

# Quantenkorrelationen und Quantentechnologien – Das Thema des Physiknobelpreises 2022

**Roman Schnabel**

**Institut für Quantenphysik & Zentrum für Optische Quantentechnologien**



**Universität Hamburg**

DER FORSCHUNG | DER LEHRE | DER BILDUNG

# Themen

Der Nobelpreis für Physik 2022

Ein Beispiel, warum aus dem Welle-Teilchen-Dualismus (der Quantisierung der Welle) folgt, dass manche Ereignisse ohne Grund passieren können.



Quantenkorrelationen bzw. „Verschränkung“

Einsteins Kritik an der Quantentheorie  
„Der Alte würfelt nicht!“ [Einstein]

Die Experimente der Nobelpreisträger

Bestätigt:

Manche Dinge in der Natur passieren ohne Grund.

Technologische Anwendungen von Quantenkorrelationen

# Der Nobelpreis für Physik 2022



Ill. Niklas Elmehed © Nobel Prize Outreach  
**Alain Aspect**  
Prize share: 1/3



Ill. Niklas Elmehed © Nobel Prize Outreach  
**John F. Clauser**  
Prize share: 1/3



Ill. Niklas Elmehed © Nobel Prize Outreach  
**Anton Zeilinger**  
Prize share: 1/3

“Für Experimente mit *verschränkten* Photonen, die die Verletzung der Bellschen Ungleichungen nachweisen und den Weg für die Quanteninformationswissenschaft ebnen.”

# Der Nobelpreis für Physik 2022



\*1947

Alain Aspect

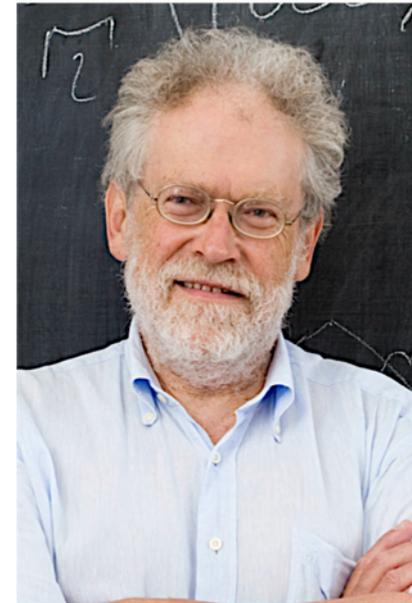
Prize share: 1/3



\*1942

John F. Clauser

Prize share: 1/3



\*1945

Anton Zeilinger

Prize share: 1/3

“Für Experimente mit *verschränkten* Photonen, die die Verletzung der Bell’schen Ungleichungen nachweisen und den Weg für die Quanteninformationswissenschaft ebnen.”

MAY 15, 1935

PHYSICAL REVIEW

VOLUME 47

## Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete?

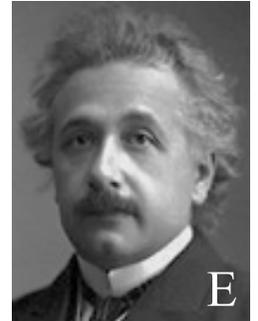
A. EINSTEIN, B. PODOLSKY AND N. ROSEN, *Institute for Advanced Study, Princeton, New Jersey*

(Received March 25, 1935)

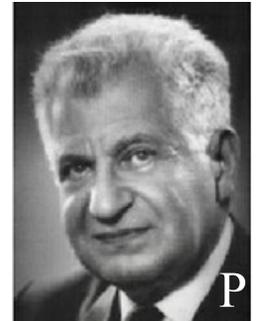
In a complete theory there is an element corresponding to each element of reality. A sufficient condition for the reality of a physical quantity is the possibility of predicting it with certainty, without disturbing the system. In quantum mechanics in the case of two physical quantities described by non-commuting operators, the knowledge of one precludes the knowledge of the other. Then either (1) the description of reality given by the wave function in

quantum mechanics is not complete or (2) these two quantities cannot have simultaneous reality. Consideration of the problem of making predictions concerning a system on the basis of measurements made on another system that had previously interacted with it leads to the result that if (1) is false then (2) is also false. One is thus led to conclude that the description of reality as given by a wave function is not complete.

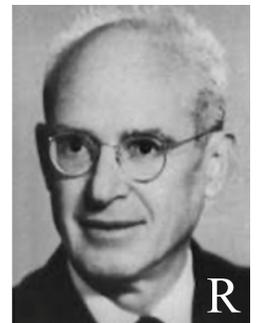
...One is thus led to conclude that the description of reality as given by a wave function is *not* complete!



E



P



R

# „EPR“ in einfachster Analogie

Eine „Würfeltheorie“, nach der „Würfel“ echte Zufallszahlen produzieren, ist zu kritisieren, wenn dieselbe Theorie auch Paare dieser Würfeln ermöglicht, die immer ein Pasch produzieren.



# Der echte Zufall / der „Quantenzufall“

In der Tat!

Nach der Quantentheorie gibt es Dinge, die ohne Grund und ohne Anlass passieren.

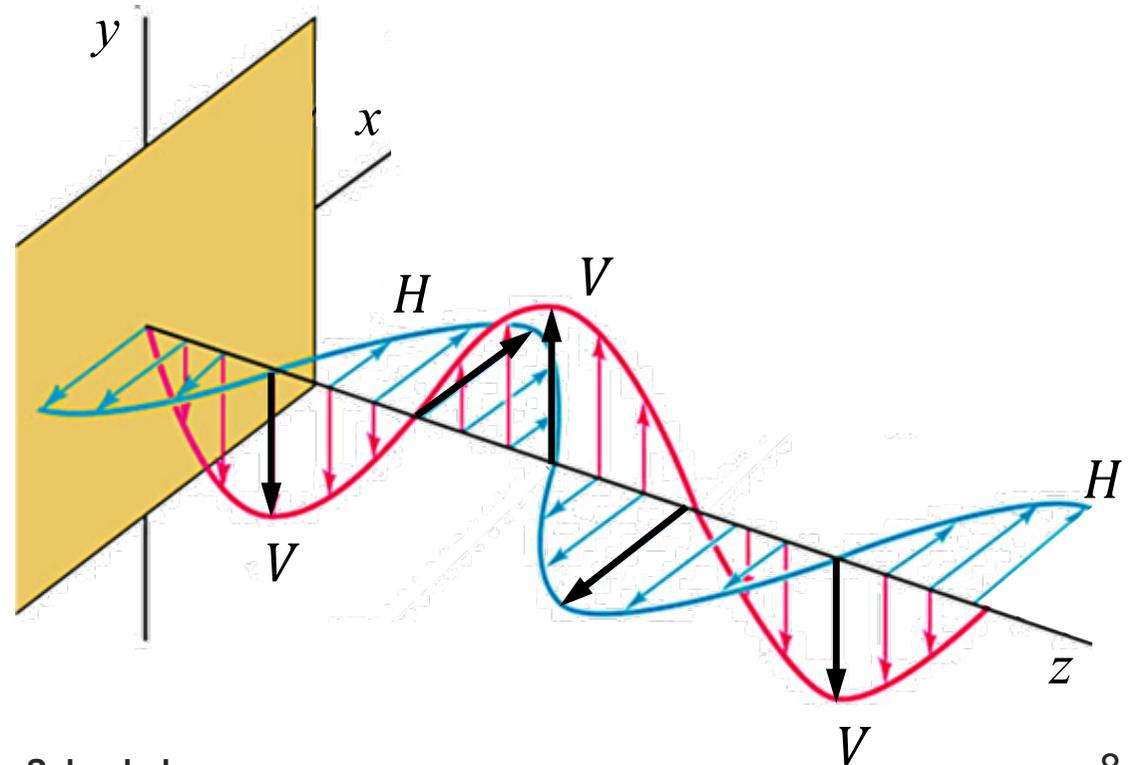
Denn die Quantentheorie beinhaltet den quantisierten Energieübertrag beim Messen und beinhaltet den Welle-Teilchen-Dualismus.

Beispiel:

Licht breitet sich als Welle aus und hat eine Polarisation.

- Blau: horizontal polarisierte Teilwelle
- Rot: vertikal polarisierte

Trifft H- oder V-polarisiertes Licht auf einen Polarisator unter  $45^\circ$ , so muss es echter Zufall sein, in welchem Ausgang ein Photon gemessen wird.



# 1935: Das EPR-Gedankenexperiment

Das Original-EPR-Gedankenexperiment von 1935 betrachtet Orts- und Impulsmessungen zweier Partikel.

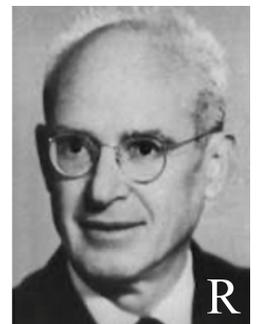
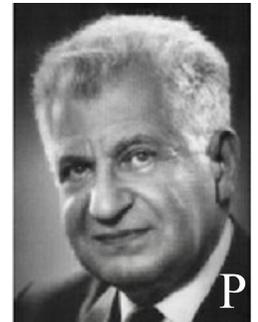
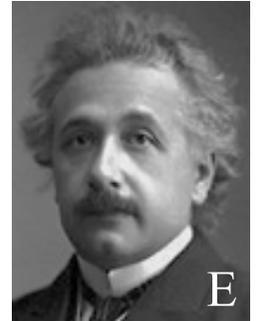
Eingängiger sind Polarisationsmessungen an zwei Photonen:

Nach der Quantentheorie gibt es zwei Photonen „A“ und „B“, deren Polarisierungen vollständig durch diese Wellenfunktion beschrieben ist:

$$|\phi^+\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (|V_A V_B\rangle + |H_A H_B\rangle) = \frac{1}{\sqrt{2}} (|D_A D_B\rangle + |D_A^- D_B^-\rangle)$$

Die einzigen Aussage dieser Wellenfunktion, dass die lineare Polarisation zweier Photonen immer gleich ist, egal ob man sie durch einen Polarisator schickt, der in  $V$  und  $H$  unterscheidet oder in einen der in  $D$  ( $45^\circ$ ) und  $D^-$  ( $-45^\circ$ ) unterscheidet.

Aber ist das möglich? EPR: „Nein!“



# Experiment von John F. Clauser

## Experimental Test of Local Hidden-Variable Theories\*

Stuart J. Freedman and John F. Clauser

*Department of Physics and Lawrence Berkeley Laboratory, University of California, Berkeley, California 94720*

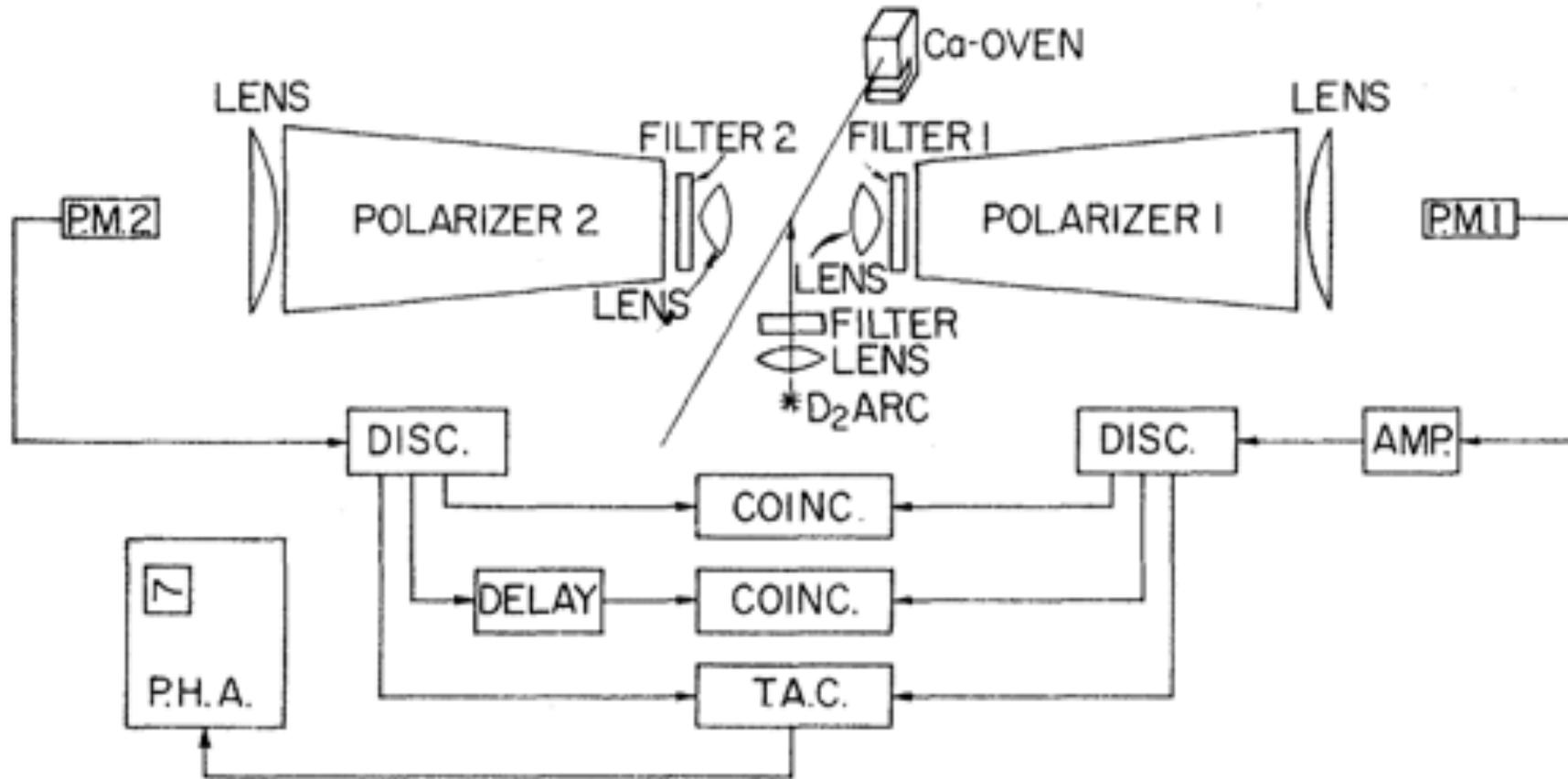
(Received 4 February 1972)

We have measured the linear polarization correlation of the photons emitted in an atomic cascade of calcium. It has been shown by a generalization of Bell's inequality that the existence of local hidden variables imposes restrictions on this correlation in conflict with the predictions of quantum mechanics. Our data, in agreement with quantum mechanics, violate these restrictions to high statistical accuracy, thus providing strong evidence against local hidden-variable theories.

Das Experiment bestätigte die Quantentheorie als vollständig:  
Das was die Quantentheorie nicht angibt, passiert tatsächlich ohne Grund.

[Physical Review Letters **28**, 938 (1972)]

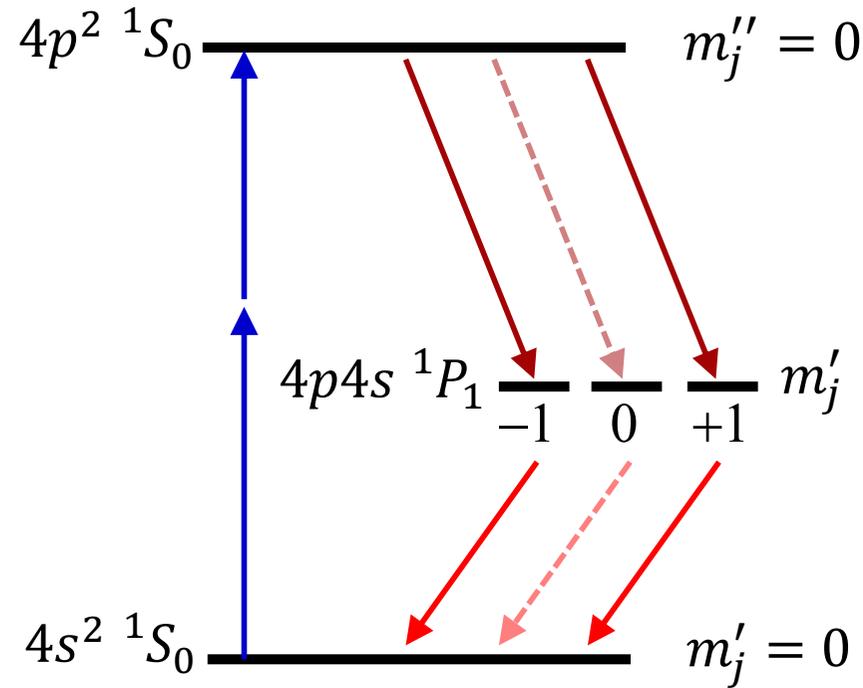
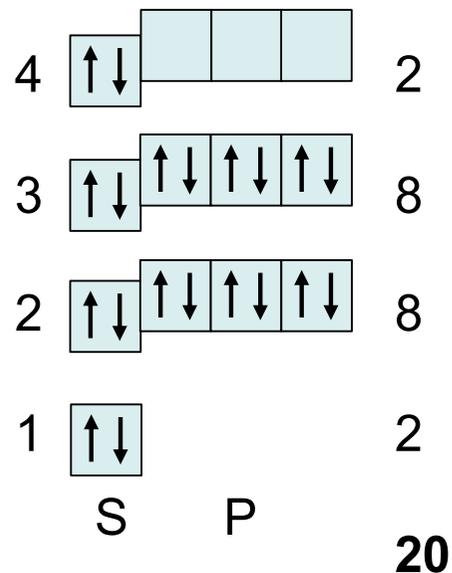
# Experiment von John F. Clauser



[Physical Review Letters **28**, 938 (1972)]

# Experiment von John F. Clauser

Das Kalziumatom hat Ordnungszahl 20. Der Grundzustand hat folgende Schalenbesetzung:



Die QT lässt offen, über welchen Weg die 2-Photonen-Fluoreszenz läuft.

Das Experiment zeigte, dass die QT nicht um diese Information erweiterbar ist.

Anders als von EPR vermutet, ist die QT vollständig.

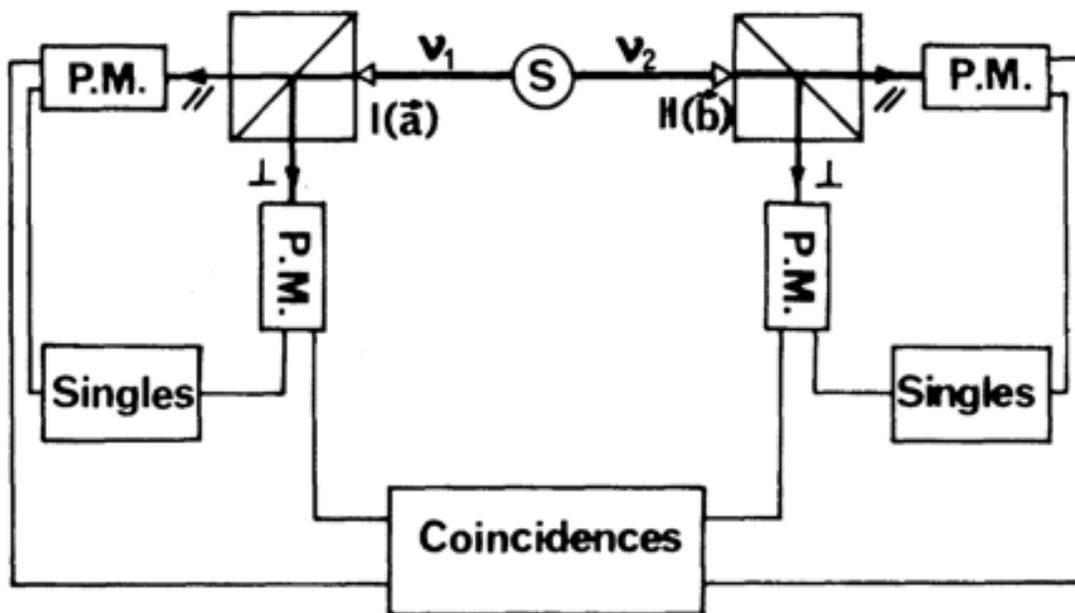
[Physical Review Letters **28**, 938 (1972)]

# Experiment von Alain Aspect

## Experimental Realization of Einstein-Podolsky-Rosen-Bohm *Gedankenexperiment*: A New Violation of Bell's Inequalities

Alain Aspect, Philippe Grangier, and Gérard Roger

*Institut d'Optique Théorique et Appliquée, Laboratoire associé au Centre National de la Recherche Scientifique,  
Université Paris-Sud, F-91406 Orsay, France*



Wenn die QT erweiterbar wäre, würde für die „4-Detektor-Korrelation“  $S$  gelten:

Bell'sche Ungleichung:  $-2 \leq S \leq 2$

Gemessen:  $S_{\text{expt}} = 2.697 \pm 0.015$

Die QT sagt:  $S_{\text{QM}} = 2.70 \pm 0.05$

[Physical Review Letters **249**, 91 (1982)]

# Experiment von Anton Zeilinger

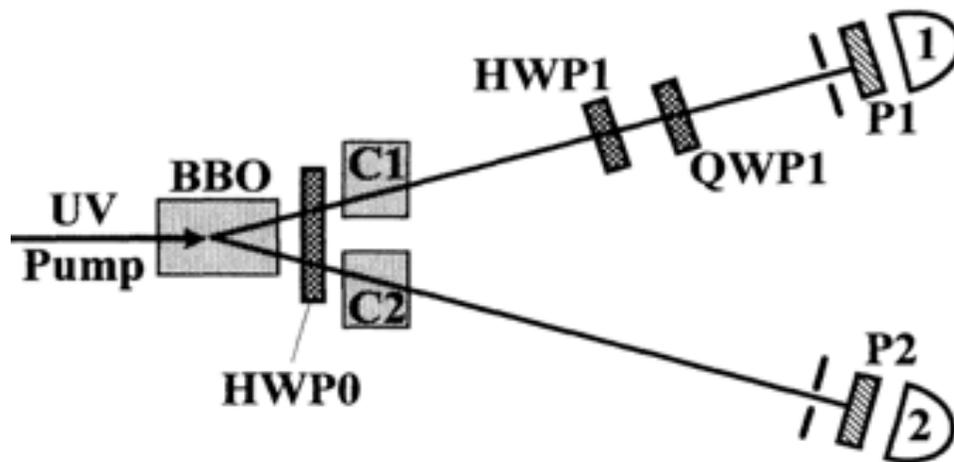
## New High-Intensity Source of Polarization-Entangled Photon Pairs

Paul G. Kwiat,\* Klaus Mattle, Harald Weinfurter, and Anton Zeilinger

*Institut für Experimentalphysik, Universität Innsbruck, Technikerstrasse 25, 6020 Innsbruck, Austria*

Alexander V. Sergienko and Yanhua Shih

*Department of Physics, University of Maryland Baltimore County, Baltimore, Maryland 21228*



Wenn die QT erweiterbar wäre, würde für die „4-Detektor-Korrelation“  $S$  gelten:

Bell'sche Ungleichung:  $-2 \leq S \leq 2$

Gemessen:  $S_{\text{expt}} = -2.6900 \pm 0.0066$

[Physical Review Letters **75**, 4337 (1995)]

# Ergebnisse der Experimente

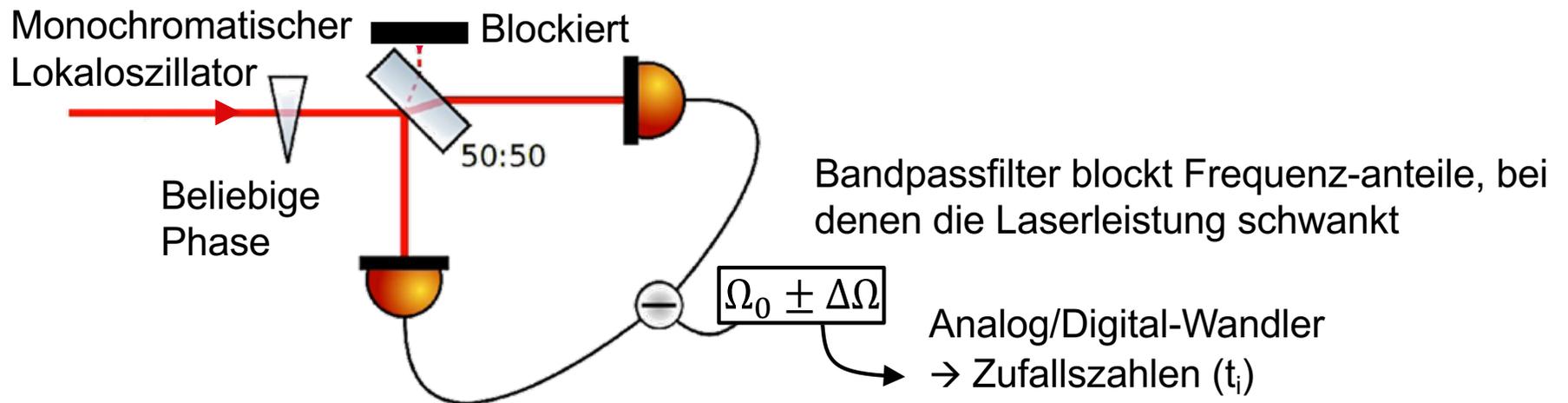
- Messergebnisse, die die Quantentheorie nicht vorhersagt, sind prinzipiell nicht vorhersagbar. Sie passieren ohne Grund. Sie sind „echt zufällig“.
- Es gibt Verschränkung: Zwei (mehrere) Messergebnisse können korreliert, z.B. identisch sein, aber dennoch echt zufällig.
- Beispiel: spontane Paarerzeugung!
- Konkretes Beispiel: radioaktiver Zerfall. Die QT sagt nicht voraus, wann ein Uran-238-Atom in zwei Teile zerfällt. Sowohl das Thorium-234-Atom als auch das Alphateilchen entstehen echt zufällig, aber korreliert. Die Entstehungszeitpunkte sind verschränkt.
- Die Vermutung, dass in jedem Uran-238 bereits festgelegt sein könnte, wann es zerfällt, ist damit widerlegt.
- “Der Alte“ würfelt doch!

# Folgen daraus neue Technologien?

Quantentechnologien nutzen

- a) echte Zufallszahlen aus der Quantenphysik für *Quantenzufallszahlengenerator* und
- b) die Korrelationen zwischen zwei Serien von Zufallszahlen (verschränktes Quantenrauschen) für Quantenkryptographie
- c) Korrelationen in einer Serie von Zufallszahlen (gequetschtes Quantenrauschen) für Gravitationswellendetektoren
- d) komplexe Verschränkung für Quantencomputer

## a) Der Quantenzufallszahlengenerator

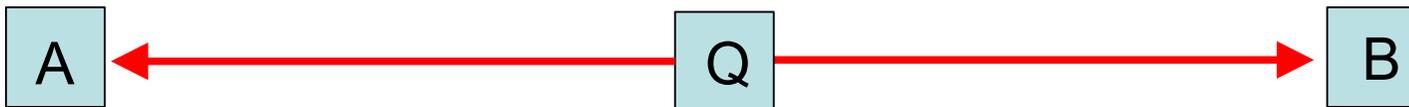


## b) Quantenkryptographie / Quantenschlüsselverteilung

Kommunikation kann nicht entschlüsselt werden, wenn Sender „A“ und Empfänger „B“ einen geheimen Schlüssel aus echt zufälligen Nullen und Einsen einmalig verwenden.

Ein solcher Schlüssel kann mit wenig Aufwand erzeugt werden, wenn „A“ und „B“ Messungen an einem Ensemble verschränkter Zustände machen.

Beispiel: Polarisationsverschränkte Photonenpaare!



Wenn beide H-Polarisation oder diagonale messen: „null“

Wenn beide V-Polarisation oder –diagonale messen: „eins“

Wenn die Quantenkorrelation schlechter als perfekt ist, können sie berechnen, wieviel abgehört wurde und die Daten entsprechend verarbeiten.

## c) Verbesserte Messungen / Gravitationswellenobservatorien

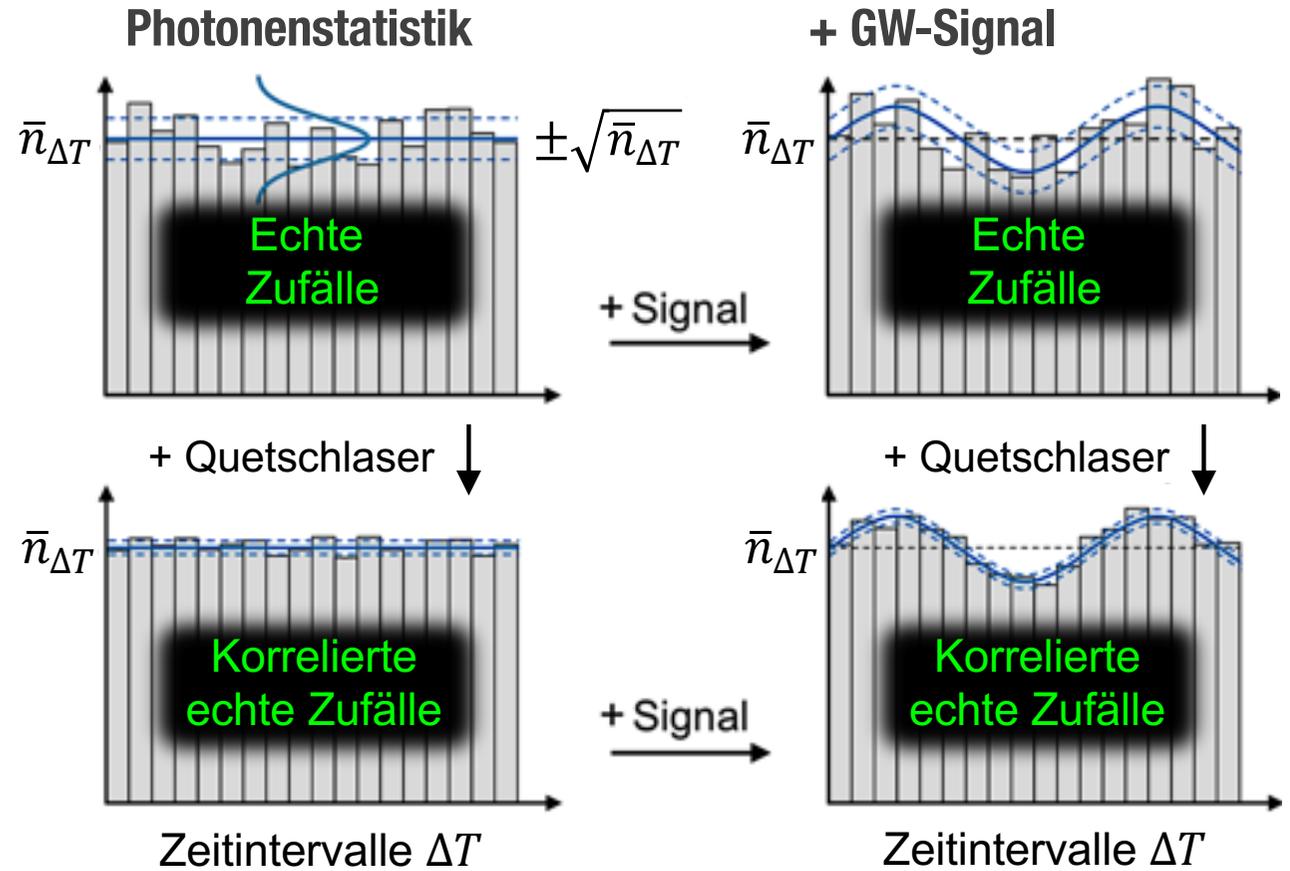
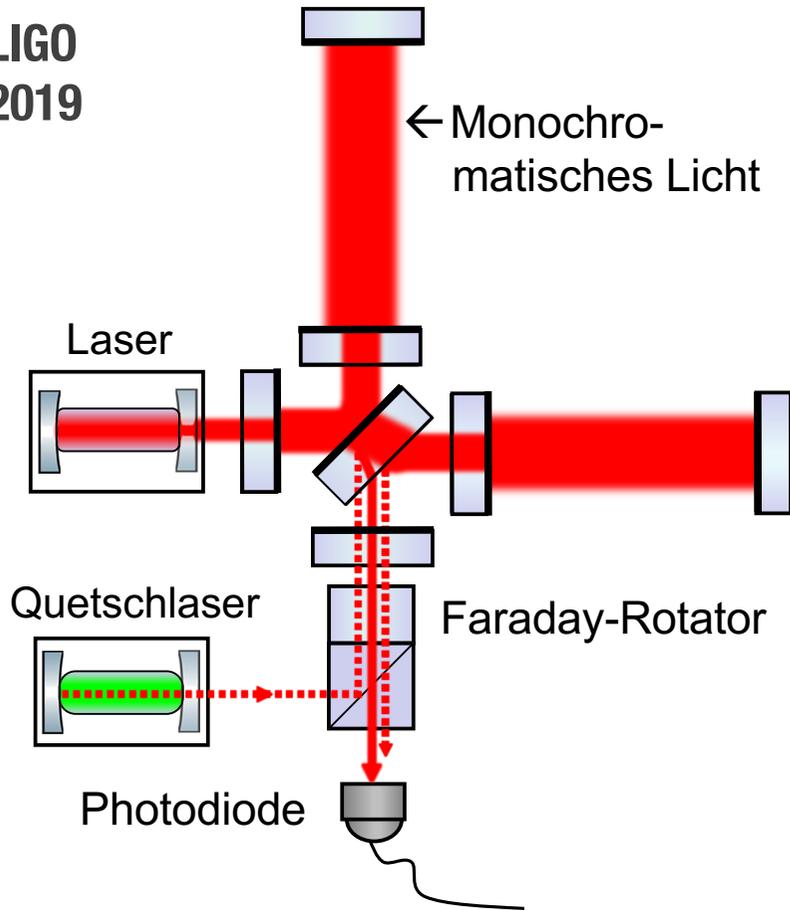
Alle Messungen sind gestört durch hintergründiges Quantenrauschen.  
Gravitationswellenobservatorien messen kontinuierlich und sind gestört durch die unscharfe Photonenzahl pro Messzeitintervall (z.B.  $10\mu\text{s}$ ).

LIGO Livingston / USA



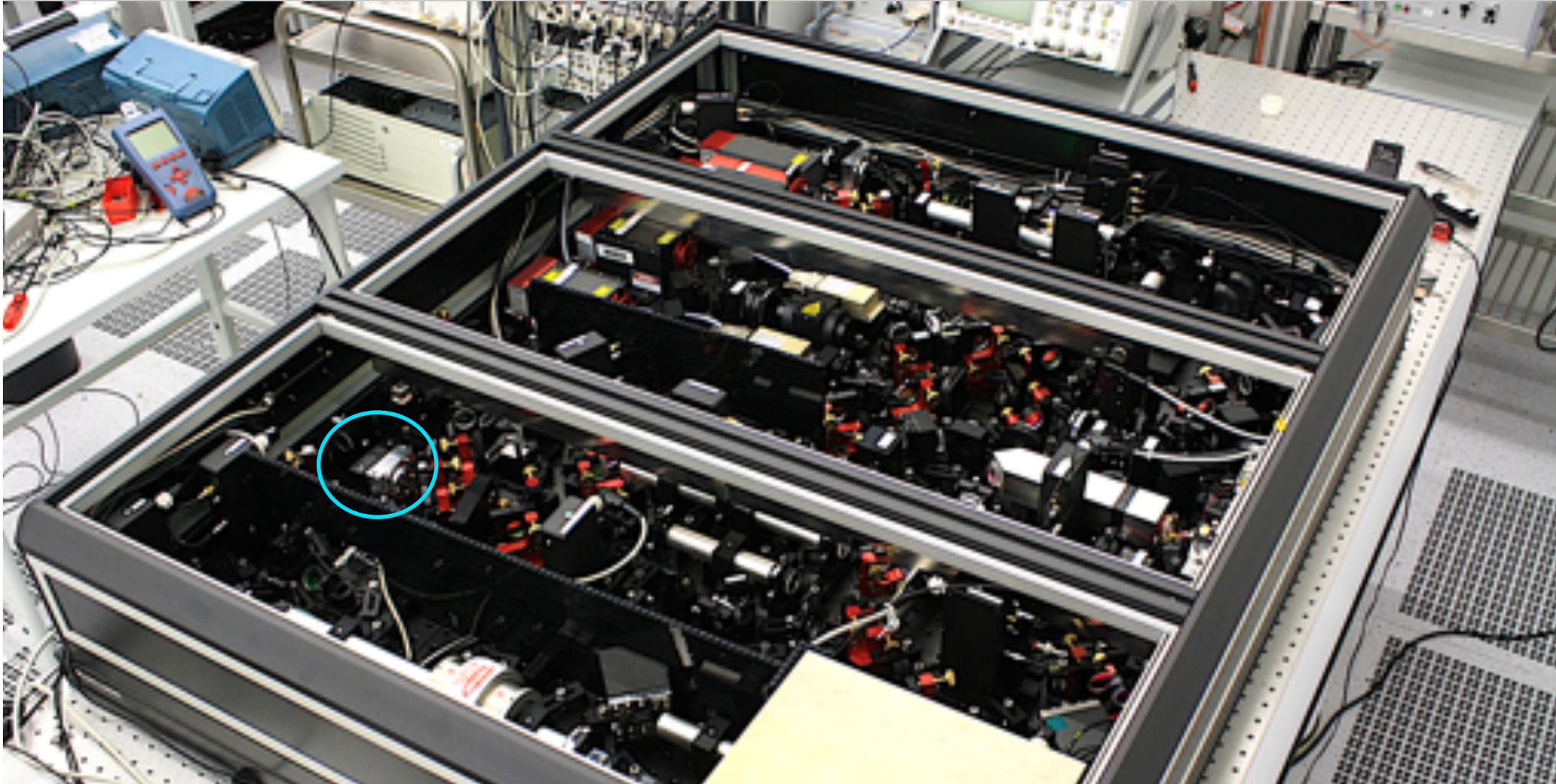
# Photonen tauchen zufällig auf !

LIGO  
2019

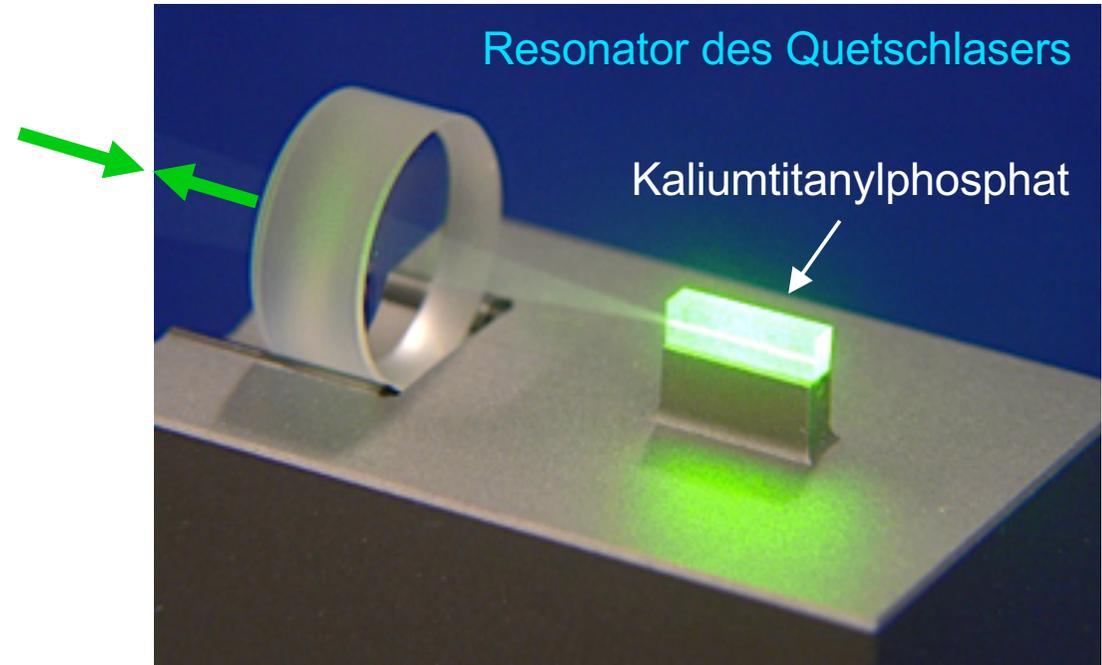
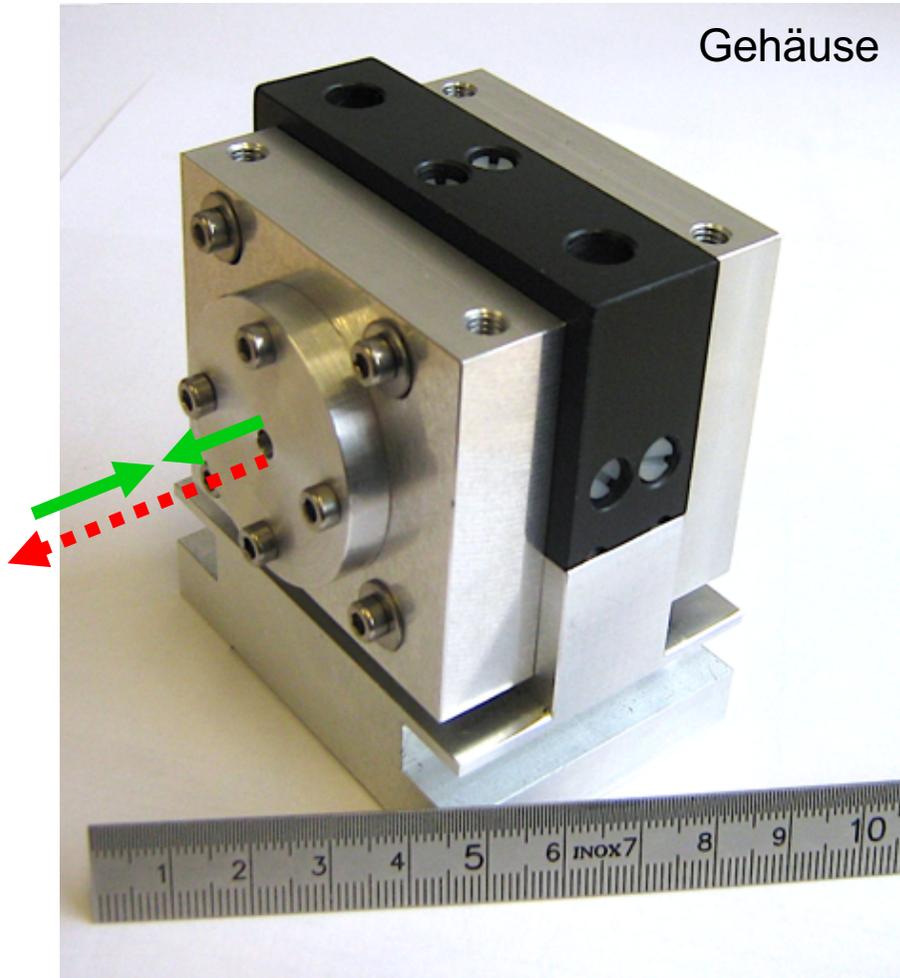


Aufgrund der Mathematik der Fourier-Transformation  
muss die Statistik weiterhin echt zufällig sein!

# Unser Quetschlaser für GEO600 (2010)



# Der Quetschlaser



Pumpfeld bei 532nm regt den Kristall zur Emission von **gequetschtem Licht bei 1064nm** an.

# Der Quetschlaser für GEO600 (2010)



# Verbesserung von LIGO und Virgo (2019)

PHYSICAL REVIEW LETTERS **123**, 231107 (2019)

---

Featured in Physics

## Quantum-Enhanced Advanced LIGO Detectors in the Era of Gravitational-Wave Astronomy

The Laser Interferometer Gravitational Wave Observatory (LIGO) has been directly detecting gravitational waves from compact binary mergers since 2015. We report on the first use of squeezed vacuum states in the direct measurement of gravitational waves with the Advanced LIGO H1 and L1 detectors. This achievement is the culmination of decades of research to implement squeezed states in gravitational-wave detectors. During the ongoing O3 observation run, squeezed states are improving the sensitivity of the LIGO interferometers to signals above 50 Hz by up to 3 dB, thereby increasing the expected detection rate by 40% (H1) and 50% (L1).

PHYSICAL REVIEW LETTERS **123**, 231108 (2019)

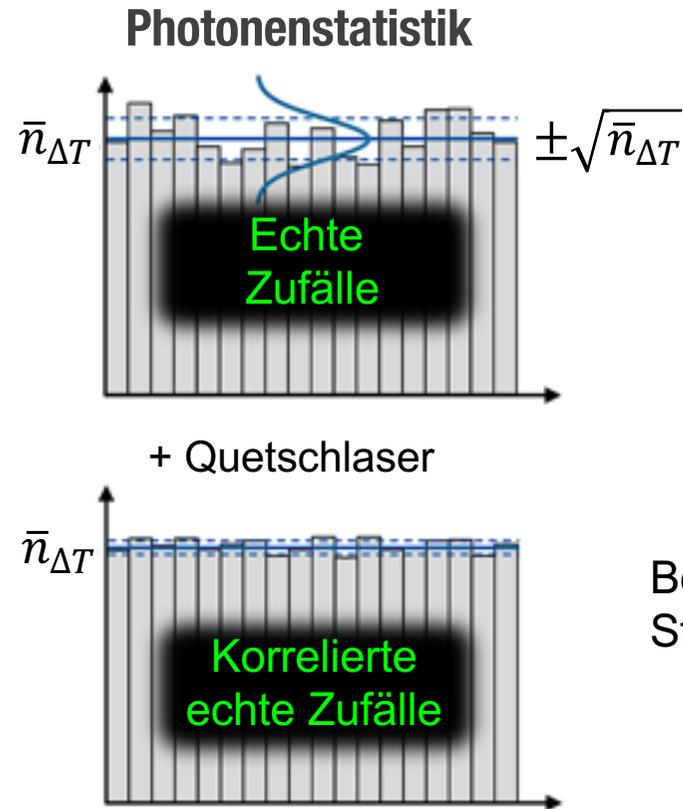
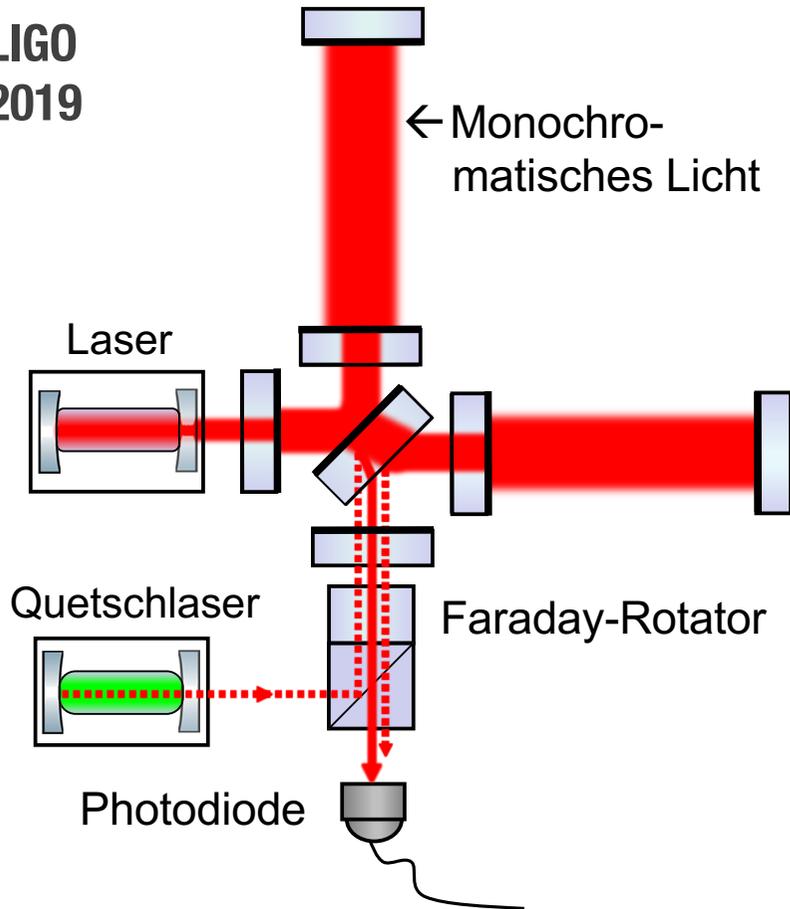
---

Featured in Physics

## Increasing the Astrophysical Reach of the Advanced Virgo Detector via the Application of Squeezed Vacuum States of Light

# Photonen tauchen zufällig auf !

LIGO  
2019



Beim Quetschlaser ist die Standardabweichung  $< \sqrt{\bar{n}_{\Delta T}}$

R. Schnabel, Physik in Unserer Zeit 3/2021 (52), S.130

# Illustration gequetschter Zufallszahlen

Die Zufallsstatistik ist enger: Sie ist „gequetscht“.

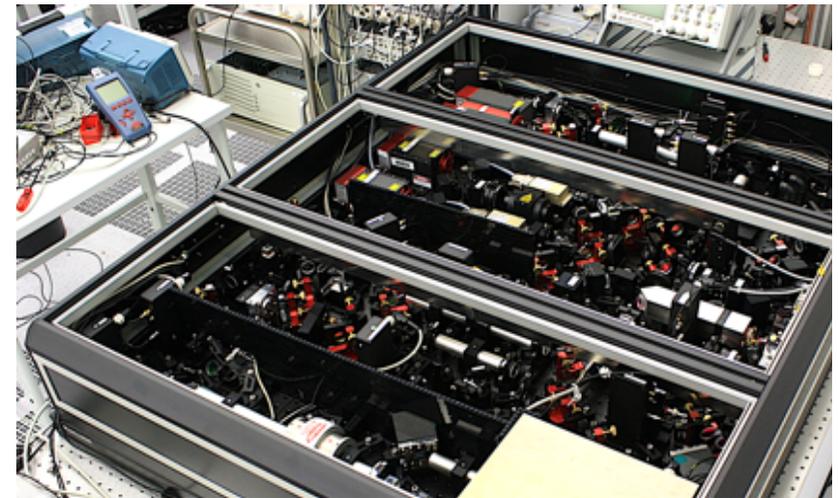
Nach Ablauf der Kohärenzzeit kann sich der Mittelwert ändern, z.B. könnten die Zahlen um die 5 fluktuieren.

Doch! Alle Photonenanzahlen sind echt zufällig, aber die Zufälle korreliert: „Quantenkorrelationen!“



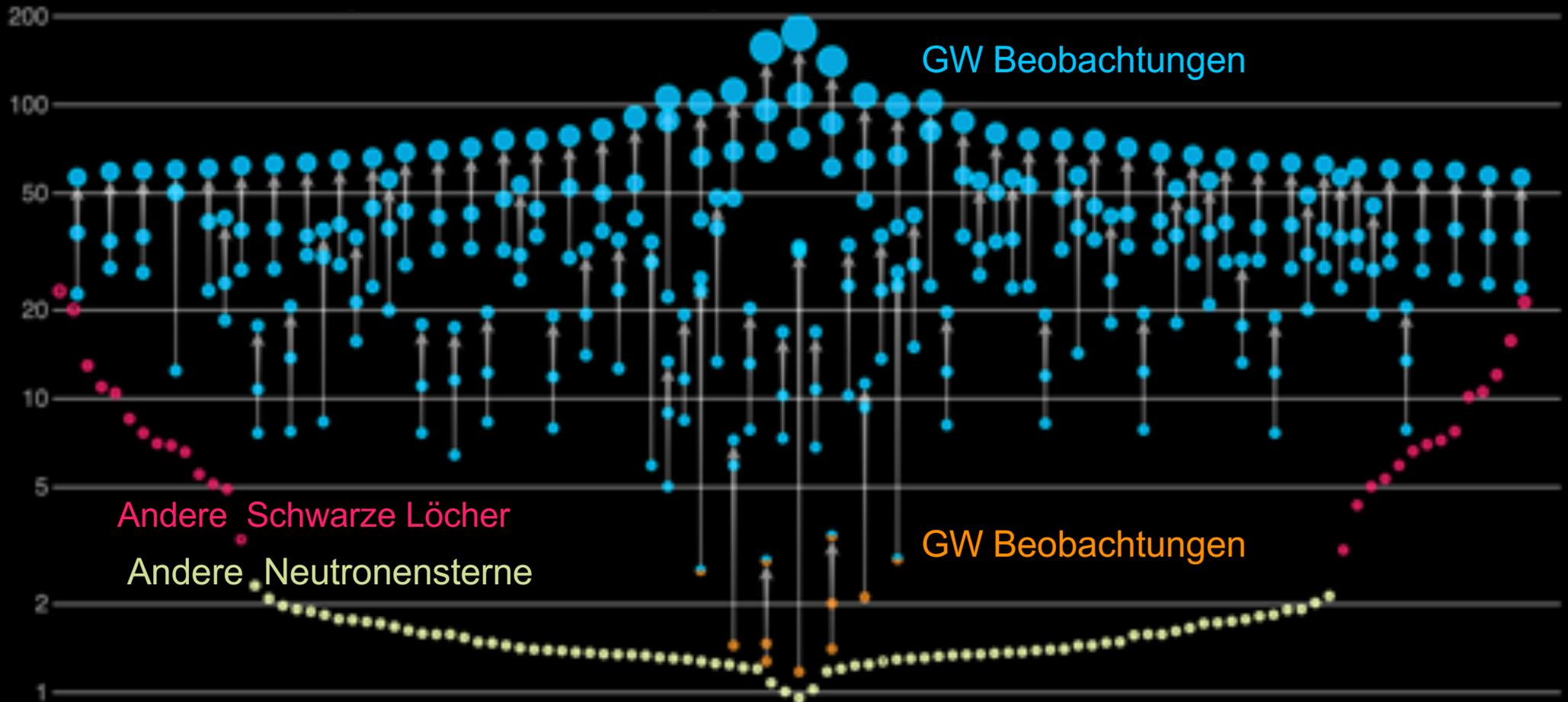
Dann sind die Zahlen vorbestimmt!

Nein, denn auch der Mittelwert ist zufällig.



# Beobachtungen seit 2019 sind mit gequetschtem Licht erfolgt

Sonnenmassen



Andere Schwarze Löcher

Andere Neutronensterne

GW Beobachtungen

GW Beobachtungen

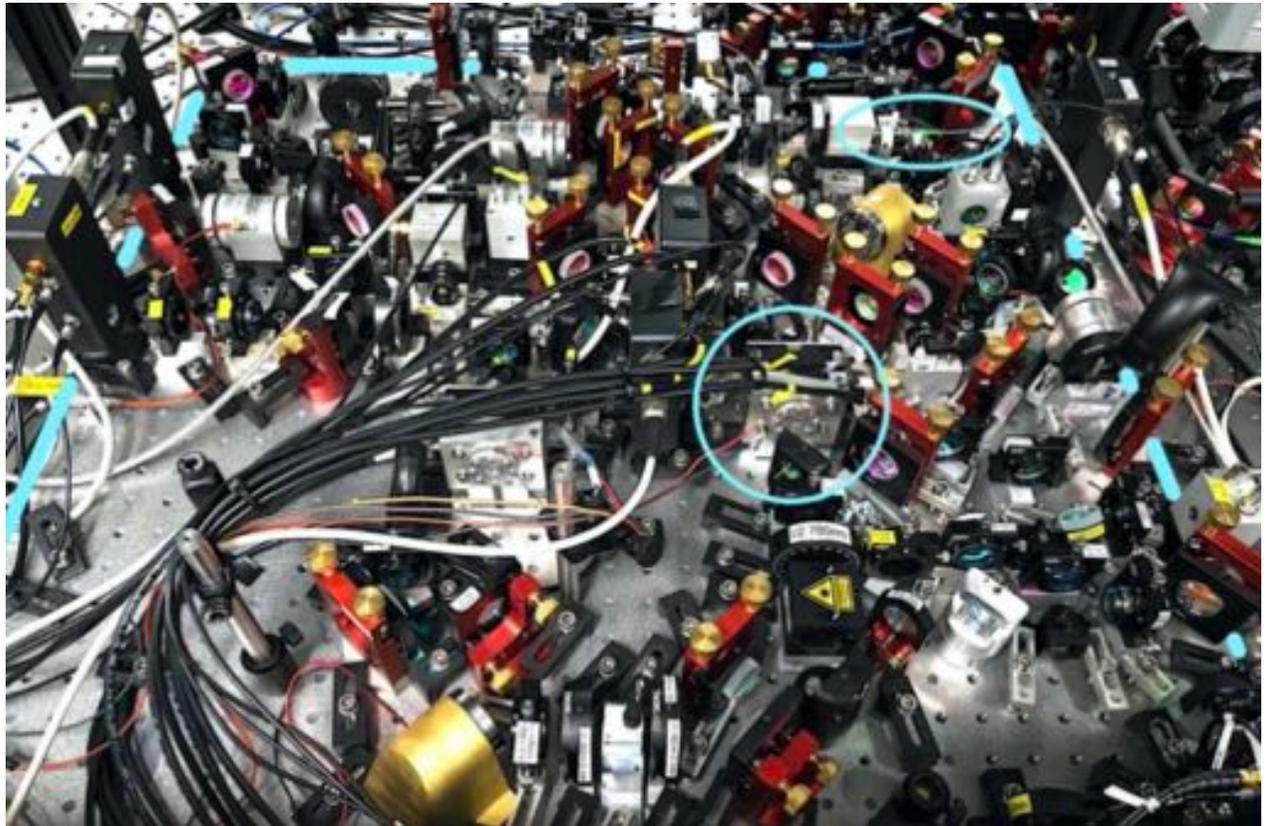
# UHH Ausgründung: Noisy Labs GmbH

Seit 2023 kann man erstmalig Quetschlaser kaufen, bei meiner Universitätsausgründung, der *Noisy Labs GmbH*.

## Noisy Labs

Noisy Labs GmbH  
Luruper Hauptstraße 1  
22547 Hamburg

Amtsgericht Hamburg - HRB 181543  
Geschäftsführer: Dr. Axel Schönbeck  
& Dr. Jan Südbeck



Quetschlaser bei 1550nm (80 cm x 80cm)

## Quantenkorreliertes Licht in Gravitationswellen-Observatorien

# Einstein wäre doppelt verblüfft

ROMAN SCHNABEL

*Quantenkorreliertes Licht offenbart die ganze Eigenart der Quantenphysik. Als völlig neue Hochtechnologie hat es sich nun in Gravitationswellen-Observatorien erstmals als kostengünstiger im Vergleich zu Alternativen erwiesen.*

130 | *Phys. Unserer Zeit* | 3/2021 (52)

**Online-Ausgabe unter:  
[wileyonlinelibrary.com](http://wileyonlinelibrary.com)**

© 2021 The Authors. *Physik in unserer Zeit* published by  
Wiley-VCH GmbH



# Zusammenfassung

- In der (mikroskopischen) Natur können Ereignisse ohne Grund passieren.
- Von Quantenkorrelationen spricht man, wenn solche Ereignisse aufgrund von Erhaltungssätzen mehrere Quanten produzieren, Bsp.: radioaktiver Zerfall
- Die Experimente der Nobelpreisträger haben basierend auf der Bell'schen Ungleichung bewiesen, dass auch in diesem Fall die Ereignisse ohne Grund (echt zufällig) passieren.
- Quantenkorrelationen sind ein wichtiger Baustein der neuen Quantentechnologien.
- Beispiele: Quantencomputing, Quantenkryptographie, Quantensensoren (Gravitationswellenobservatorien)

