

# Charakterisierung von Einzelphotonendetektoren bei 1,55 $\mu\text{m}$

Silke Peters<sup>1</sup>, Helmut Hofer<sup>1</sup>, Waldemar Schmunk<sup>1</sup>, Stefan Kück<sup>1</sup>, Roman M. Klein<sup>2</sup>, Ingmar Müller<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Physikalisch-Technische-Bundesanstalt (PTB), Bundesallee 100, 38116 Braunschweig

<sup>2</sup>Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB), Abbestraße 2-12, 10587 Berlin

<mailto:stefan.kueck@ptb.de>

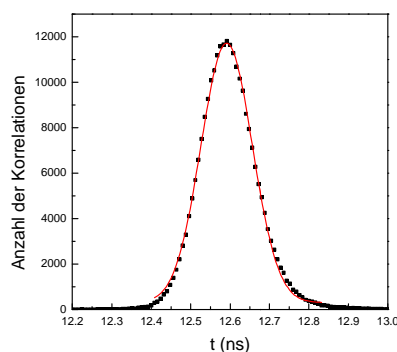
In diesem Beitrag stellen wir Messergebnisse zu einer rückgeführten Bestimmung der Totzeit und des zeitlichen Jitters von fasergekoppelten InGaAs-Einzelphotonendetektoren (Single Photon Avalanche Dioden (SPAD)) vor. Die vorgestellten Arbeiten werden im Rahmen des Projektes MICQ: „Metrology for Industrial Quantum Communication Technologies“ durchgeführt.

## 1 Einführung

Moderne Kommunikationstechnologien durchdringen mehr und mehr verschiedenste gesellschaftliche Bereiche unseres Lebens. In diesem Zusammenhang wird die „von Natur aus“ als abhörsicher geltende Quantenkommunikation (QKD) zusehends als eine Möglichkeit der sicheren Datenübertragung gesehen [1]. Ein QKD-System verknüpft quantenmechanische mit klassischen Informationstechnologien, d.h. Einzelphotonenquellen und -detektoren mit dem in der Regel glasfaserbasierten Übertragungskanal. Obwohl heute kommerziell erhältlich [2], liegt bisher keine umfassende metrologische Validierung eines QKD-Systems vor. Ein erster Schritt in diese Richtung ist die Rückführung der technischen Parameter seiner einzelnen Komponenten [3]. In diesem Beitrag stellen wir Ergebnisse zur Bestimmung der Totzeit und des zeitlichen Jitters von InGaAs-Einzelphotonendetektoren (InGaAs-SPAD) vor, wie sie seit Jahren in der Forschung und Entwicklung von QKD-Systemen für den Telekommunikationswellenlängenbereich eingesetzt werden [4, 5].

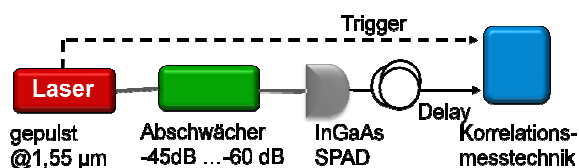
## 2 Messung des zeitlichen Jitters

Der Jitter einer SPAD beschreibt die zeitliche Unsicherheit, mit der sich das Auftreffen von Photonen auf die Oberfläche des Detektors registrieren lassen. Sie ergibt sich aus der vollen Halbwertsbreite (Full Width of Half-Maximum FWHM) der Instrumente-Antwortfunktion der SPAD. Diese ergibt sich aus der zeitlichen Korrelation von vielen Detektorereignissen mit dem Triggersignal des Lasers, vorausgesetzt der zeitliche Jitter des verwendeten Lasersignals ist geringer als der des Detektors. Um dies sicherzustellen, wird der Jitter des Lasers mittels eines Helium gekühlten fasergekoppelten (single mode) SSPD (superconducting nanowire single photon detector) bestimmt, dessen Jitter von  $(44 \pm 2)$  ps zuvor mittels



**Abb. 1** Jitter der verwendeten gepulsten Laserstrahlung, gemessen mit einem SSPD.

Synchrotron-Strahlung der „Metrological Light Source“ [6] gemessen wurde. Für die Messungen wird ein gepulster, ebenfalls fasergekoppelter Laser bei einer Wellenlänge von 1,55  $\mu\text{m}$  eingesetzt, dessen Frequenz sich zwischen 10 kHz und 5 MHz kontinuierlich einstellen lässt.



**Abb. 2** Experimenteller Aufbau zur Bestimmung des Jitters der InGaAs-SPAD.

Mit Hilfe zweier variabler optischer Abschwächer wird die Anzahl der Photonen pro Laserpuls auf Einzelphotonenniveau vermindert, so dass sich eine mittlere Photonenzahl (Poisson-Statistik) von  $\leq 0,1$  ergibt. Abbildung 1 zeigt das Histogramm einer Jittermessung, bei der das Signal des SSPD mit dem Triggersignal des Lasers zeitlich korreliert wird. Die Korrelationsmesstechnik erlaubt eine zeitliche Auflösung von 4 ps. Der Laserjitter ergibt sich zu  $(130 \pm 11)$  ps, wobei sich die angegebene Unsicherheit des Laserjitters im Wesentlichen aus der mathematischen Anpassung der Gauß-Funktion an die Messwerte ergibt. Mit dem gleichen Messprinzip wird der Jitter der InGaAs-SPAD

bestimmt, die ebenfalls fasergekopptelt im Gate-Modus (getriggert durch die Laserpulsfrequenz) betrieben wird, siehe Abbildung 2. Aus der Kurvenanpassung des gemessenen Histogramms ermittelt sich ein Jitter von  $(290 \pm 6)$  ps für die untersuchte SPAD, wobei sich die Unsicherheit ebenso aus dem Fit-Prozess ergibt. Berücksichtigt man die zuvor bestimmte Unsicherheit des Laserjitters findet sich eine Unsicherheit von 0.5 % und damit einen Jitter von  $(290 \pm 14)$  ps. Umfassende Messungen des Jitters der InGaAs-SPAD (id201, idQuantique, Schweiz) [7] zeigen, dass innerhalb eines breiten Bereichs von einstellbaren Parametern der Einzelphotonendetektor Jitter-Werte zwischen 240 ps bis 300 ps mit einer Messunsicherheit von  $\leq 1\%$  aufweist.

### 3 Messung der Detektortotzeit

Ist der Einzelphotonendetektor nach einem voran gegangenen Photonenereignis unempfindlich gegen das Auftreffen weiterer Photonen, so wird die Zeit, in der dieser Zustand anhält, in der Regel als Totzeit des Detektors bezeichnet. Zur Bestimmung der Totzeit wird das Messsignal und das Gate-Signal der SPAD mittels eines rückgeführten Oszilloskops aufgenommen, siehe Abbildung 3.

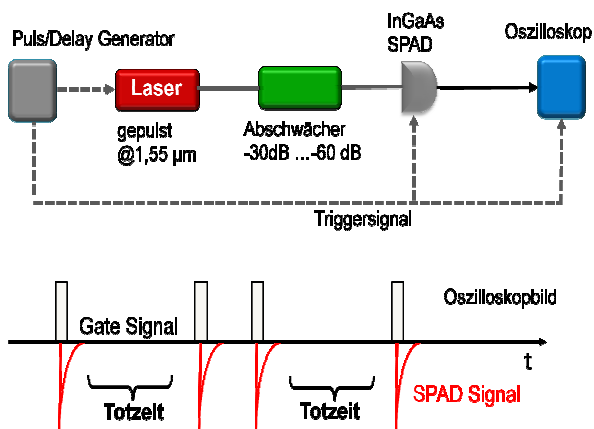


Abb. 3 Detektortotzeit der InGaAs-SPAD: Messprinzip und -aufbau.

Treffen innerhalb der Detektortotzeit Photonen ein, führt dies zu keinem SPAD-Signal. Erhöht man die Frequenz der ankommenden Laserpulse in Schritten von 1 Hz solange bis einer von zwei benachbarten Signalpuls verschwindet, ergibt sich aus dem gewonnenen Frequenzwert reziprok die Totzeit des Detektors. Ein Vergleich der vom Nutzer einstellbaren Totzeit mit den jeweils gemessenen Werten findet sich in Tabelle 1. Den wesentlichen Beitrag zur Messunsicherheit liefert der zuvor bestimmte Jitter der SPAD, der für einen breiten Bereich von eingestellten SPAD Parametern Werte von 240 ps bis 300 ps aufweist.

Gate-Weite (ns)	Totzeit SPAD ( $\mu$ s)	Totzeit gemessen ( $\mu$ s)
2,5	1	$1,0205 \pm 0,00029$
5	5	$5,0206 \pm 0,00026$

Tab. 1 Vergleich zwischen den vom Nutzer einstellbaren mit den gemessenen Werten der Totzeit für zwei verschiedene Gate-Weiten der InGaAs-SPAD und einer Detektionseffizienz von 10 %.

### 4 Zusammenfassung und Ausblick

Es wurden Messverfahren zur Bestimmung der Totzeit und des Jitters von InGaAs-SPADs vorgestellt. Momentan ergibt sich für die Messung des Jitters eine Unsicherheit von  $\leq 1\%$ , während die Messunsicherheit für die Totzeit im Wesentlichen durch die Höhe des Jitters bestimmt ist. Zukünftige Arbeiten werden rückgeführte Messungen weiterer Parameter, wie z.B. Detektionseffizienz oder Afterpulsing-Wahrscheinlichkeit von InGaAs-SPADs beinhalten, mit dem Ziel einer umfassenden rückgeführten Bestimmung dieser Größen.

Die Autoren bedanken sich für die Förderung durch die Europäische Union im Rahmen des EMRP Projekts IND06-MIQC (Grant Agreement No.912/2009/EC). The EMRP is jointly funded by the EMRP participating within EURAMET and the European Union.

### Literatur

- [1] Pressemitteilung 175/2010 des BMBF und Bericht: Nationaler IT-Gipfel der Arbeitsgruppe „Hightech-Strategie für die Informationsgesellschaft“, 2006
- [2] idQuantique, Schweiz; Toshiba, UK; Austrian Institute of Technology (AIT), Österreich
- [3] <http://projects.npl.co.uk/MIQC/>
- [4] R.T. Thew et al., "Approaches to single photon detection", Nuclear Instruments and Methods in Physics research A **610**, 16-19, (2009)
- [5] N. Sangouard, H. Zbinden, "What are single photons good for?", Journal of Modern Optics **59**, 1458 - 1464, Special Issue: Single-Photon Devices and Applications, 2012
- [6] R. Klein et al., "From single photons to milliwatt radiant power - electron storage rings as radiation sources with a high dynamic range", Metrologia **47**, R33, doi:10.1088/0026-1394/47/5/R02 (2010).
- [7] <http://www.idquantique.com/scientific-instrumentation/id201-ingaas-apd-single-photon-detector.html>