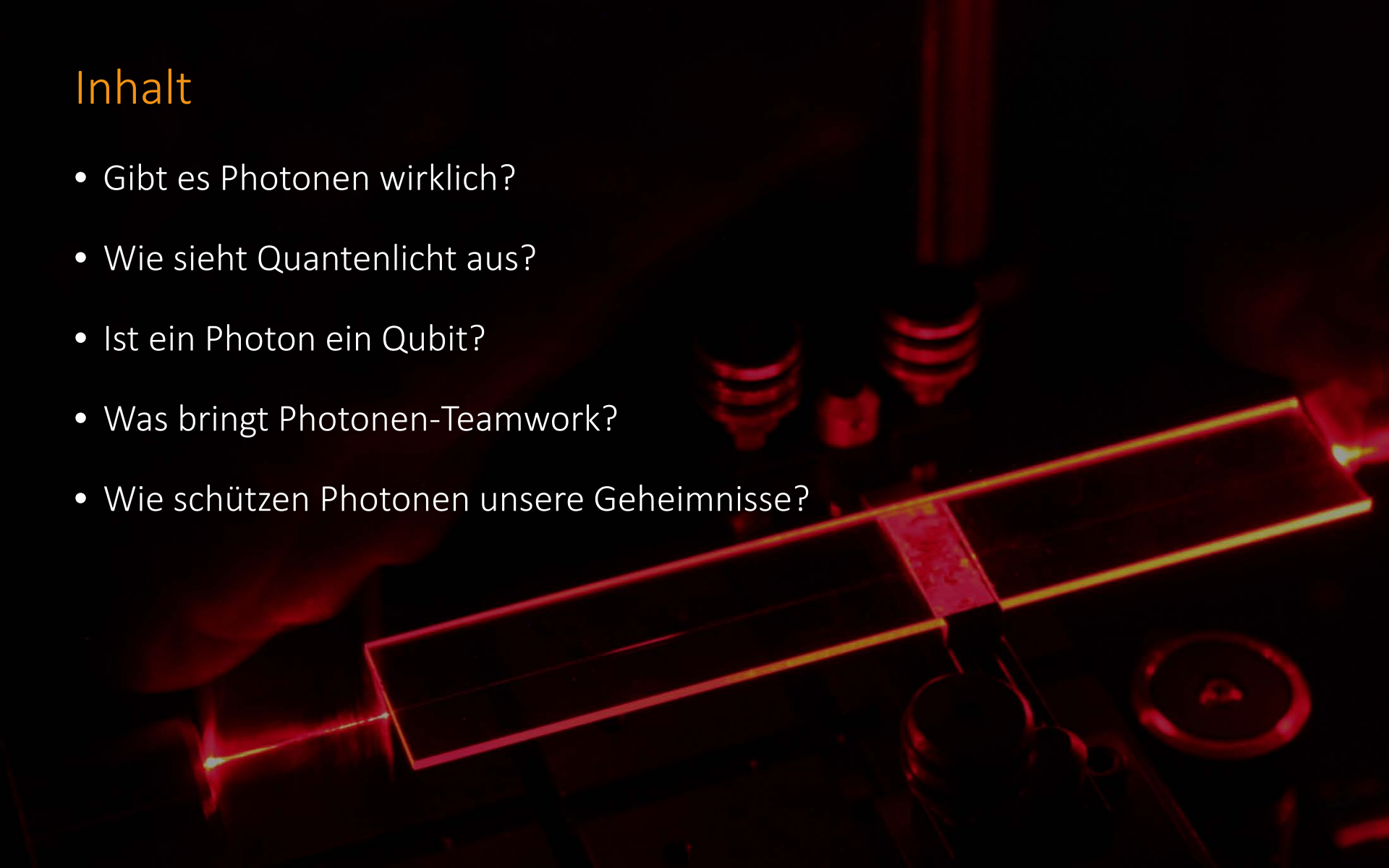


Kommt nicht vor!

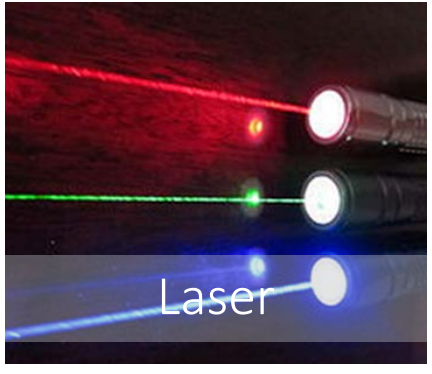


Inhalt

- Gibt es Photonen wirklich?
- Wie sieht Quantenlicht aus?
- Ist ein Photon ein Qubit?
- Was bringt Photonen-Teamwork?
- Wie schützen Photonen unsere Geheimnisse?



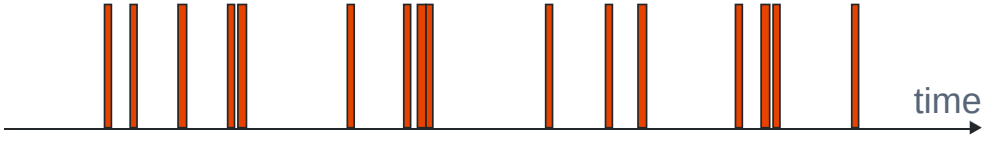
Klassisches Licht



Klassisches Licht

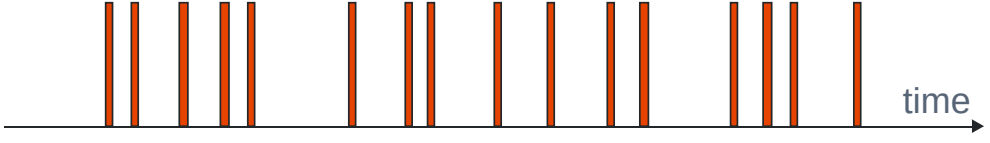
- Thermische Quellen produzieren “Photonenklumpen”

Thermisches Licht



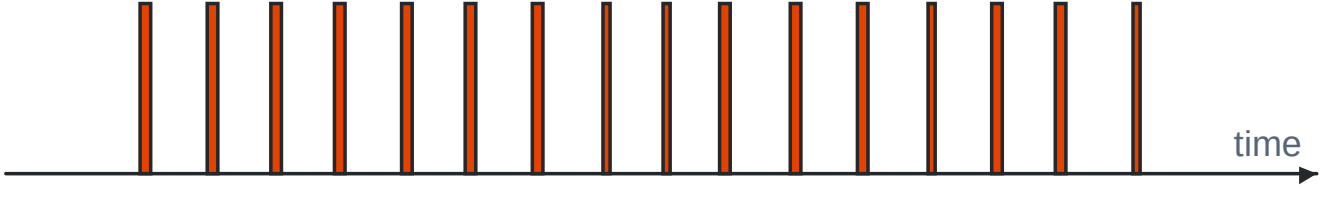
- Laser sind nicht viel besser, zufälliger Photonenstrom (Poisson-verteilt)

Kohärentes Licht (Laser)



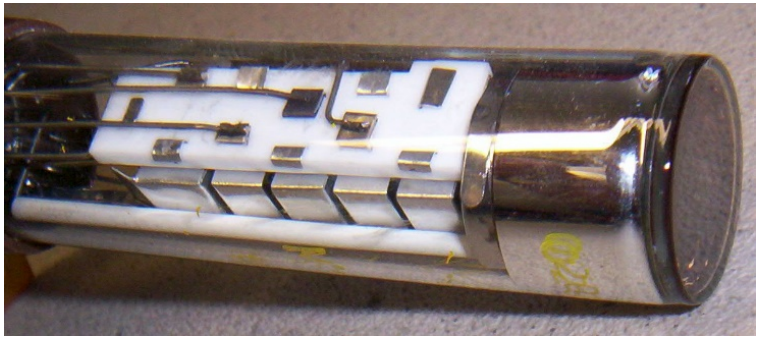
Einzelne Photonen

- Einzelne Quantenemitter können einzelne Photonen produzieren
- Zeitabstand zwischen aufeinanderfolgenden Photonen
- Photonenzahl in Zeitintervall streut nicht

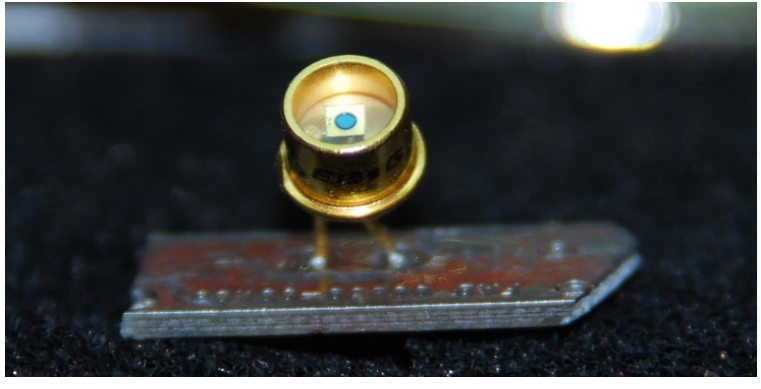


Detektoren

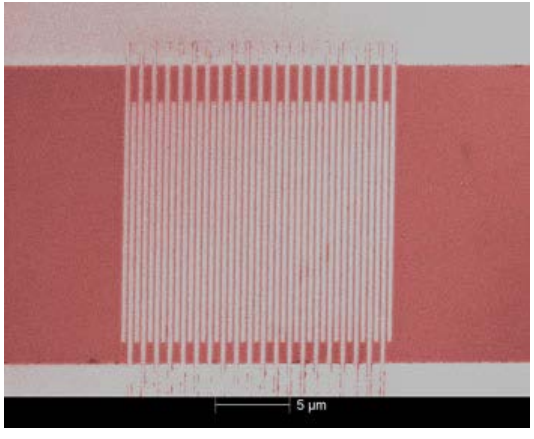
- Photomultiplier (PMT)
- Lawinendioden (APD)
- Supraleitende Nanodrähte (SNSPD)



From Ulfbastel, CC BY-SA 3.0, https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=10102507



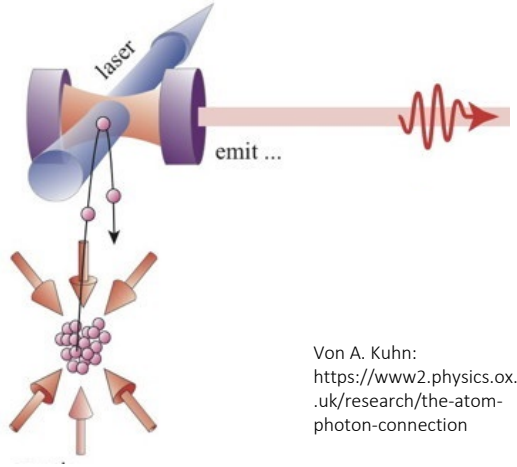
From Radovan Blažek - Eigenes Werk, CC BY-SA 3.0, https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=26470682



From NIST (public domain): https://en.wikipedia.org/wiki/File:NIST_SEM_Image_of_Superconducting_Nanowire_Single_Photon_Detector.jpg

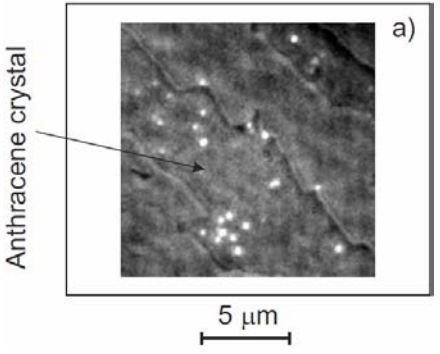
Quellen einzelner Photonen

Einzelne Atome



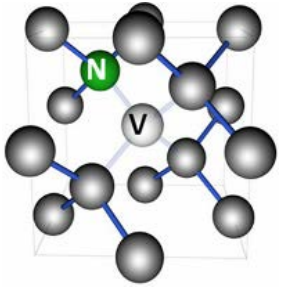
Von A. Kuhn: https://www2.physics.ox.ac.uk/research/the-atom-photon-connection

Einzelne Moleküle



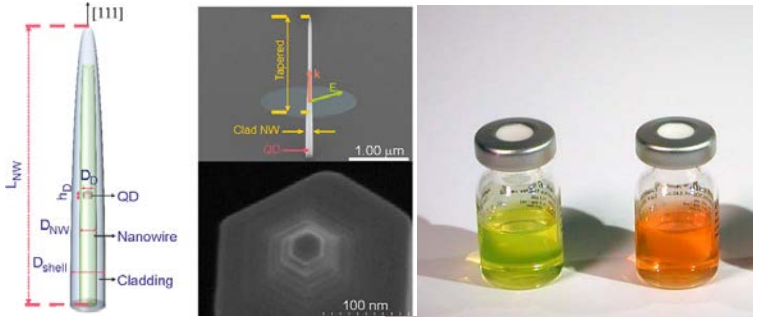
Von Toninelli et al. https://www.osapublishing.org/oe/abstract.cfm?uri=oe-18-7-6577

Farbzentren



Von H. Weinfurter: http://xqp.physik.uni-muenchen.de/research/single_photon/index.html

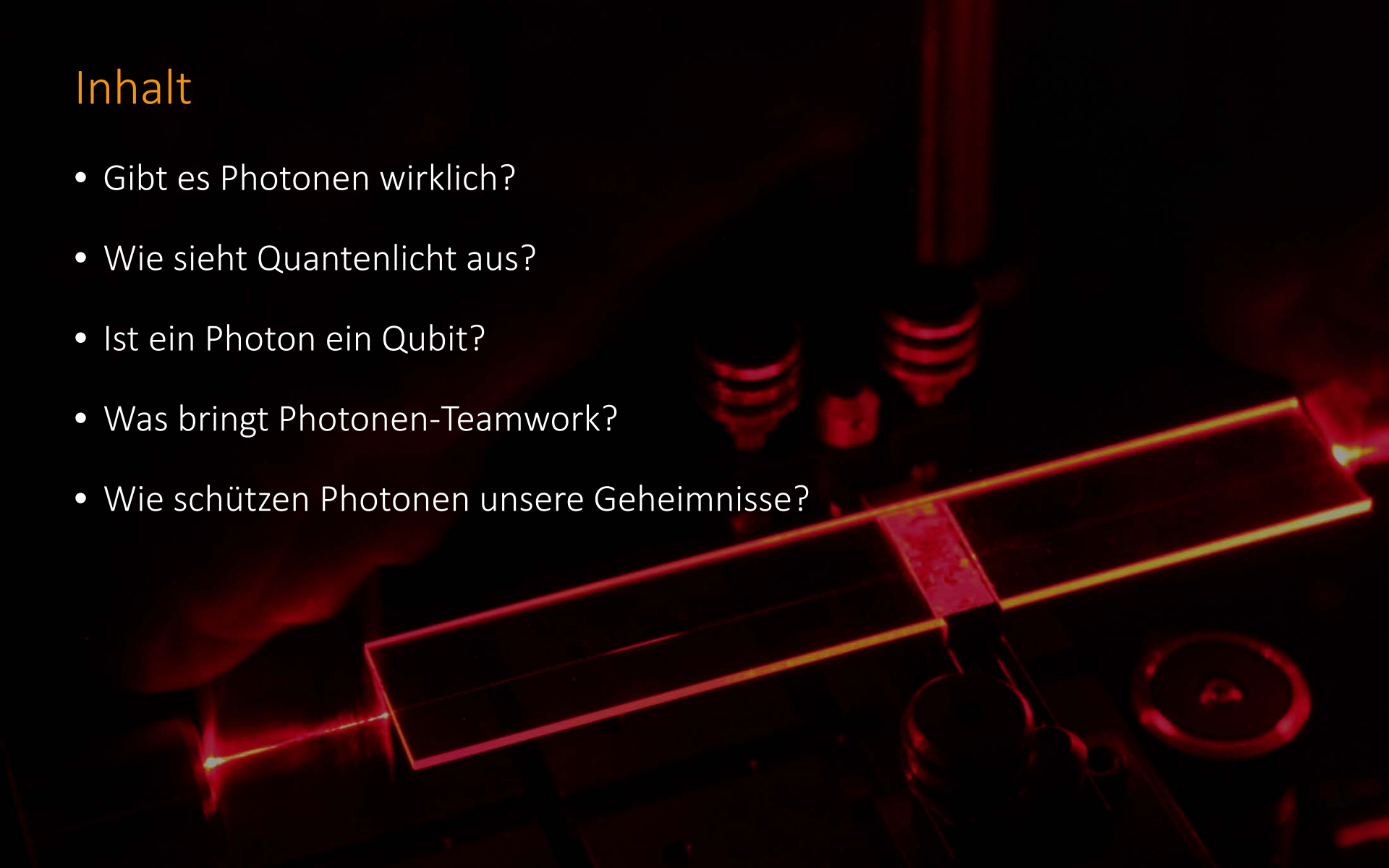
Quantenpunkte



Von Ilja, CC BY-SA 3.0, https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=10257325

Inhalt

- Gibt es Photonen wirklich?
- Wie sieht Quantenlicht aus?
- Ist ein Photon ein Qubit?
- Was bringt Photonen-Teamwork?
- Wie schützen Photonen unsere Geheimnisse?



Bits und Qubits

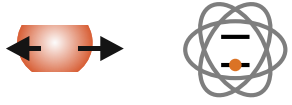
Computer – Bits	Quantencomputer – Qubits

- 0 = Aus

oder

- 1 = Ein

- $|0\rangle$



und / oder

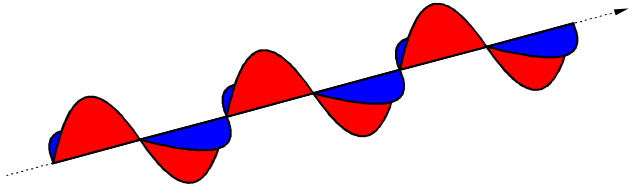
- $|1\rangle$

Auch gleichzeitig in $|0\rangle$ und $|1\rangle$

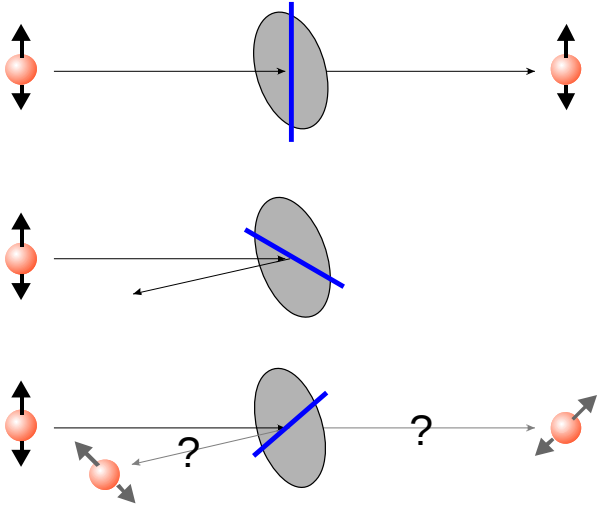
$|0\rangle + |1\rangle$

Photonen und Polarisation

- Polarisation des Lichts…

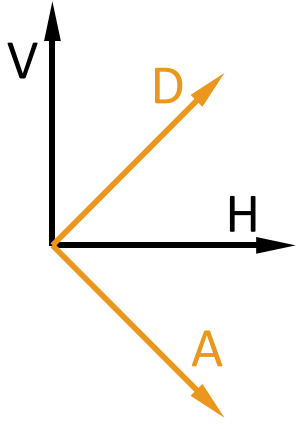


- …und von einzelnen Photonen:



Zustand, Zufall und Wahrscheinlichkeit

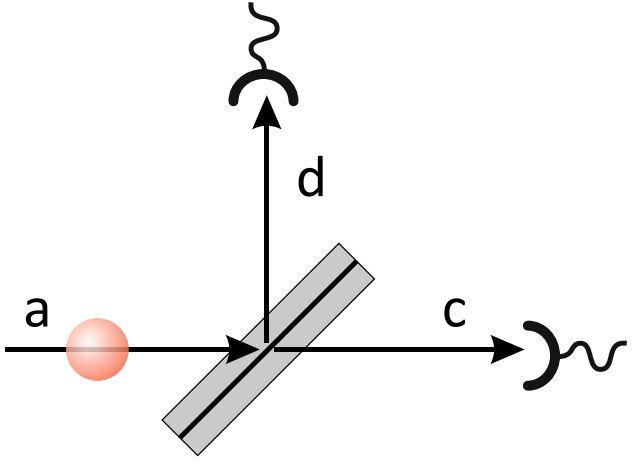
- Beliebige Zustände herstellen
- Nur eine Messung pro Photon in einer gewählten Basis
- Ergebnis 1 bit



Zustand	Messung	Ergebnis	Wahr-schein-lichkeit
H	H/V	H	1
		V	0
	D/A	D	½
		A	½
D	H/V	H	½
		V	½
	D/A	D	1
		A	0

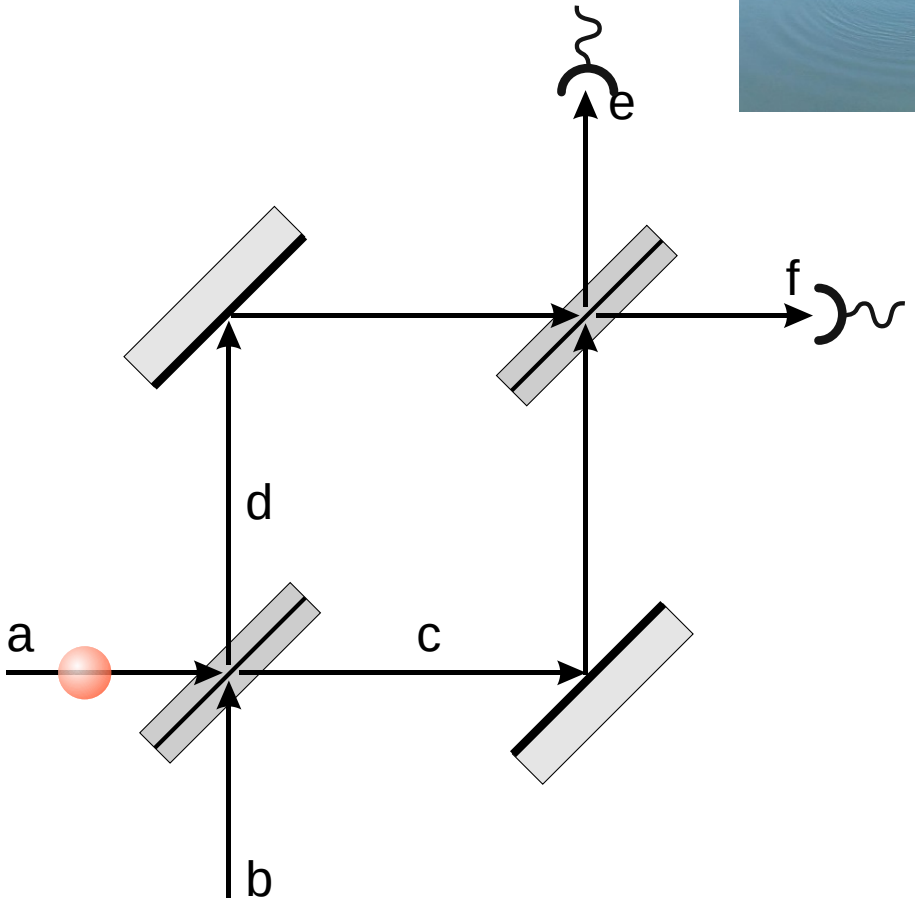
Codierung im Ort

- Überlagerung auch im Ort
- Strahlteiler erzeugt Orts-Überlagerung $|a\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}[|c\rangle + |d\rangle]$
- Von zwei Detektoren bei c und d, klickt immer nur einer.



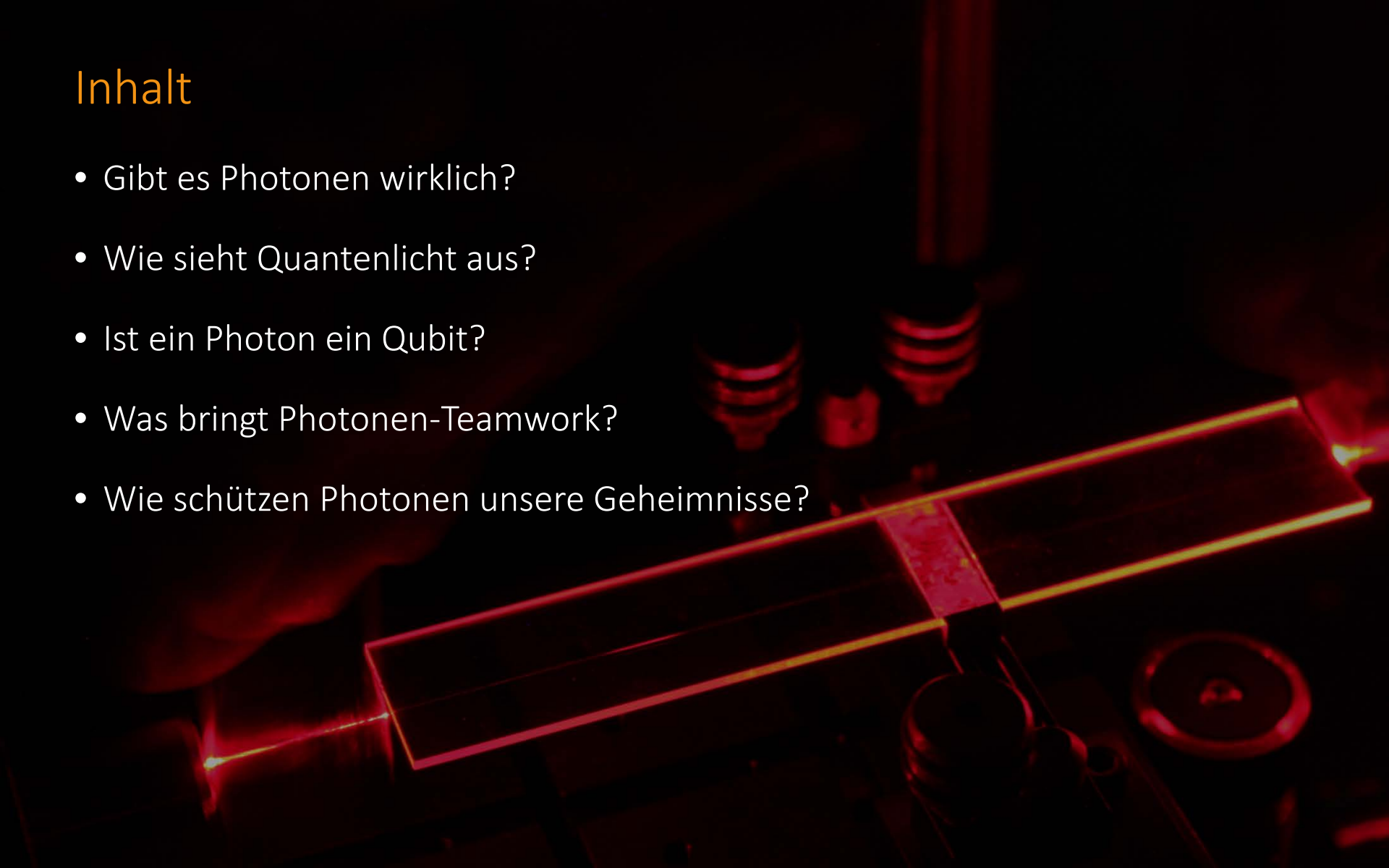
Interferenz

- Wege überlagern
- Messungen in e und f sagen nichts über den Weg
- Qubits bzw. Photonen interferieren, genau wie Wellen.

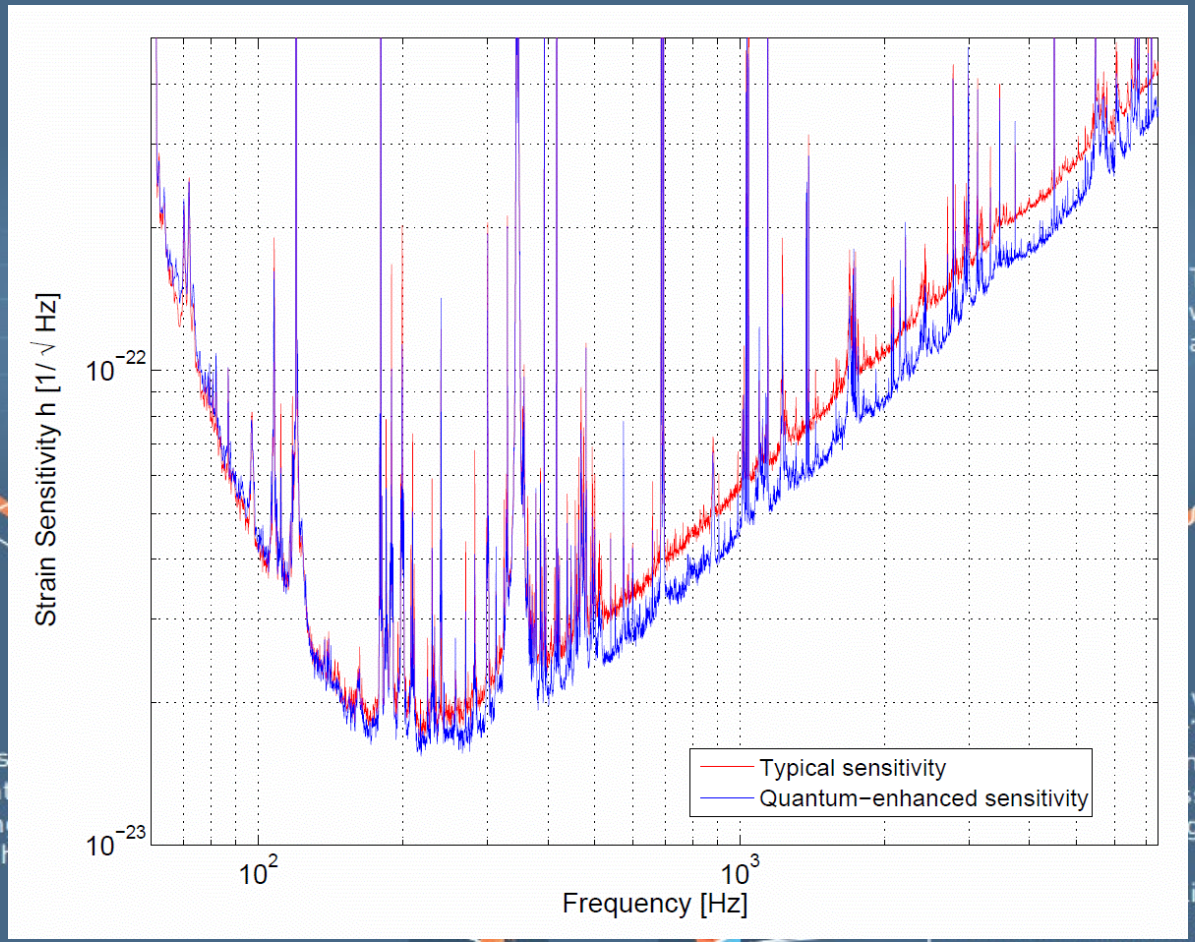


Inhalt

- Gibt es Photonen wirklich?
- Wie sieht Quantenlicht aus?
- Ist ein Photon ein Qubit?
- Was bringt Photonen-Teamwork?
- Wie schützen Photonen unsere Geheimnisse?



LIGO – A GIGANTIC INTERFEROMETER



MIRROR

MIRROR

The light waves bounce and return.

1 Laser light is s
the instrument
measure chan
the length of t
arms.

wave affects the
's arms differently;
nds the other contracts
sed by the peaks and
gravitational waves.

ight returns unchang-
splitter from both
arms and the light waves cancel each other out.

LASER

LIGHT WAVES CANCEL EACH

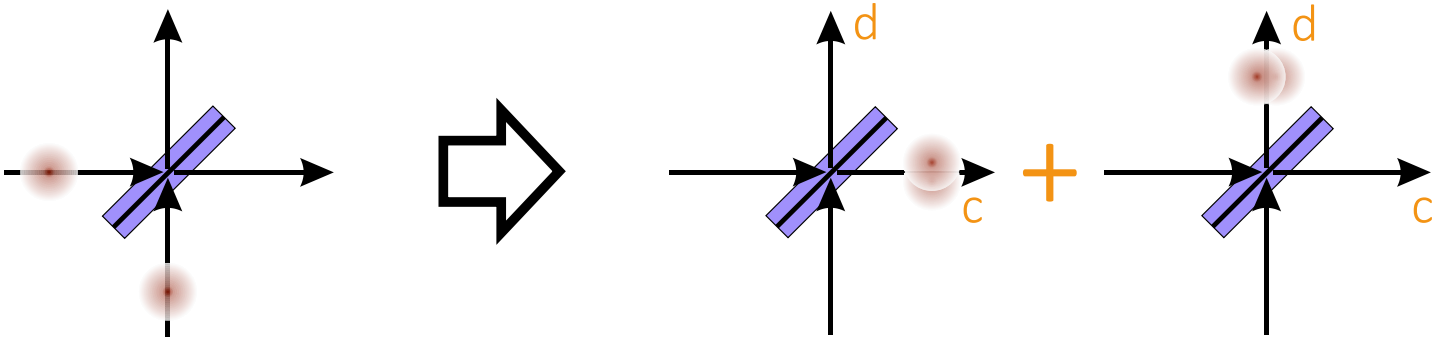
From https://phys.org/news/2019-05-ligo-virgo-neutron-star-smash-ups.html

Interferometrie

- Winzige Verschiebungen
- Oberflächen
- Vibrationen
- Wellenlänge
- Phasenkontrast Mikroskopie
- Sensoren

From: https://www.zygo.com/?/met/interferometers/verifire/

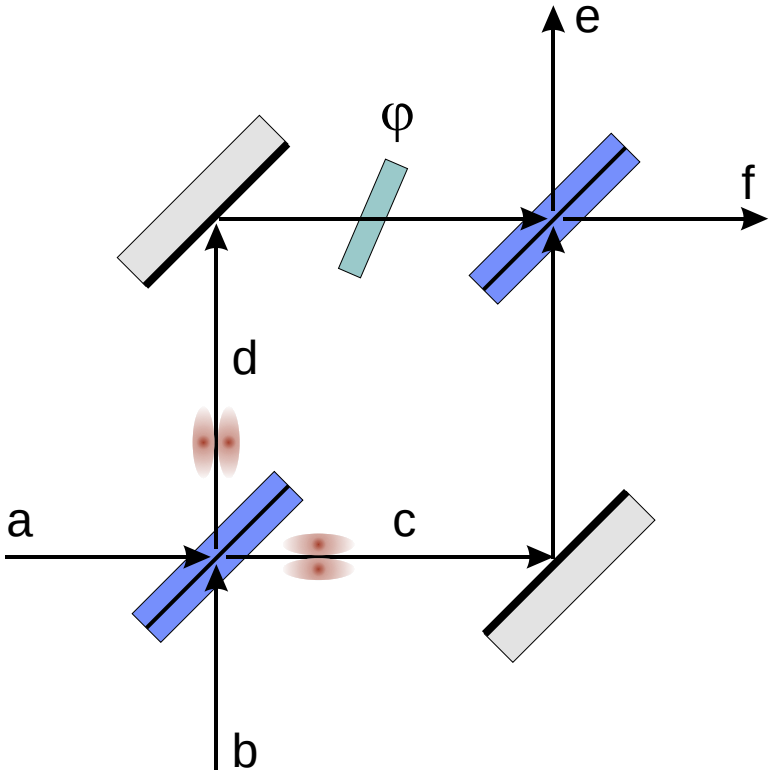
Noch mal Hong-Ou-Mandel



- Produziert eine kohärente Überlagerung von zwei Photen in c und d

$$|2_c 0_d\rangle + |0_c 2_d\rangle$$

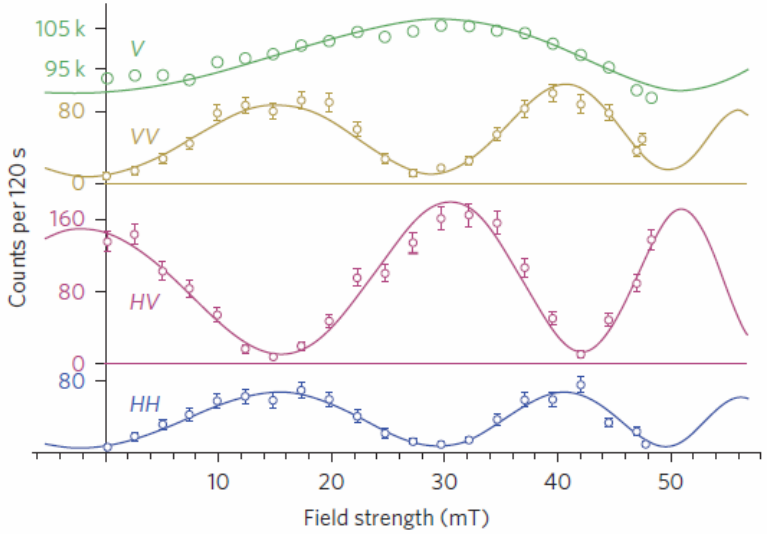
Höhere Phasenempfindlichkeit



- Überlagerung von zwei Photonen erfährt doppelten Phasenschub
- Höhere Phasenempfindlichkeit durch nichtklassischen Zustand
- Erweiterung auf N0+0N Zustände
- Unsicherheit sinkt mit $\frac{1}{N}$ statt $\frac{1}{\sqrt{N}}$

Beispiel Quantenmetrologie

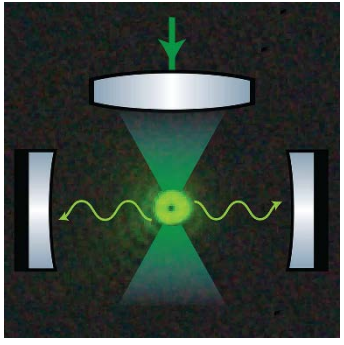
- Messung der Polarisationsrotation in wenigen Atomen
- Erreicht höhere Sensitivität
  - Pro Störung (größere Wellenlänge)
  - Pro Photon



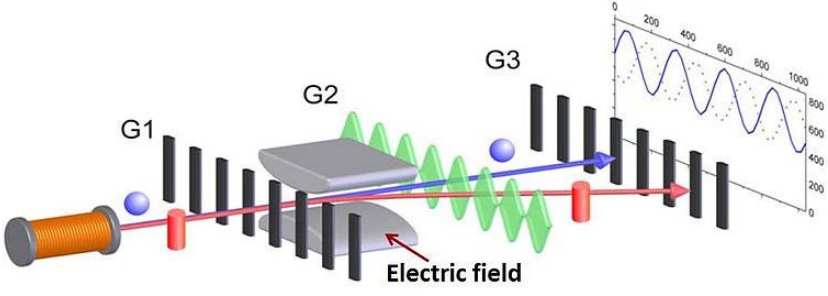
F. Wolfgramm, et al., Nat. Photon. **7**, 28 (2012).
http://doi.org/10.1038/nphoton.2012.300

Quantenmetrologie in Österreich

- Uni Wien
  - M. Aspelmeyer: Optomechanik
  - M. Arndt: Molekülinterferometrie
- TU Wien
  - T. Schumm: Kernatomuhren
- Uni Innsbruck
  - G. Weihs: Einzelphotonen, Mehrphotoneninterferenz



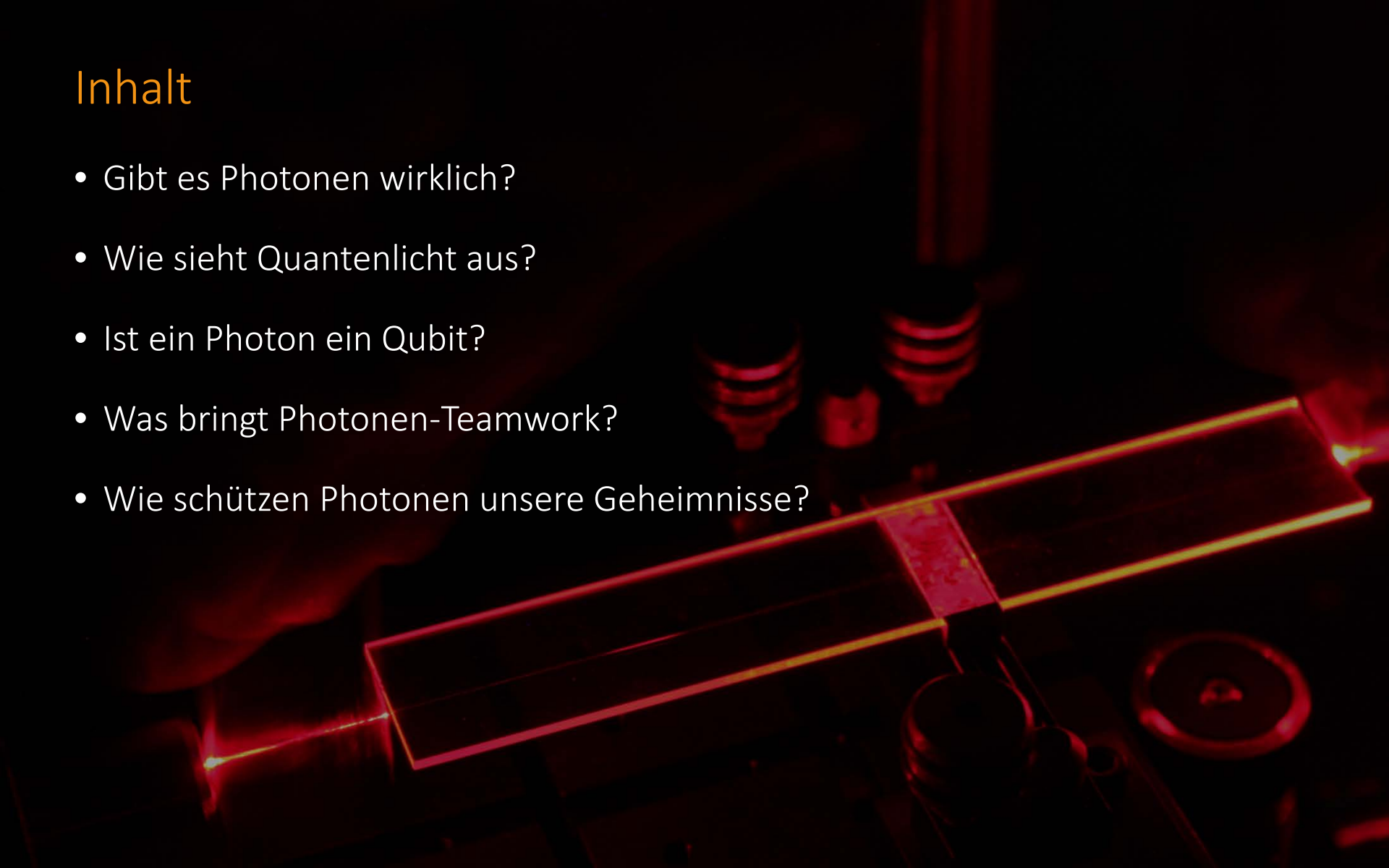
https://aspelmeyer.quantum.at/details/news/cavity-cooling-of-a-levitated-nanosphere-by-coherent-scattering



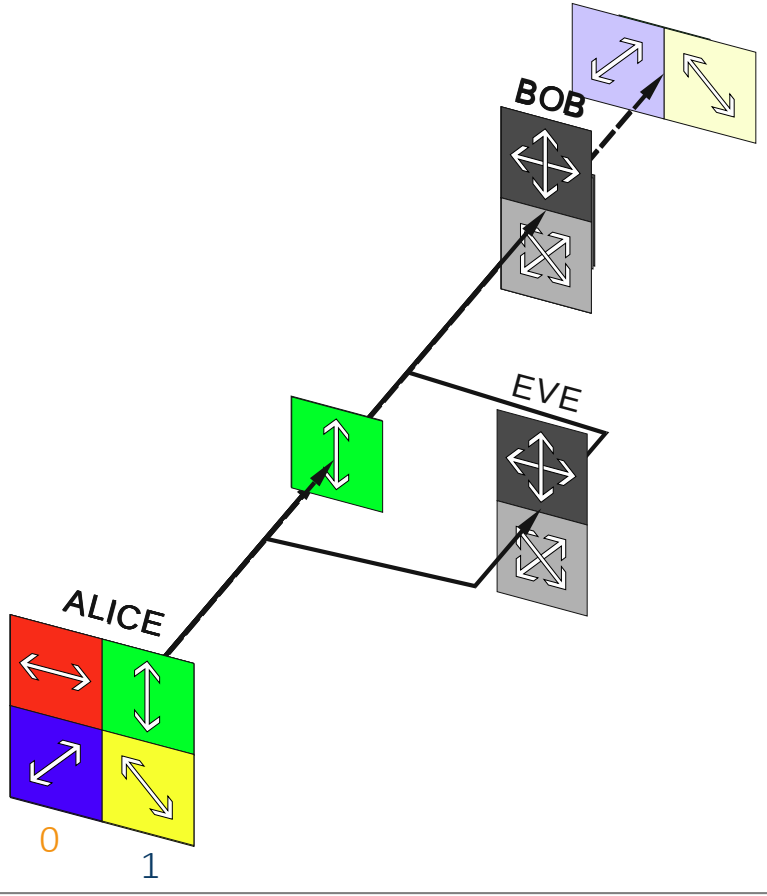
https://www.quantumnano.at/research/q-assisted-measurements/

Inhalt

- Gibt es Photonen wirklich?
- Wie sieht Quantenlicht aus?
- Ist ein Photon ein Qubit?
- Was bringt Photonen-Teamwork?
- Wie schützen Photonen unsere Geheimnisse?



Qubits übertragen geheime Schlüssel



Protokoll von Bennett & Brassard 1984

1. Ali zelne onen) mi r ver Po
2. Bo on z Me
3. Bo der N von zwei Antworten:

   0 oder 1

4. Alice und Bob unterhalten sich *öffentlich* über die Art der Messung. Alice sagt Bob, bei welchen Photonen er die richtige Messung gemacht hat.
5. Die anderen Messergebnisse werden verworfen. Übrig bleibt ein Schlüssel 0101001011101101000111100101 0…
6. Lauschangriffe verursachen fehlerhafte Bits.

Fehlerhafte Schlüssel

- Der erste Schlüssel ist fehlerhaft durch Rauschen aus
  - der Übertragung,
  - nicht perfekten Geräten (Rauschen der Detektoren),
  - **Lauschangriffen?**

- Fehlerkorrektur kann diese Fehler entfernen
  - z.B. Ziffernsumme
  - Fehlerkorrektur verrät ein bisschen vom Schlüssel!

- Wenn die Fehlerrate unter 11% ist können wir sicher sein, dass am Ende ein perfekter und geheimer Schlüssel bleibt.

Menschliche Fehlerkorrektur

Afugrnud enier Sduite an enier Elingshcen Unvirestiät ist es eagl, in wlehcer Rienhnelfoge die Bcuhtsbaen in eniem Wrot sethen, das enizg wcihitge dbaei ist, dsas der estre und lzete Bcuhtsbae am, rcihgiten Paltz snid. Der Rset knan ttolaer Bölsdinn sien, und du knasnt es torztedm onhe Porbelme lseen. Das ghet dseahlb, wiel wir nchit Bcuhtsbae für Bcuhtsbae enizlen lseen, snodren Wröetr als Gnaezs.

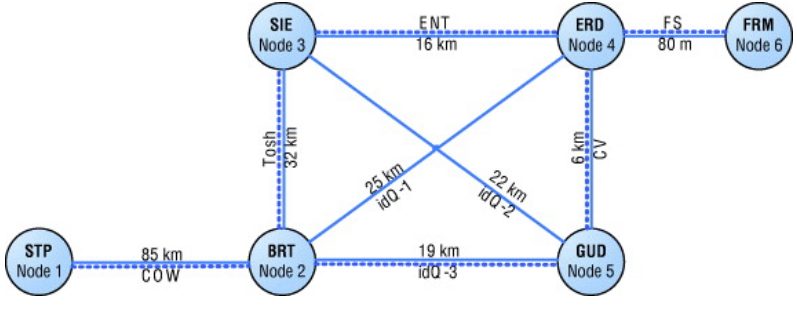
Verstärkte Geheimhaltung

- Alle Bits, die durch die Fehlerkorrektur publik wurden, müssen entfernt werden.
- Dennoch kennt Eve möglicherweise noch eine kleine Anzahl von Bits (% Fehlerrate).
- Der geheime Schlüssel kann nun verkürzt werden, so dass Eve keine Information mehr hat, z.B. durch Ziffernsumme:

Schlüssel	Eve kennt
01	_1
Verkürzter Schlüssel	Eve kennt
1	_

Quantenschlüsselverteilung in Österreich

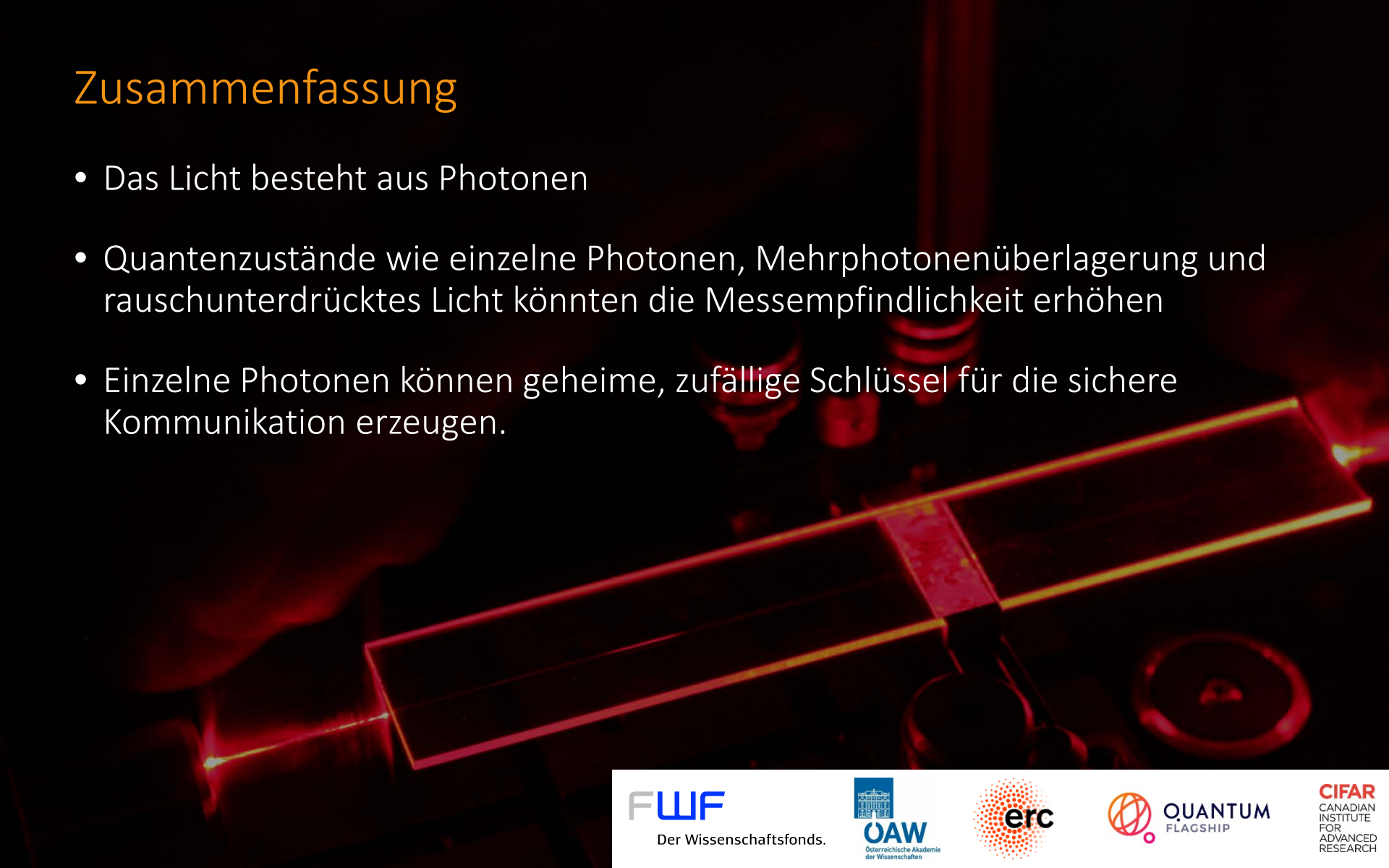
- ÖAW
  - Zeilinger: Micius Satellit (China)
  - Ursin: ESA, Faser
- AIT
  - Hübel, Schrenk, Stierle: SECOQC Netzwerk, UniQorn, EU QKD Testbed



https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1367-2630/11/7/075001

Zusammenfassung

- Das Licht besteht aus Photonen
- Quantenzustände wie einzelne Photonen, Mehrphotonenüberlagerung und rauschunterdrücktes Licht könnten die Messempfindlichkeit erhöhen
- Einzelne Photonen können geheime, zufällige Schlüssel für die sichere Kommunikation erzeugen.



FWF Der Wissenschaftsfonds.
ÖAW Österreichische Akademie der Wissenschaften
erc
QUANTUM FLAGSHIP
CIFAR CANADIAN INSTITUTE FOR ADVANCED RESEARCH