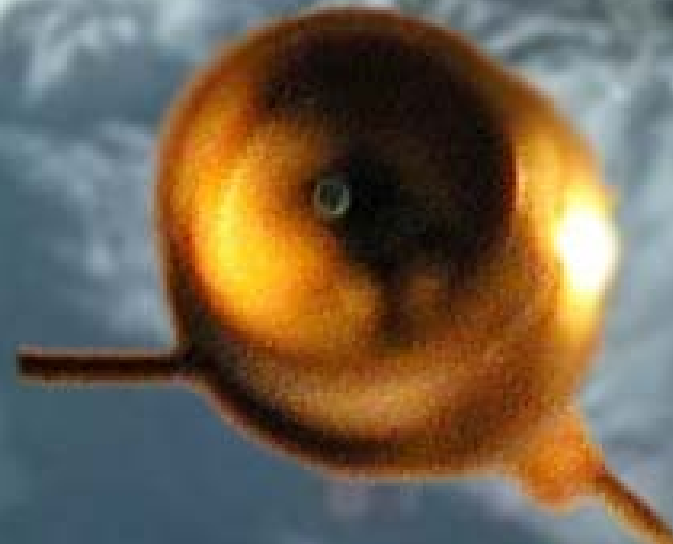


low cost Photon counting – wir zählen das Licht

Auszüge aus einer Jugend-forscht Arbeit im Januar 2002

Zielsetzung:

- Registrierung von Photonen als Einzelobjekte
- Ausmessen eines Interferenzmusters als statistische Verteilung auftreffender Photonen

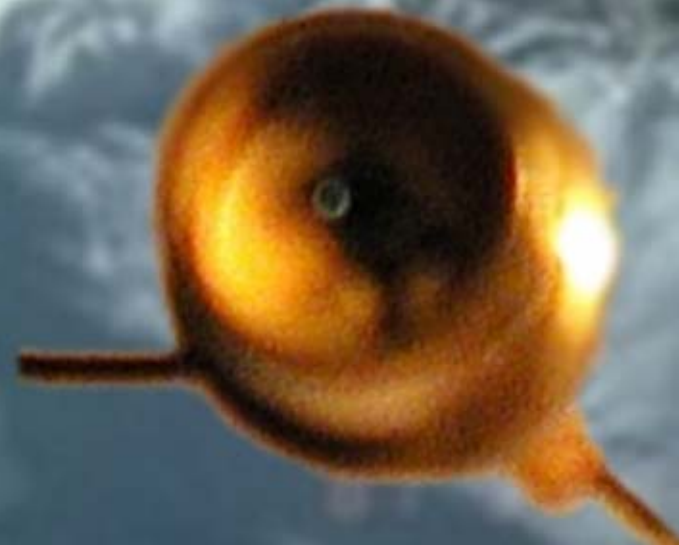


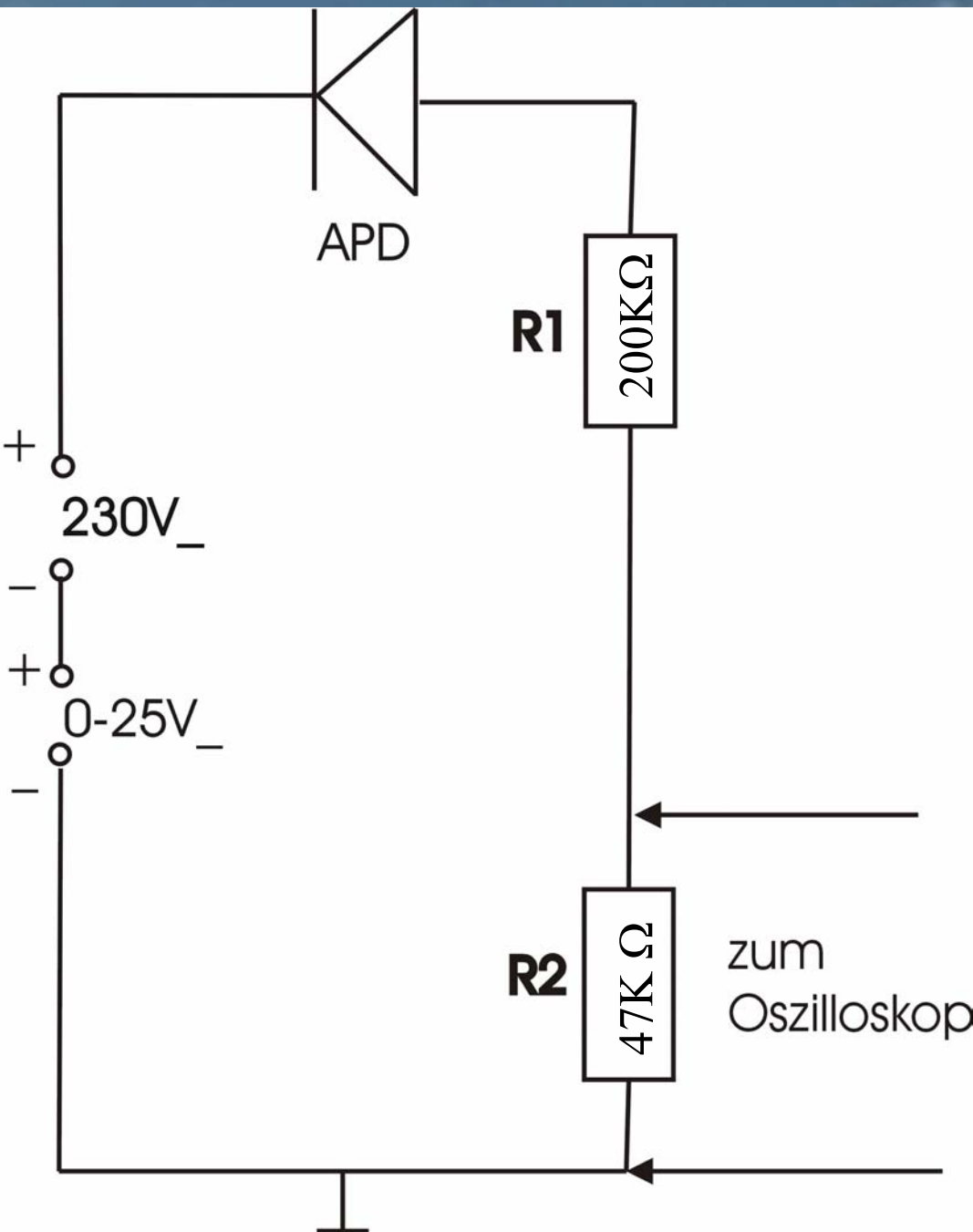
Einstein hat es in seiner berühmten Nobelpreisarbeit von 1905 vorhergesagt: Licht besteht aus Teilchen und nicht aus kontinuierlichen Wellen, wie man bis dahin annahm. Diese Lichtteilchen – Einstein nannte sie Photonen- leiteten eine Revolution in den Naturwissenschaften ein und führten direkt zur Quantenphysik, die bis heute die Grundlage der modernen Physik darstellt.

In der Schule ist Einstein's Deutung des Fotoeffekts der bevorzugte Einstieg in dieses Thema. Doch heute wie damals ist es mit den Mitteln der Schule immer noch nicht möglich, diese Lichtteilchen direkt und einzeln zu registrieren –zu groß sind der apparative Aufwand und die damit verbundenen Kosten.

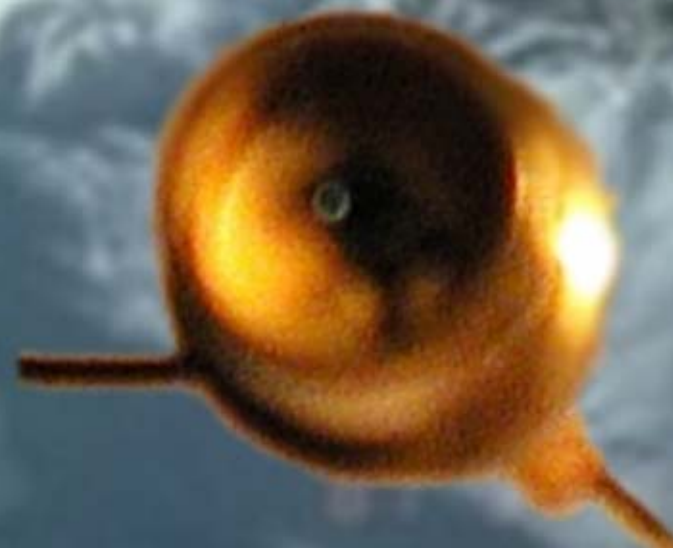
Unsere Gruppe hat nun einen Weg gefunden, wie man mit einer **Avalanche-Photodiode** und ansonsten schulüblichen Geräten den Photonen auf die Spur kommen kann. Damit wird der Fotoeffekt experimentell neu erschlossen und wesentliche Versuche aus der Quantenmechanik sind nun nicht mehr nur reine Theorie oder müssen mit dem Computer simuliert werden. Deshalb hoffen wir auch, dass unsere Versuche in die Schulphysik Eingang finden werden.

Eine Avalanche Photodiode (APD) wird in Sperrichtung betrieben. Knapp oberhalb der Durchbruchsspannung („breakdown-voltage“), die bei ca. 240 Volt liegt, lösen auftreffende Photonen eine Elektronenlawine („Avalanche“) mit einem Verstärkungsfaktor im Bereich von 10^6 - 10^8 aus, die mit einem Oszilloskop bzw. Zähler registriert werden kann. Dieser Betriebsmode heißt „Geiger-Mode“ in Analogie zum Geiger-Zähler für radioaktive Strahlung. Allerdings wird eine Lawine auch durch Wärmebewegung im Kristallgitter ausgelöst, was zu den sogenannten „dark counts“ führt. Deshalb muß man APD's kühlen oder spezielle handverlesene Exemplare mit niedriger „dark count rate“ wählen.





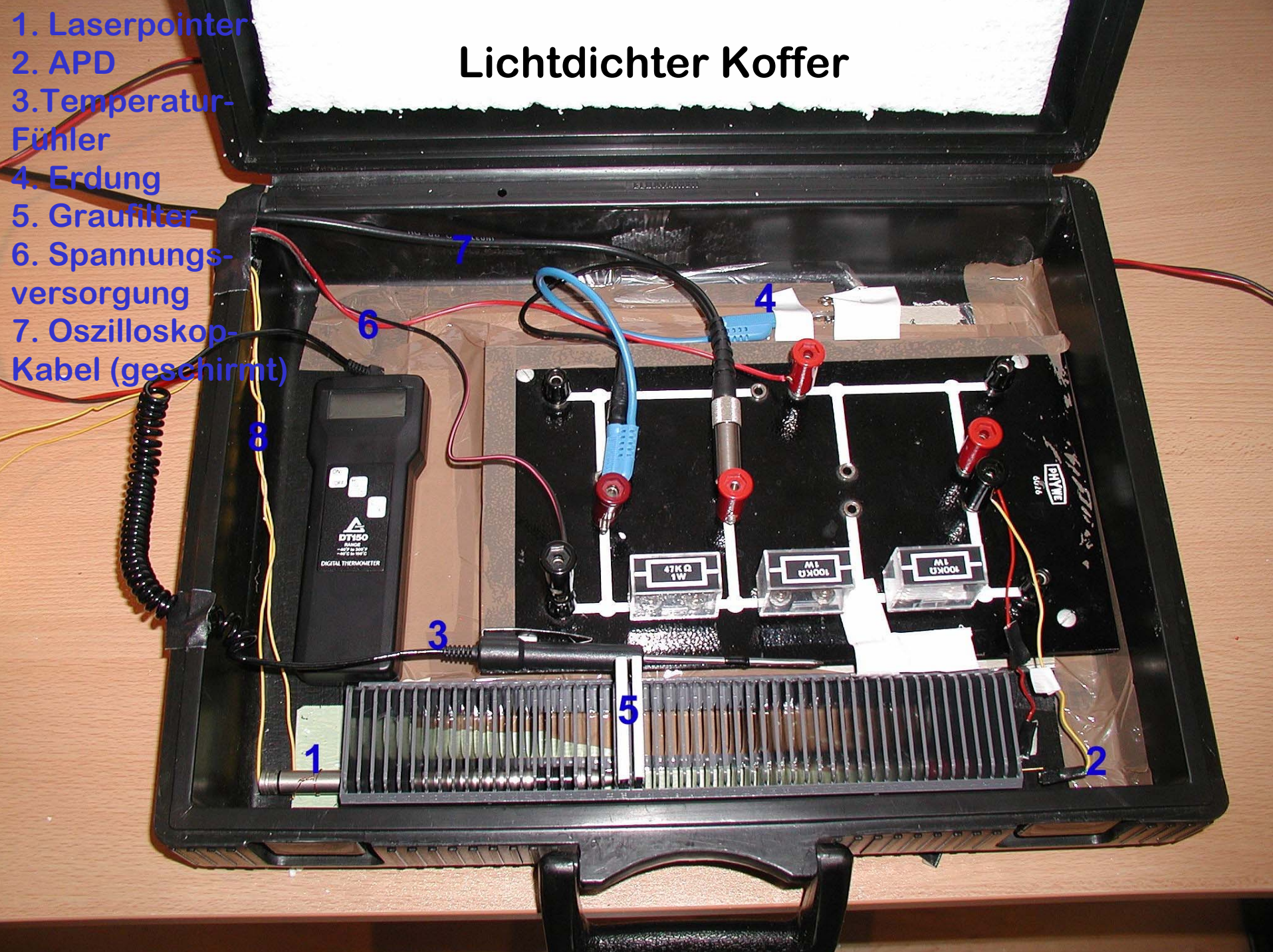
Elektrische Schaltung der Avalanche Photodiode



APD's sind im Geiger mode extrem lichtempfindlich – für sinnvolle Messungen muss der Detektor daher in einem lichtdichten Gehäuse untergebracht sein. Ein Laserpointer, dessen Lichtleistung mit Graufiltern etwa um den Faktor 10^{10} reduziert wird, ist eine gut geeignete Lichtquelle mit bekannter Lichtleistung und Wellenlänge. Damit lässt sich die Anzahl der pro Sekunde emittierten Photonen berechnen und mit der gemessenen Anzahl vergleichen. Letztere ist natürlich deutlich geringer; ihr Prozentsatz wird als Photon-detection probability bezeichnet und liegt im Bereich von 1% - 50% je nach Betriebsdaten und Wellenlänge des Lichts. APD's sind vor allem im roten Spektralbereich empfindlich, was bei der Verwendung der billigen Laserpointer mit 633nm Wellenlänge von Vorteil ist.

Lichtdichter Koffer

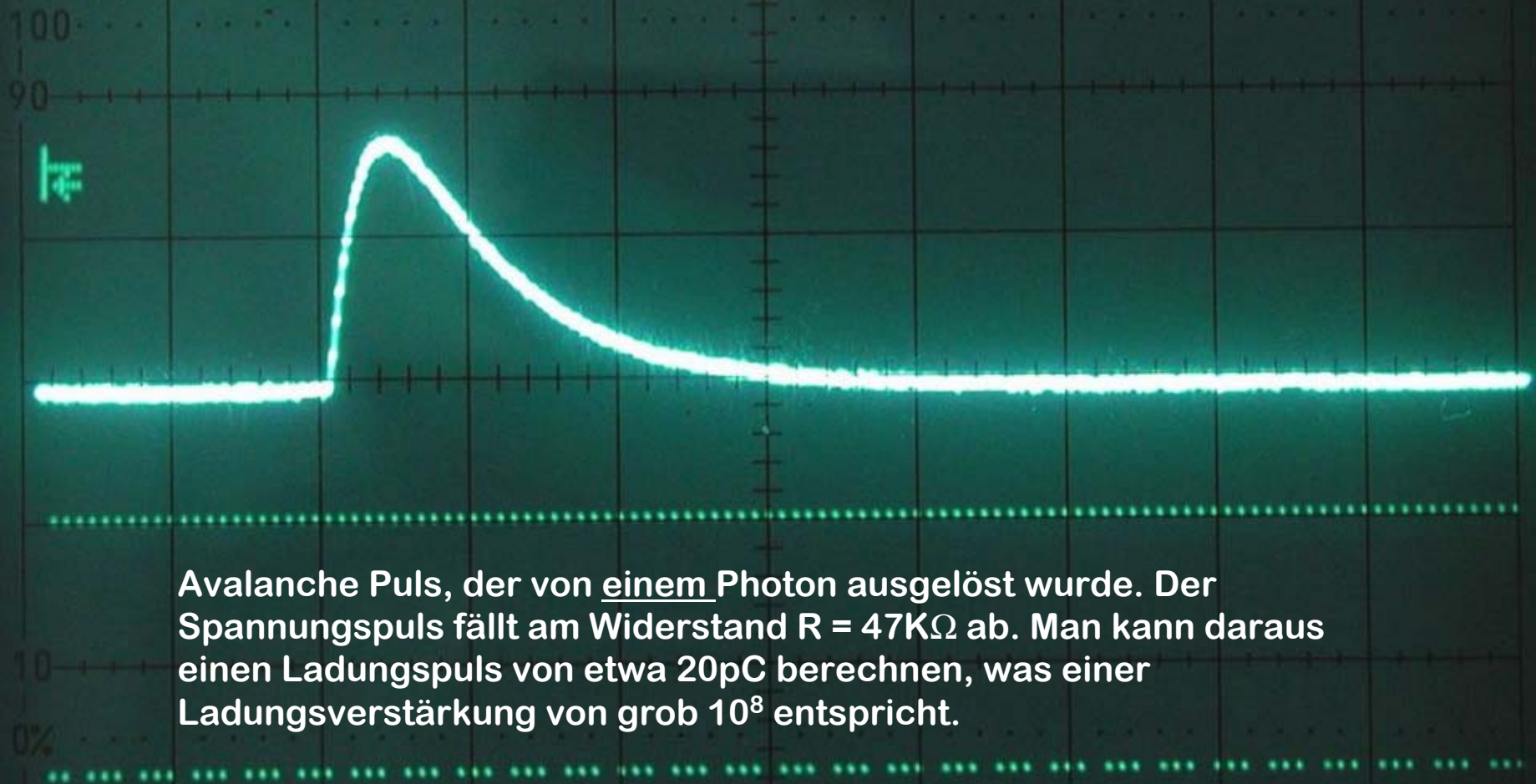
1. Laserpointer
2. APD
3. Temperatur-Fühler
4. Erdung
5. Graufilter
6. Spannungsversorgung
7. Oszilloskop-Kabel (geschirmt)
8. Oszilloskop



A:10 μ s

TR:CH1,DC

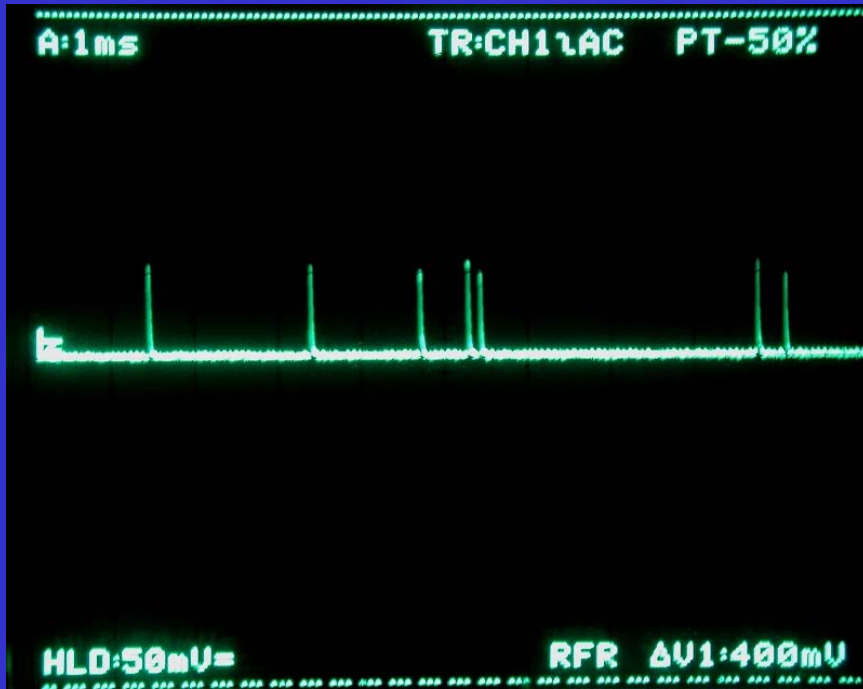
PT-50%



Avalanche Puls, der von einem Photon ausgelöst wurde. Der Spannungspuls fällt am Widerstand $R = 47\text{K}\Omega$ ab. Man kann daraus einen Ladungspuls von etwa 20pC berechnen, was einer Ladungsverstärkung von grob 10^8 entspricht.

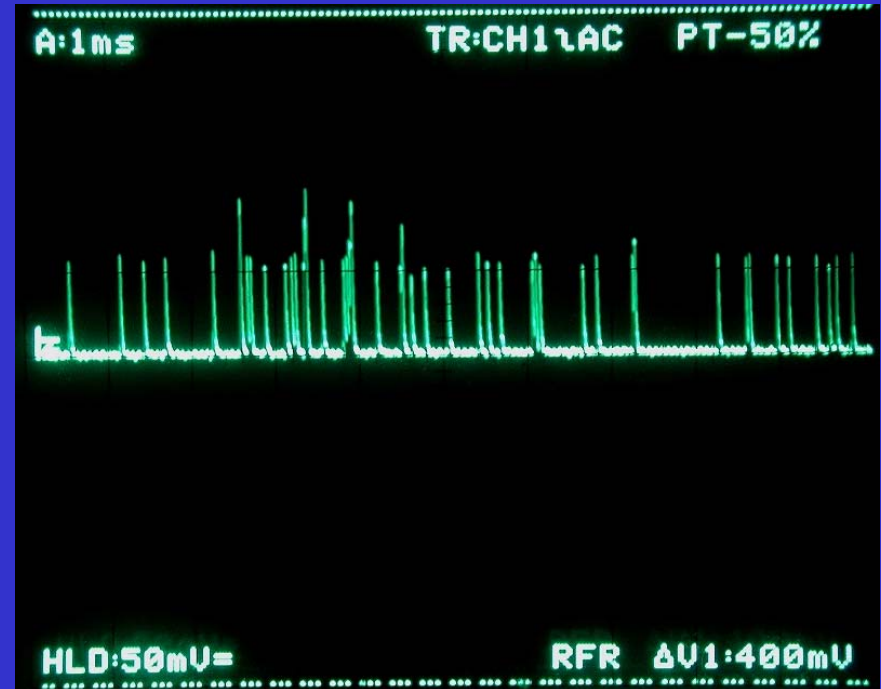
HLD:50mV=

RFR $\Delta V1:88.2\text{mV}$



Dark counts bei 16°C und 2,0V
über der breakdownvoltage

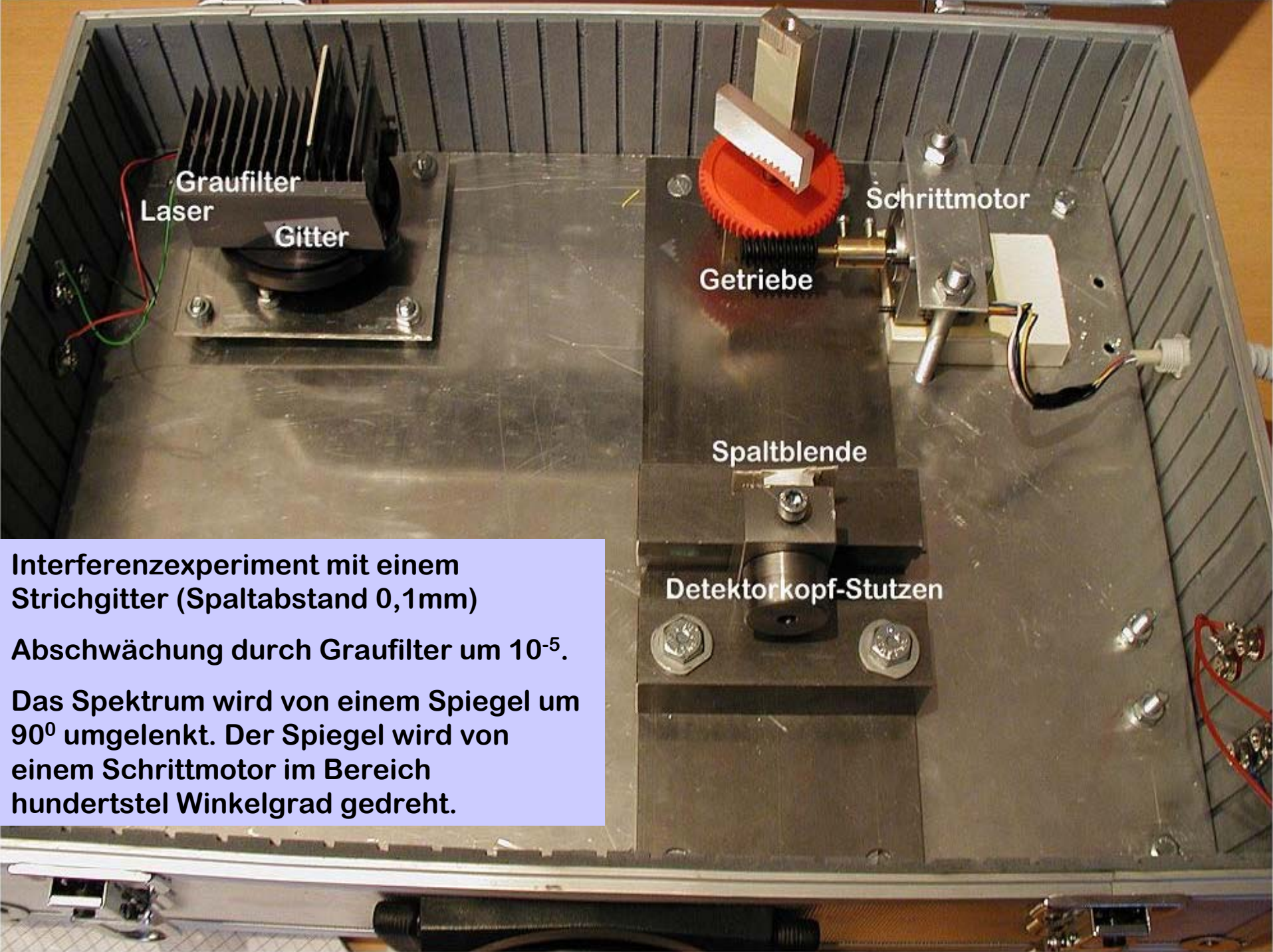
Ergebnis: ca. 700 cs⁻¹



Photon counts

Einige Pulse sind höher
aufgrund von Überlagerungen

Ergebnis: ca 3500 cs⁻¹, davon
2700 cs⁻¹ aufgrund von
Photonen (nach Subtraktion
der dark counts)



Graufilter
Laser
Gitter

Schrittmotor

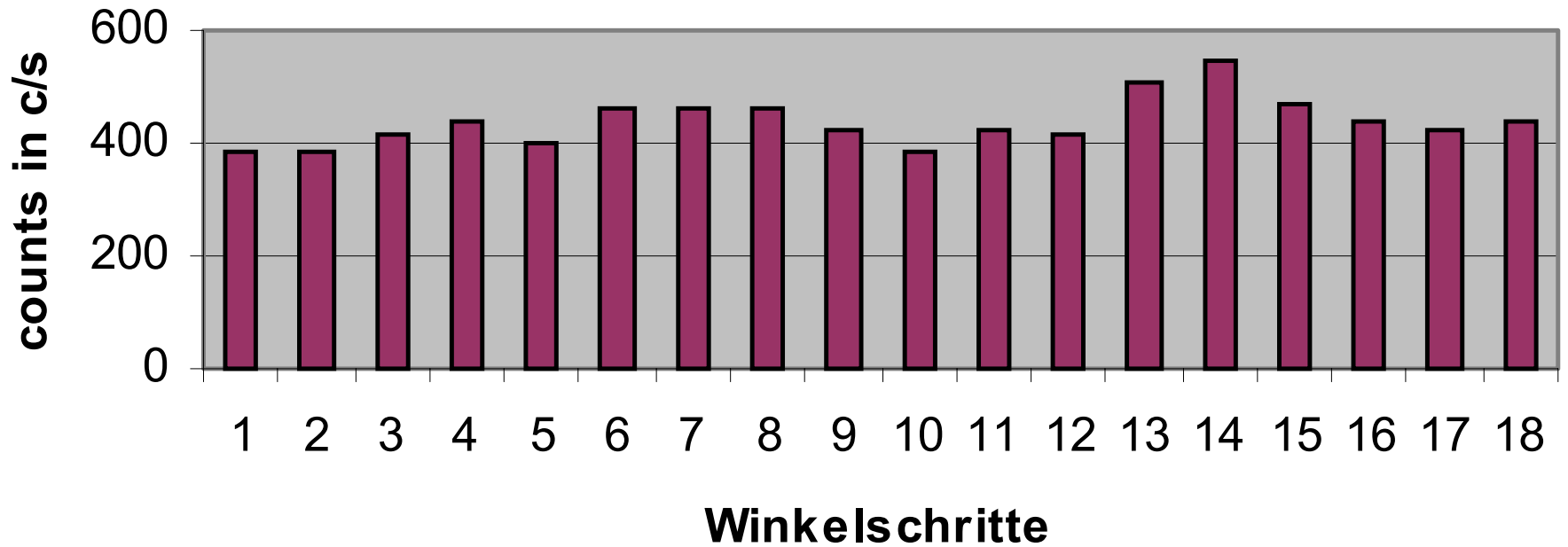
Getriebe

Spaltblende

Detektorkopf-Stutzen

Interferenzexperiment mit einem Strichgitter (Spaltabstand 0,1mm)
Abschwächung durch Graufilter um 10^{-5} .
Das Spektrum wird von einem Spiegel um 90° umgelenkt. Der Spiegel wird von einem Schrittmotor im Bereich hundertstel Winkelgrad gedreht.

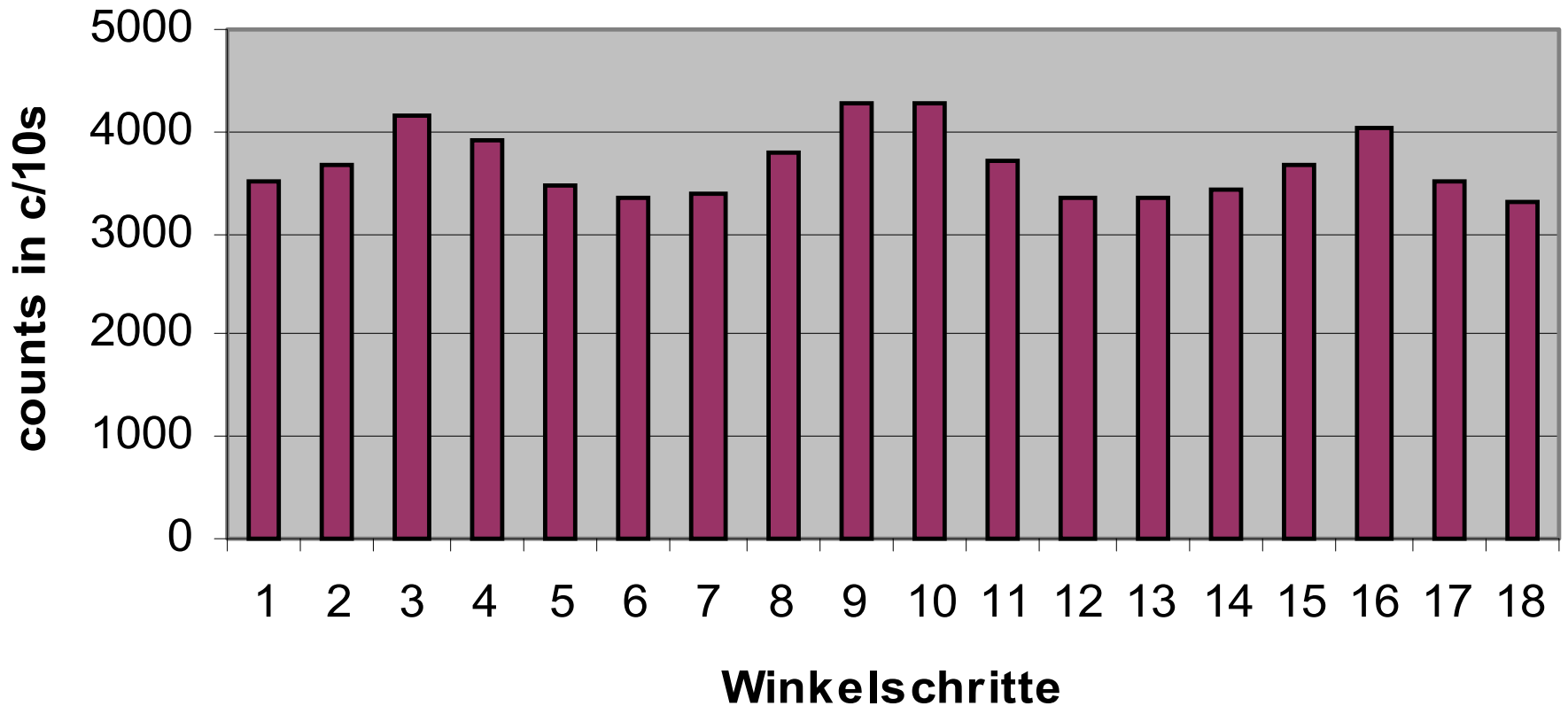
Photon-Interferenz



Zählzeit 1 Sekunde:

Die dark count rate dominiert; statistischen Schwankungen lassen (noch) keine Interferenz erkennen

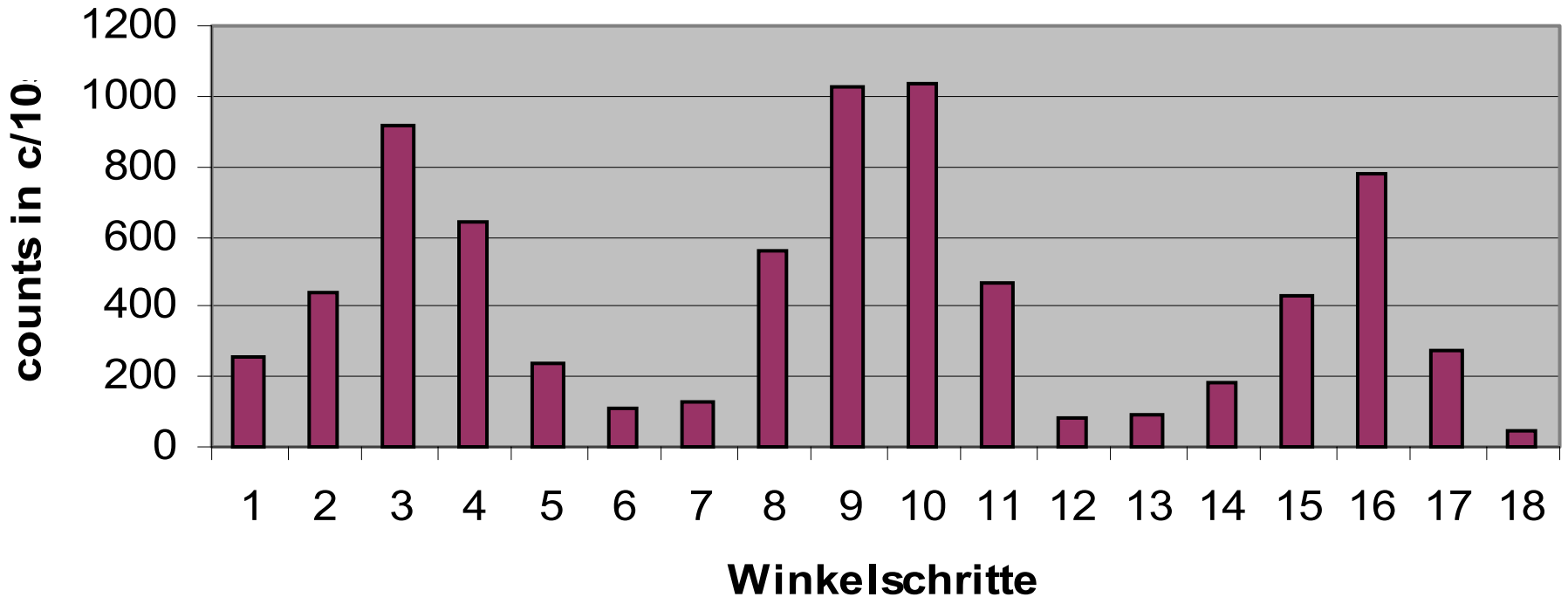
Photon-Interferenz



Zählzeit 10 Sekunden:

Die dark count rate dominiert weiterhin, doch trotz statistischer Schwankungen lässt sich Interferenz erahnen.

Photon-Interferenz (Untergrund bereinigt)



Zählzeit 10 Sekunden:

Wir haben den Untergrund bereinigt (subtrahiert). Nun erkennt man deutlich Interferenz.

Die Photonen haben einen „mittleren Abstand“ von etwa 10 cm - das ist ein makroskopischer Abstand! Ein Photon interferiert „mit sich selbst“