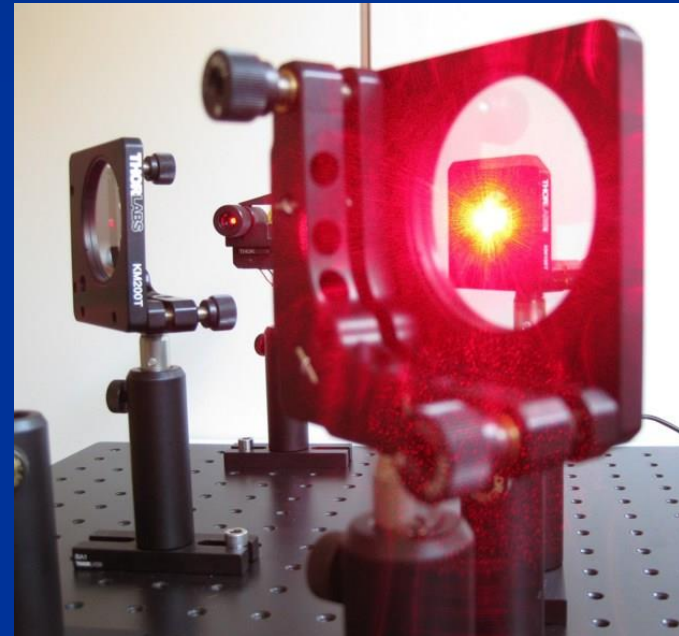


# *Experimente zur Quantenphysik für Schule und Schülerlabor*

*Antje Bergmann*

antje.bergmann@kit.edu

<http://psi.physik.kit.edu>



## Quantenradierer- Analogie

- Doppelspaltexperiment
- Mach-Zehnder-Interferometer

## Photonen

- Messung der Photonstatistik
- Quantenzufallsgenerator

# Quantenradierer – Analogie

# Quantenradierer – worum geht es?

Einzelnes Photon auf Doppelspalt oder Strahlteiler → was passiert da?

- Klassisch vollständig erklärbar
- Aber: Man kann QM-Beschreibung wählen – „Welcher-Weg“ Information
- „Wegmarkierung“ der Quantenobjekte

Möglichkeiten der Durchführung des Analogie-Experiments:

- Doppelspalt (Wegaufteilung durch die Spalte)
- Mach-Zehnder-Interferometer (Wegaufteilung am Strahlteiler)

Was sehe ich am Ausgang vom (klassischen) Interferometer?

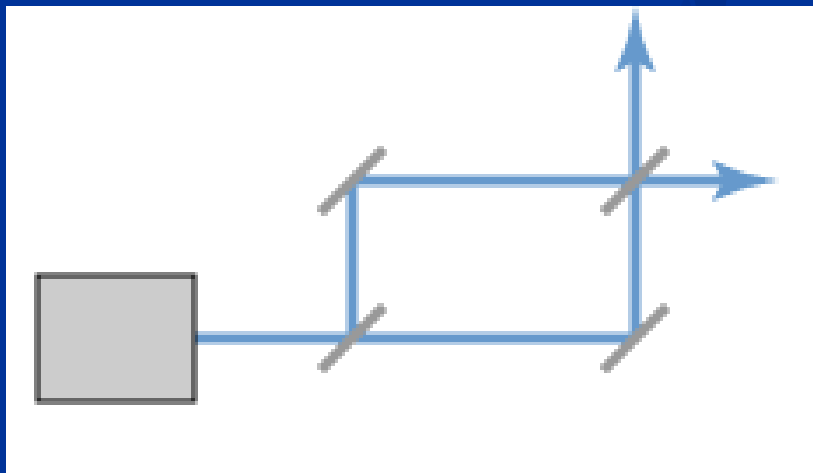
$$I \sim |\vec{E}_1|^2 + |\vec{E}_2|^2 + 2|\vec{E}_1||\vec{E}_2| \cos \delta$$

- Was sehe ich dann, wenn ich nur einzelne Photonen reinschicke?

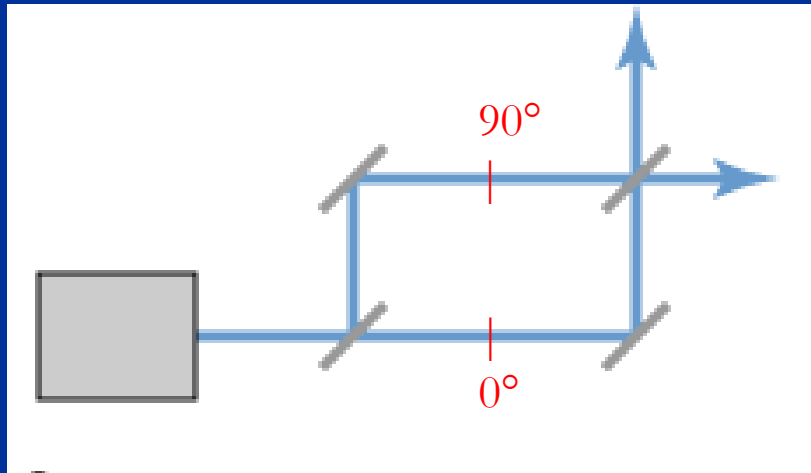
→ Es bildet sich dasselbe Muster.

- Ein Weg des Interferometers = ein möglicher Zustand
- Ich habe keine Weginformation => Zustände überlagern und formen die Interferenz

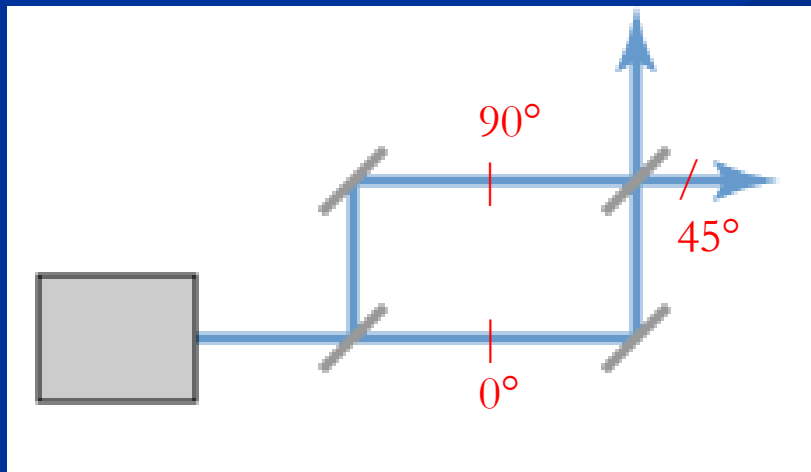
$$I = |\Psi|^2 = |\Psi'_1|^2 + |\Psi'_2|^2 + \textit{Interferenzterm}$$



- Was passiert, wenn ich den Photonen eine Weginformation gebe – und wie mache ich das?
- $0^\circ$  und  $90^\circ$  Polarisator => keine Interferenz!
- Warum?  
=> ich könnte ja am Ausgang eine Polarisationsmessung durchführen, da würde ich  $0^\circ$  oder  $90^\circ$  rausbekommen ... => ich habe eine Weginformation!

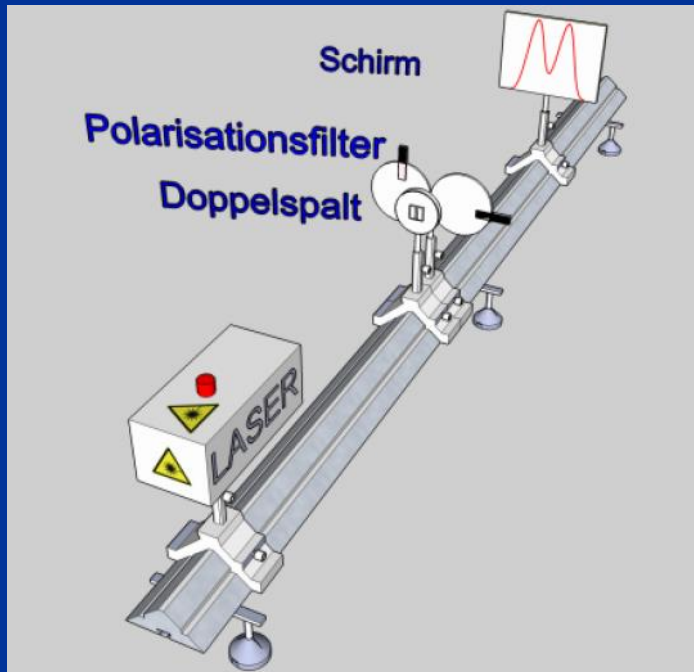


- Aber: Ich kann die Weginformation wieder *ausradieren*!
- 45° Polarisator radiert die Weginformation aus
- Warum? => Wenn ich hinter dem 45°-Polarisator die Polarisation messe, dann bekomme ich als Antwort „45°“ ... => ich habe keine Weginformation!  
Beide Zustände sind gleich wahrscheinlich.
- QM: „Ergebnis“ wird erst zum Zeitpunkt der Messung festgelegt, vorher: überlagerte Zustände

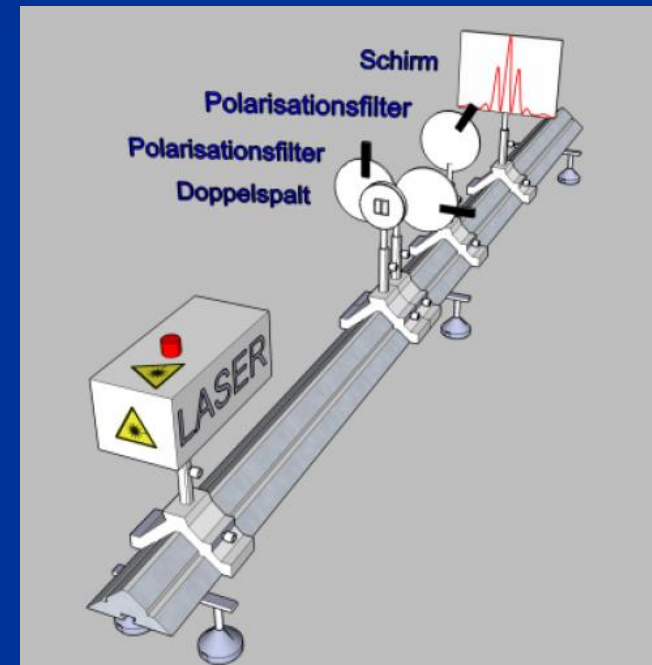


# Praktische Umsetzung im Analogie-Experiment: Quantenradierer am Doppelspalt

Welcher-Weg-Information → keine  
Interferenz



Ununterscheidbare Möglichkeiten →  
Interferenz





# Quantenradierer am Doppelspalt



**Vorteil:** low budget (36,- Euro)

**Nachteil:** schlecht sichtbar + überlagerte Einzelspalt-Beugung...

## Lowest budget Quantenradierer:

„Quantenradierer selbst gemacht“, Hillmer/Kwiat, Spektrum der Wissenschaft, Juli 2007

Kostenloser Download:

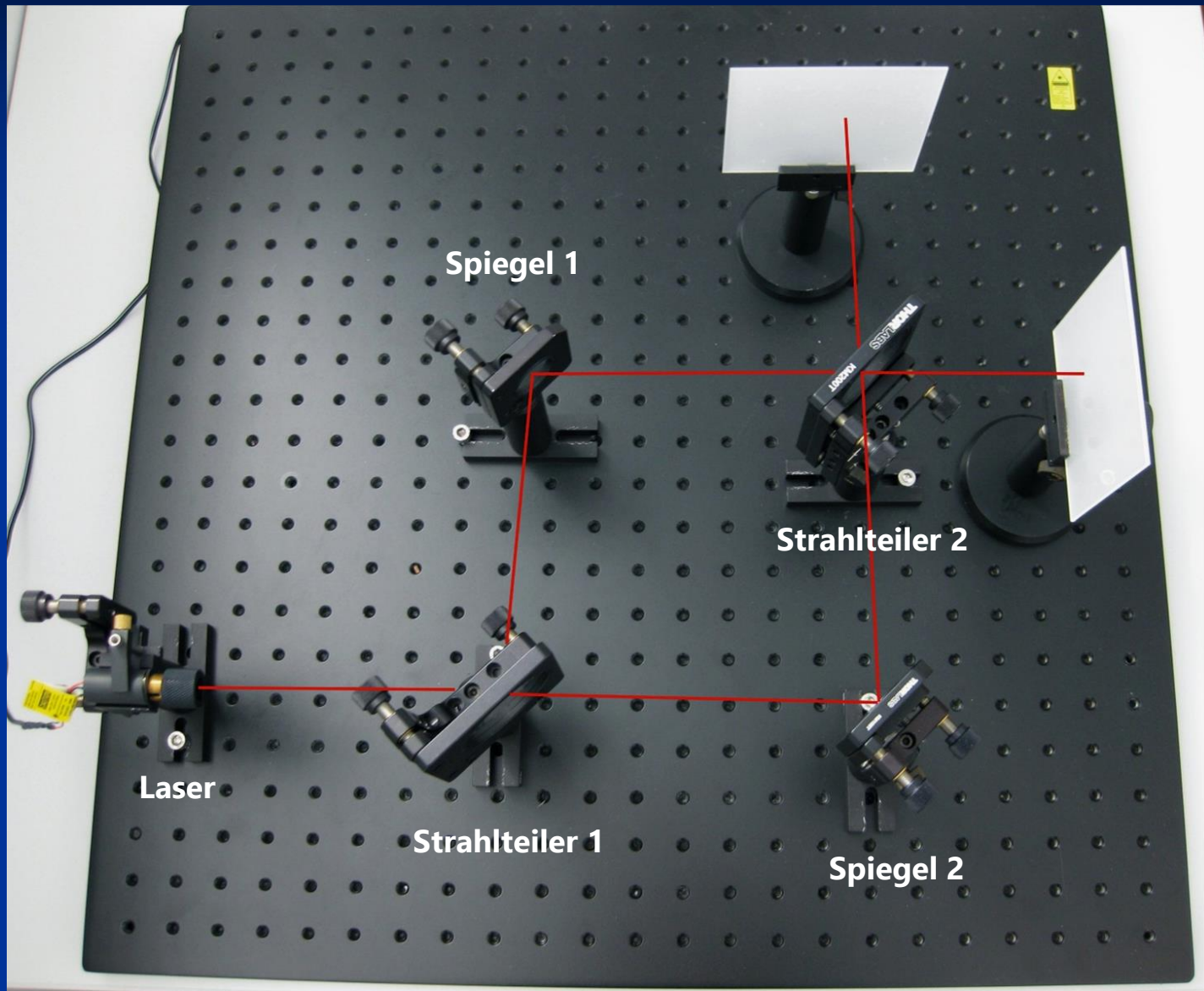
<https://www.spektrum.de/pdf/sdw-07-07-s068-pdf/877069?file>

# Ein Quantenradierer für den Hausgebrauch

**DIE HIER BESCHRIEBENEN SCHRITTE SKIZZIEREN**, welche Effekte man mit dem Quantenradierer beobachten kann. Im Internet finden Sie unter [www.sciam.com/ontheweb](http://www.sciam.com/ontheweb) in englischer Sprache eine genauere Beschreibung und zusätzliche Informationen über die Grundlagen der Interferenz von Wellen.

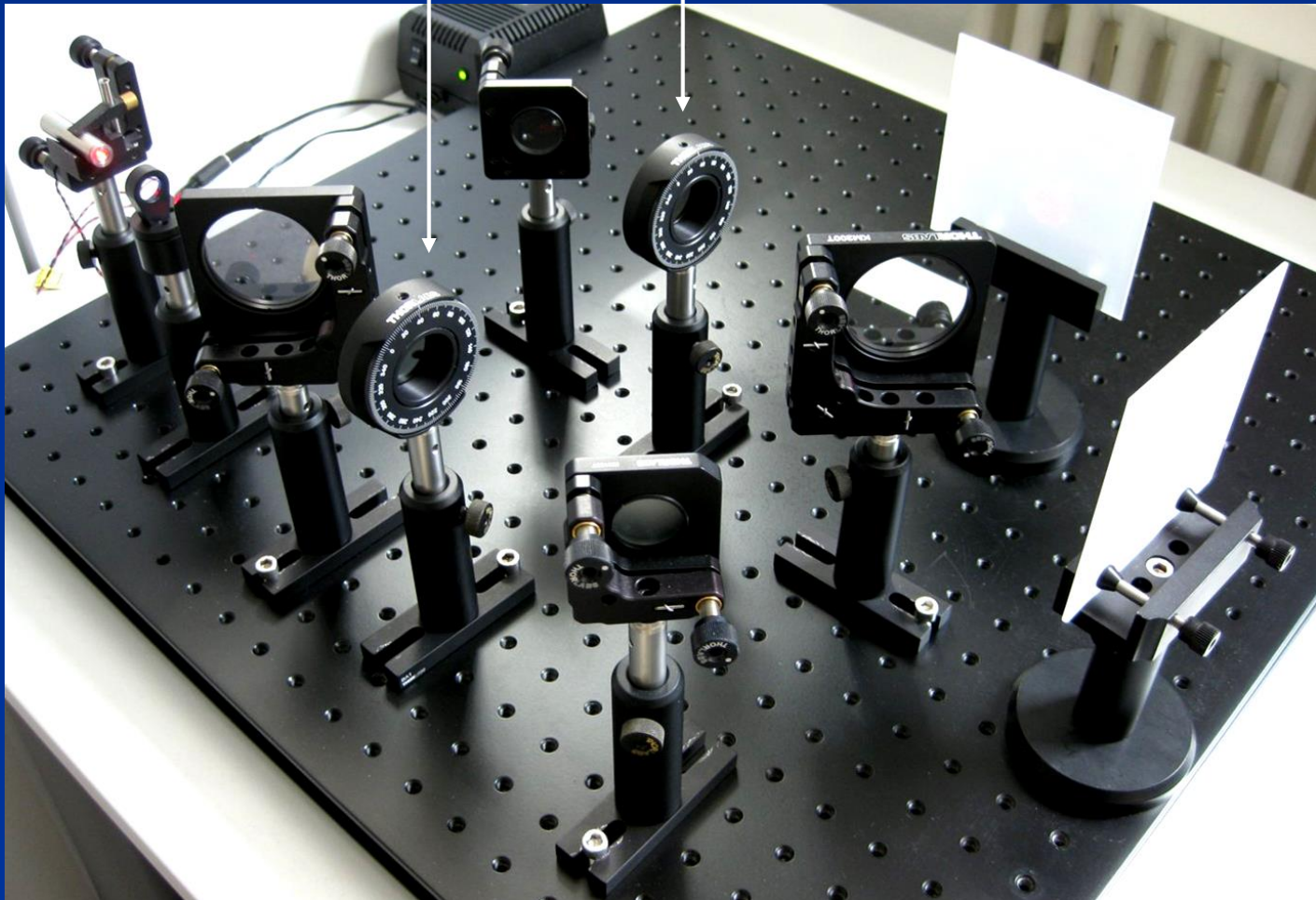


# Mach-Zehnder-Interferometer

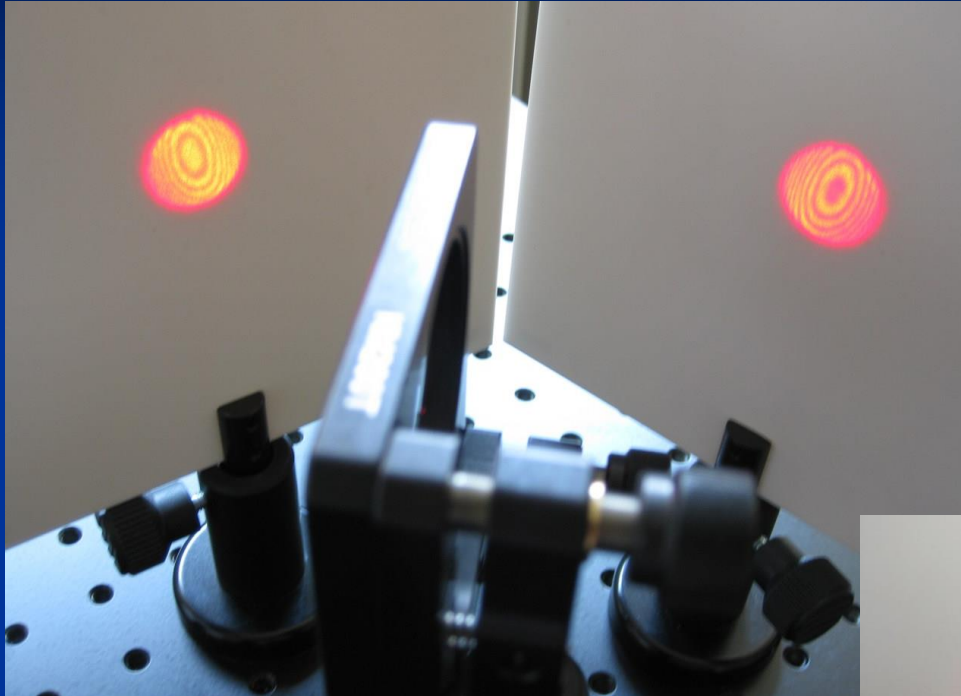


# Mach-Zehnder-Interferometer

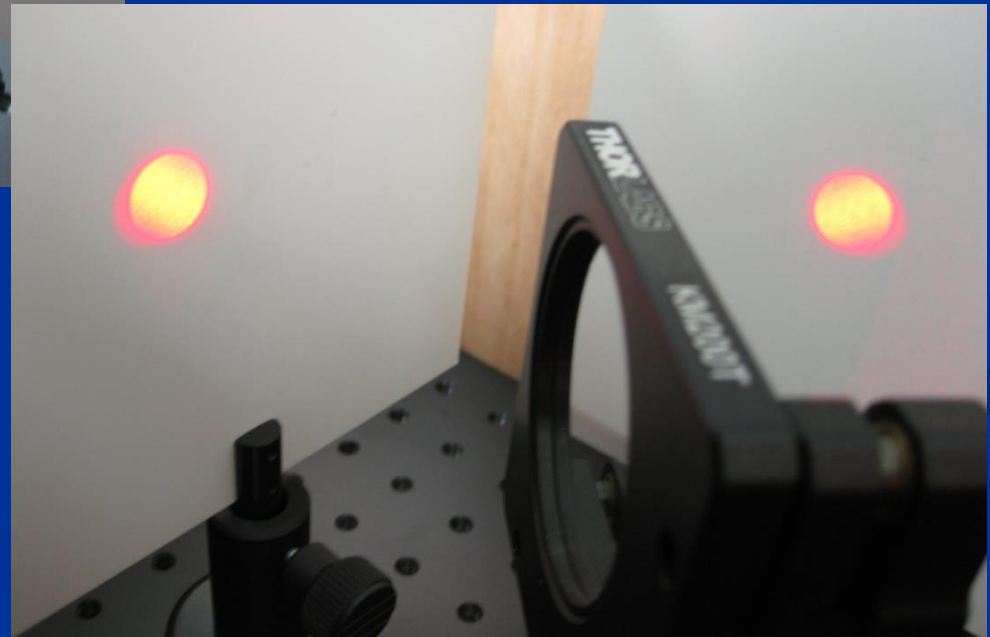
Übergang zur Quantenradierer – Analogie:  
Hinzufügen der Polarisatoren



# Mach-Zehnder-Interferometer



Interferenz



Keine Interferenz

# Hinweis: Echter Quantenradierer mit Einzelphotonen?

Analogie  $\Leftrightarrow$  Laser benutzt

Einzelphotonen:

Laser- oder thermisches Licht sehr stark abschwächen  $\Leftarrow$  NEIN!

Einzelphotonquellen:

Einzelne Atome/Moleküle/Übergänge anregen

Paare erzeugen in nicht-linearen Kristallen



Quelle: qutools.com

# Photonenstatistik

# Photonenstatistik

## Thermisches Licht

Spontane Emission (z.B. Glühlampe) → Stöße zwischen Atomen → starke Fluktuation der Photonenzahl in einem Zeitintervall („bunching“)

→ mittlere Photonenzahl: Bose-Einstein-Verteilung (Super-Poisson-Licht)

## Kohärentes Licht

stimulierte Emission (z.B. (einmodige) Laser); Intensität konstant, voneinander unabhängige Prozesse

→ Poisson-Verteilung

## Einzelphotonen (nicht-klassisches Licht)

Einzelphotonquelle (z.B. bestimmter nichtlinearer Kristall), Mindestzeitspanne zw. Emission zweier Photonen („antibunching“)

→ Messung von Koinzidenzen (Sub-Poisson-Licht)

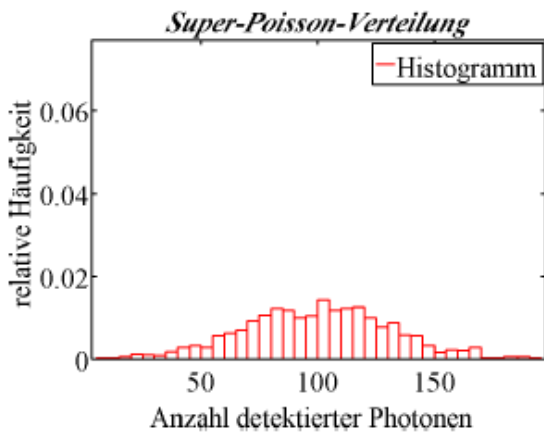
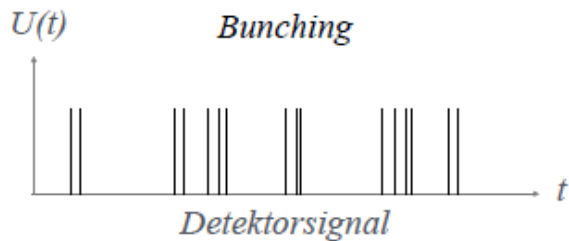


# Photonenstatistik

## Super-Poisson Licht

Thermisches Licht, teilweise kohärent

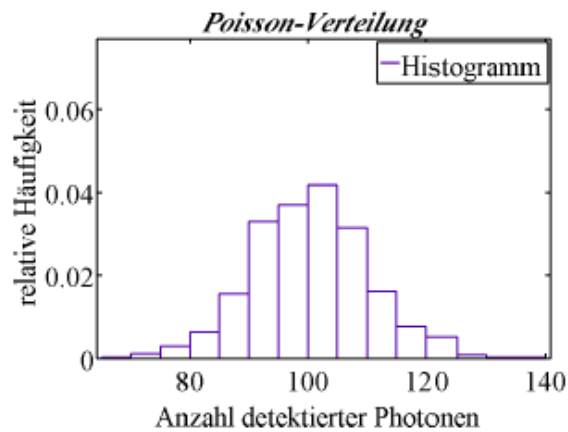
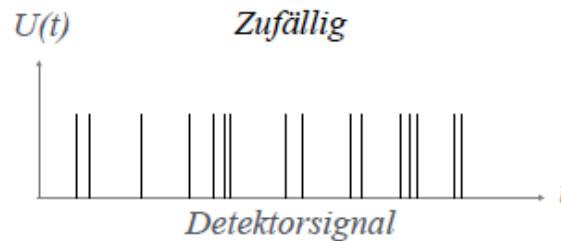
$$\sigma > \sqrt{n}$$



## Poisson Licht

kohärentes Licht

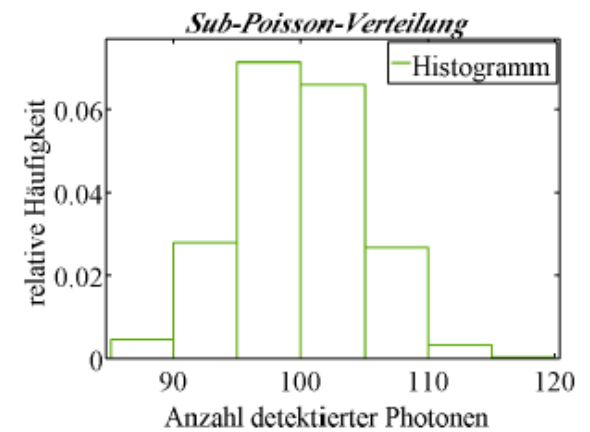
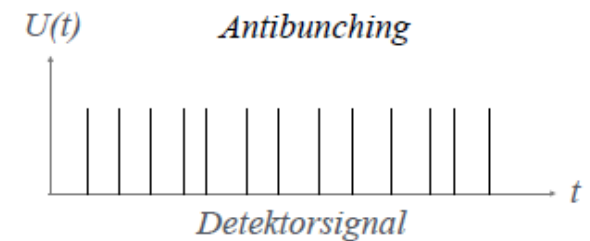
$$\sigma = \sqrt{n}$$



## Sub-Poisson Licht

nicht-klassisches Licht

$$\sigma < \sqrt{n}$$



# Photonenstatistik: Einzelphoton-Detektoren

- **Photomultiplier (PMT)**

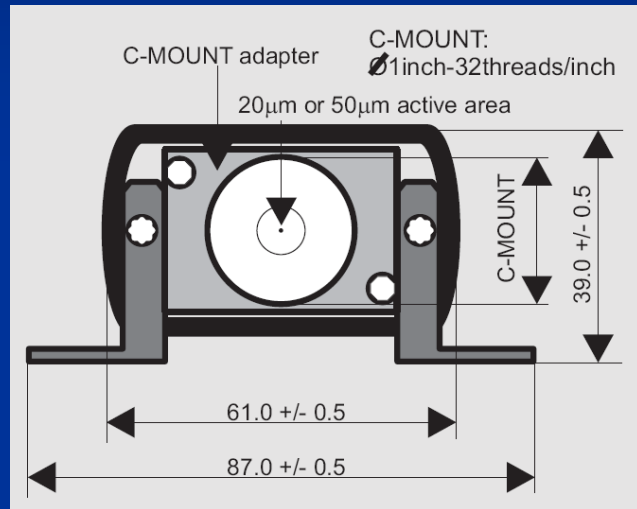
- Elektronenröhre, basiert auf äußerem Fotoeffekt
- geringe Quanteneffizienz
- Hochspannung zum Betrieb erforderlich, extra Netzteil
- Verstärkungsfaktor veränderbar

- **Avalanche-Photodiode (APD)**

- Halbleiter, basiert auf innerem Fotoeffekt
- empfindlich in breitem Spektralbereich (UV – nah-IR)
- bessere Quanteneffizienz
- keine Hochspannung, handliche Bedienung
- normierte Signale

# Avalanche Photodioden - Detektor

## Der Detektor:



## id100-20



- Betrieb im Geiger-Modus
- Detektorfläche  $\varnothing 20 \mu\text{m}$
- Peltier gekühlt
- Kosten ca. 1,5 k€

# Avalanche Photodioden - Detektor

Der Detektor:

id100-20

Kenngößen:

**Quantenausbeute:**

bei 600nm: 20 – 25%

**Dunkelzählrate:** < 60Hz

**Maximale Zählrate:** 20MHz

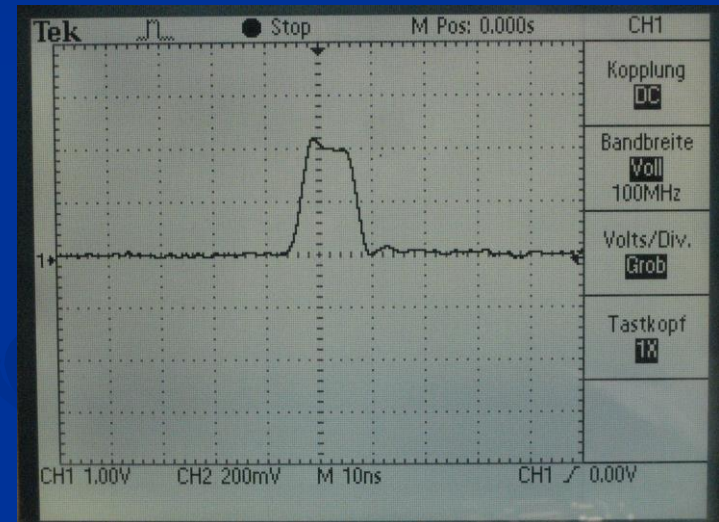
**Ausgabesignal:**

Pulsbreite: 10ns

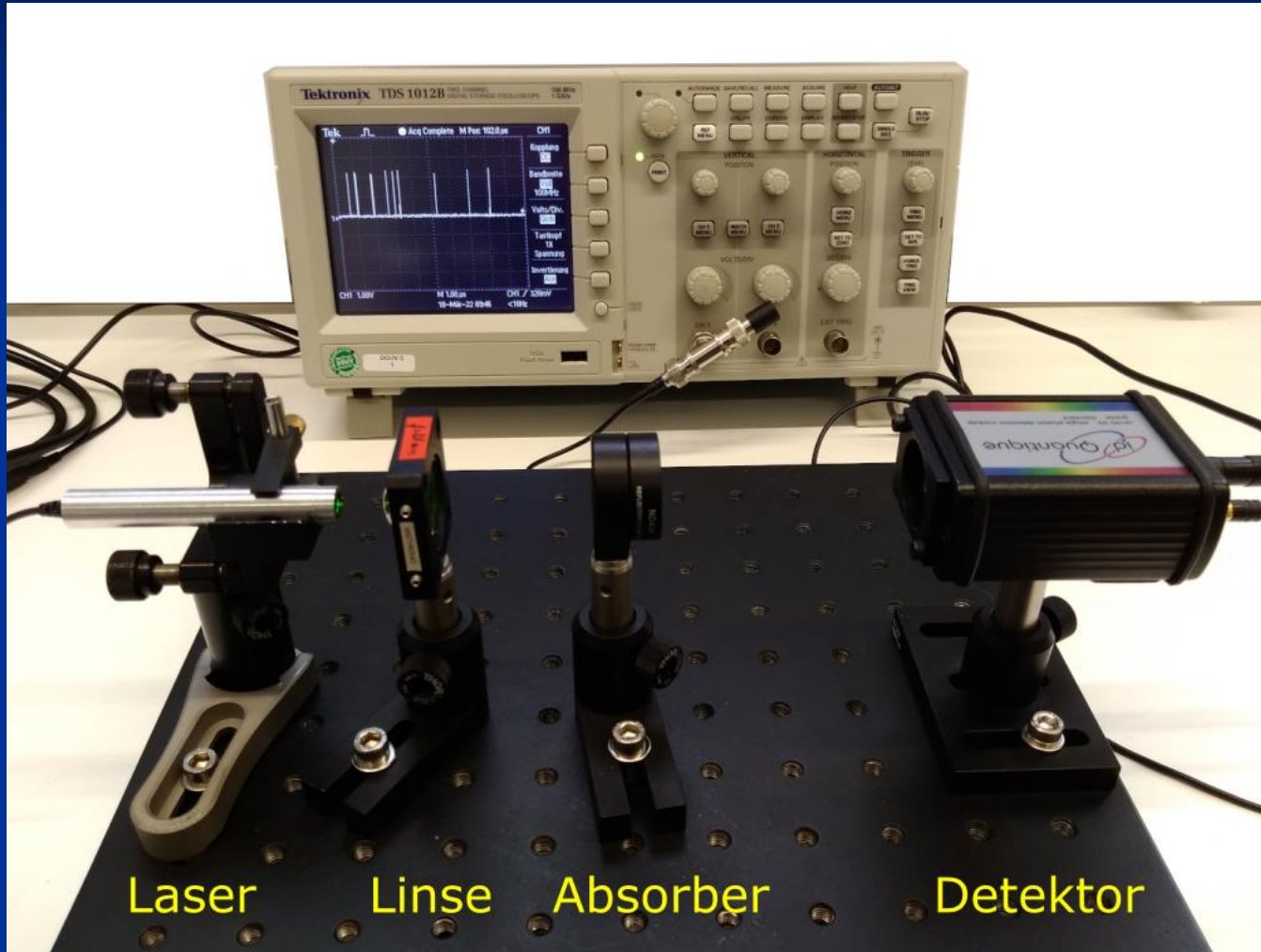
Pulshöhe: 2V

**Totzeit:** 45 ns

(Pulsdauer + hold-off)



# Einfaches Photon-Zähl-Experiment (Poisson-Statistik)

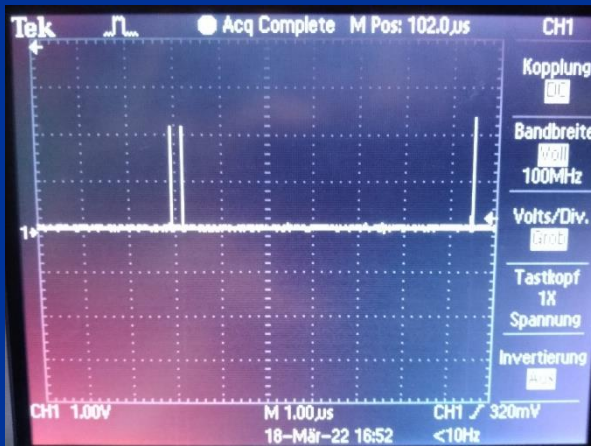


... und natürlich während der Aufnahme lichtdicht abdecken

# Experimente mit Schülern

## Messung „per Hand“ mit dem Speicher-Oszilloskop

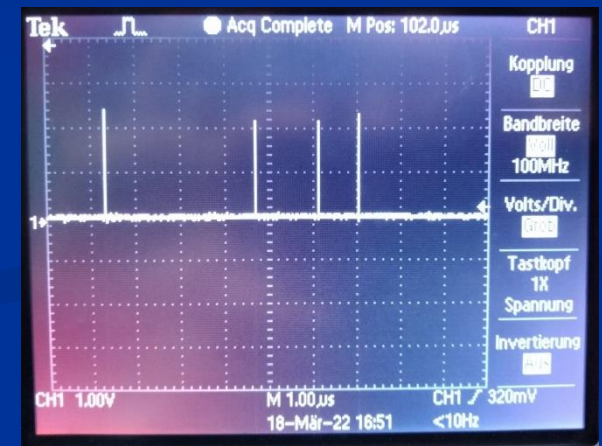
Zähle „Photonen“ (Detektorsignale) in gestopptem Zeitfenster, z.B.



3 Signale/10µs



9 Signale/10µs

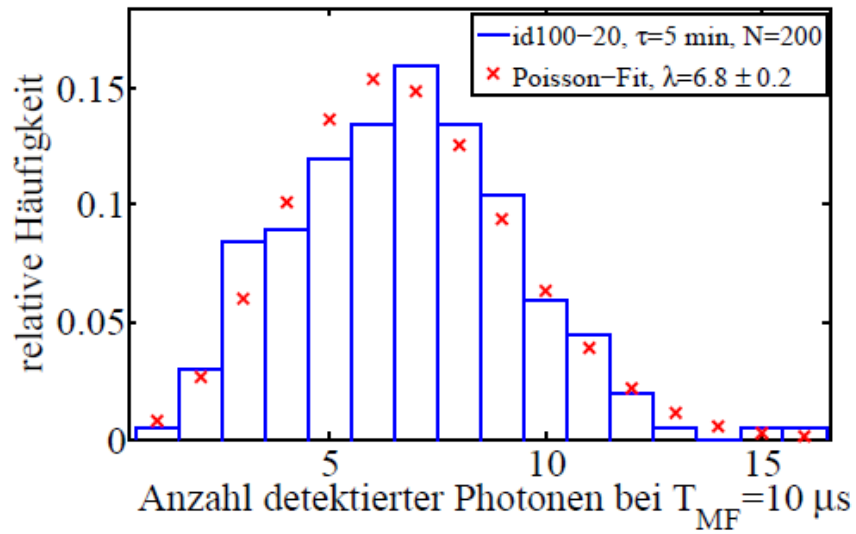


4 Signale/10µs

# Experimente mit Schülern

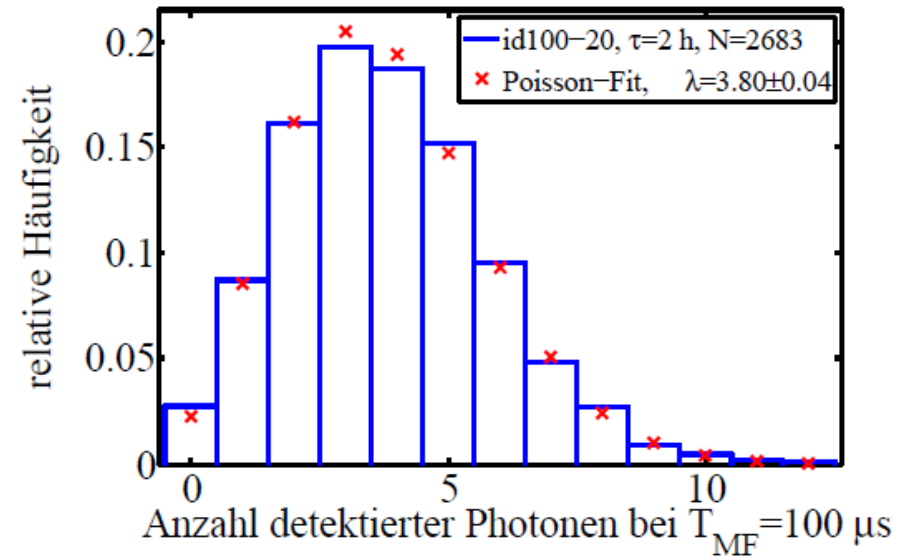
Funktioniert die per-Hand-Methode (kleine Statistik..)?

Poisson-Verteilung bei kohärentem Licht  
Per Hand Messung



per Hand, 200 „Fenster“

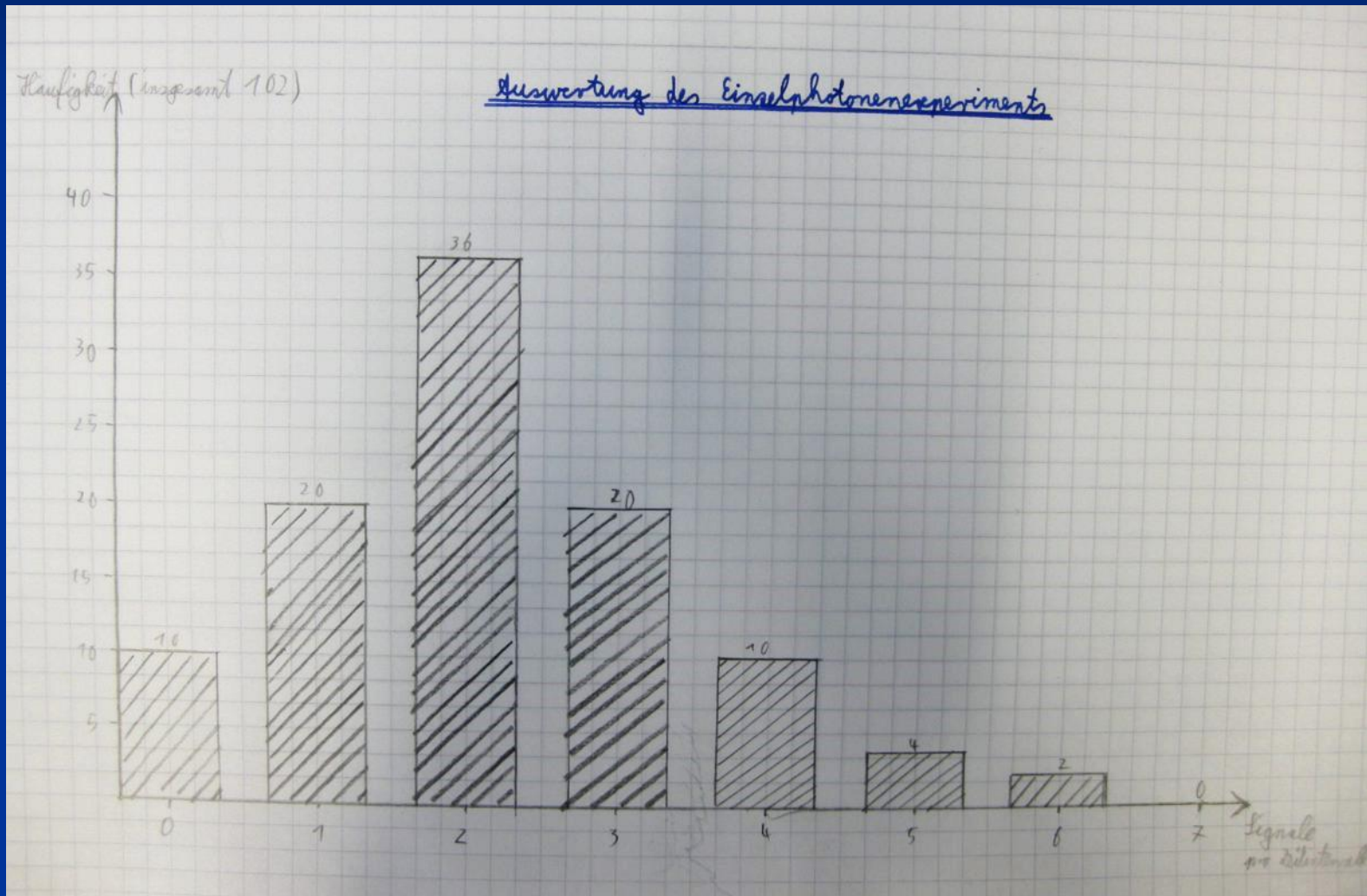
Poisson-Verteilung bei kohärentem Licht



per PC, 2683 „Fenster“

# Experimente mit Schülern

## Auswertung von Schülern aus dem Schülerlabor





# Quantenzufall

# Erweiterung zum Zufallsexperiment: Quantenzufall

## Pseudozufall vs. echter Zufall



- Deterministischer Algorithmus
- Computergeneriert
- Stochastisch häufig „sehr zufällig“, kryptographisch aber unsicher, da prinzipiell berechenbar



- Radioaktiver Zerfall, atmosphärisches Rauschen
- Würfeln, Glückspiel (z.B. Roulette, wenn nicht manipuliert)
- ...
- **Quantenzufall**
- kryptographisch sicher, da nicht berechenbar

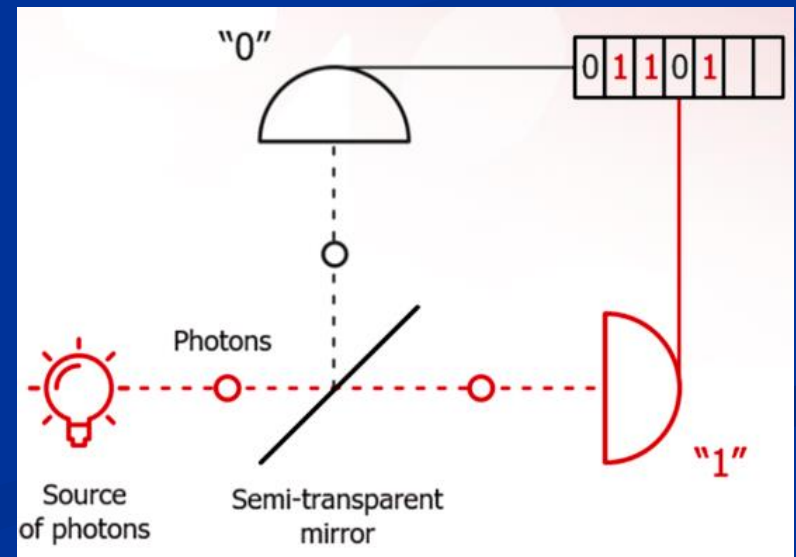
# Quantenzufall

Auftrag: Erstelle zufällige Binärkette aus 1 und 0, also z.B. 0011100110001

1. aus dem Gefühl heraus per Hand
2. mit dem **Quantenzufallsgenerator**



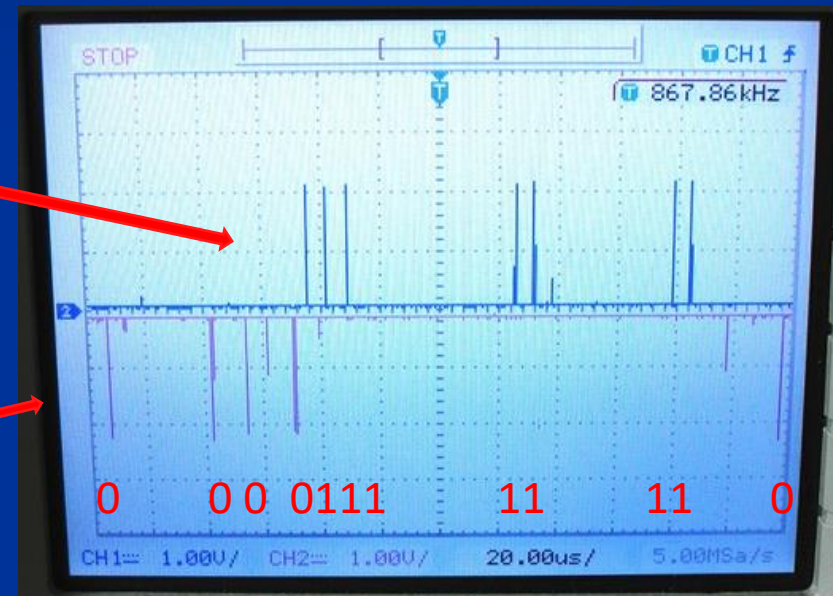
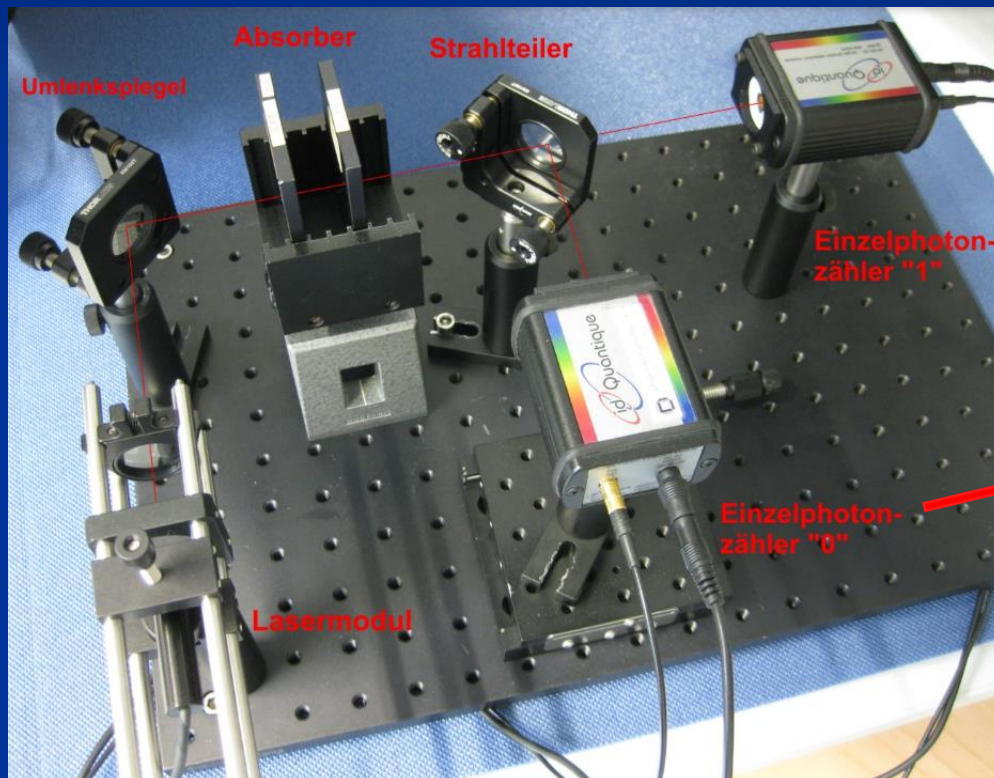
kommerziell...



Quelle: [www.idquantique.com](http://www.idquantique.com)

# Quantenzufallsgenerator

... oder im Eigenbau:



also: 000011111110

# Quantenzufallsgenerator

Ist das nun „echter“ Zufall? → Wichtig denn:

Zufallszahlen für

Kryptographie (Banken, Militär,..), PIN-Generierung, Lotterie, Forschung,...

→ Auswertung:

Betrachte Kettenlängen, z.B. 00 111 0 1 00 11111 0 11 0 1 0000

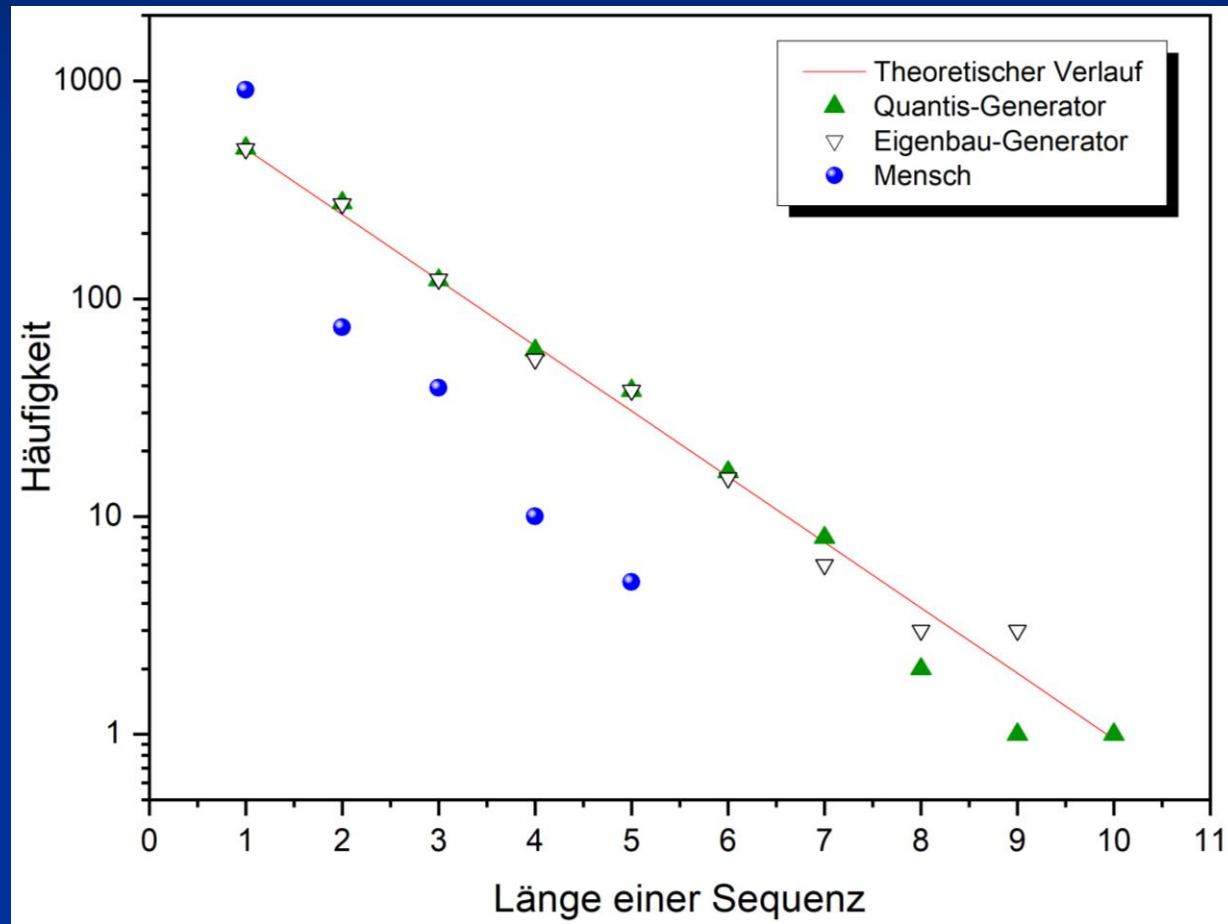
Wahrscheinlichkeit für Kette der Länge n:

$$p_n = \left(\frac{1}{2}\right)^n = 2^{-n}$$

Trage Wahrscheinlichkeit logarithmisch auf → Gerade

# Quantenzufallsgenerator

Kettenlängenverteilung der Binärketten: Quantenzufall vs. Mensch



Zufall fällt dem Menschen schwer...

# Quantenzufallsgenerator

Keinen eigenen QZG?

→ IDQ bietet kostenlose Quantenzufallszahlen (1000 auf einmal):

<http://www.randomnumbers.info>

10110010100011101010100  
01010100110100011100110  
00110001101001001100011  
0011100101001111101010  
1100110001101000110110  
0110001011001110011010  
1101110101100111010010

$$\nu = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N f(x^i)$$
$$D_N^*(x^1, x^2, \dots, x^N) \leq C_s(\log N)^s + O(\log N)$$

Welcome to  
RandomNumbers.info

News

March 18th 2004 – [www.randomnumbers.info](http://www.randomnumbers.info) goes live!  
[Read more](#)

**Download random numbers from quantum origin!**

How many random numbers do you want?  (max 1'000)  
Between 0 and  (max 10'000)

*Note: In case you use random numbers downloaded from this site to play lotteries and you win, we recommend you to donate half of the sum to [www.randomnumbers.info](http://www.randomnumbers.info) !*

News  
About us  
Download random numbers  
What are random numbers ?  
Generating random numbers  
Credits  
Contact

## Idee für Unterricht:

- Q-Zufallszahlen aus Internet
- „menschengemachte“ Zufallszahlen erstellen

→ auswerten wie oben und vergleichen...

FREE services

## Numbers

[Integer Generator](#) makes random numbers in configurable intervals

[Sequence Generator](#) will randomize an integer sequence of your choice

[Integer Set Generator](#) makes sets of non-repeating integers

[Gaussian Generator](#) makes random numbers to fit a normal distribution

[Decimal Fraction Generator](#) makes numbers in the  $[0,1]$  range with configurable decimal places

[Raw Random Bytes](#) are useful for many cryptographic purposes

FREE services

## Lists and Strings and Maps, Oh My!

[List Randomizer](#) will randomize a list of anything you have (names, phone numbers, etc.)

[String Generator](#) makes random alphanumeric strings

[Password Generator](#) makes secure passwords for your Wi-Fi or that extra Gmail account

[Clock Time Generator](#) will pick random times of the day

[Calendar Date Generator](#) will pick random days across nearly three and a half millennia

[Geographic Coordinate Generator](#) will pick a random spot on our planet's surface

[Bitmaps in black and white](#)

[Hexadecimal Color Code Generator](#) will pick color codes, for example for use as web colors

[Pregenerated Files](#) contain large amounts of downloadable random bits

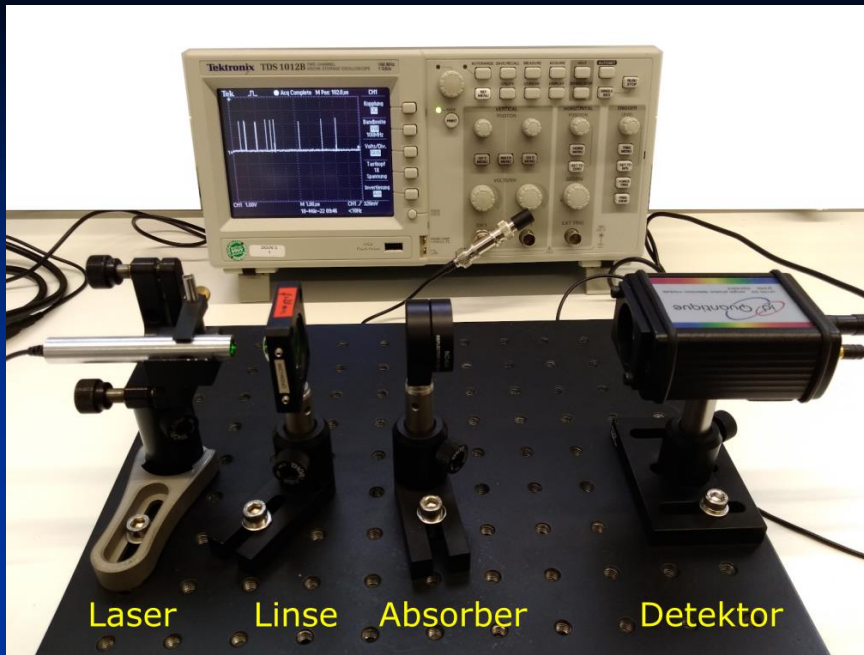
[Pure White Audio Noise](#) for composition or just to test your audio equipment

[Jazz Scales](#) to practice improvisation for students of jazz guitar

[Samuel Beckett's](#) randomly generated short prose

[DNA Protein Sequence Randomizer](#) (at Bio-Web)





Laser Linse Absorber Detektor

Zeit zum Spielen!

