

# It's a Good Time for Time-Bin Qubits

---

## Gute Zeiten für QuBits

Autor: Todd Pittman

Übersetzung: Dipl.-Ing. Björnstjerne Zindler, M.Sc.

[www.Zenithpoint.de](http://www.Zenithpoint.de)

Erstellt: 26. März 2023 – Letzte Revision: 27. März 2023

### Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>It's a Good Time for Time-Bin Qubits</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>Gute Zeiten für QuBits</b>	<b>7</b>

---

### Literatur

[Tod] Todd Pittman. It's a Good Time for Time-Bin Qubits, DOI: 10.1103/Physics.6.110.

---



# 1 It's a Good Time for Time-Bin Qubits

[Tod]

Physics 6, 110 (2013)

## Viewpoint

It's a Good Time for Time-Bin Qubits

**Todd Pittman**

*Department of Physics, University of Maryland, Baltimore County, Baltimore MD 21250, USA*

Published October 9, 2013

*Qubits encoded in time advance the prospects for quantum computing with single photons.*

Subject Areas: **Quantum Information, Optics**

### A Viewpoint on:

#### Linear Optical Quantum Computing in a Single Spatial Mode

Peter C. Humphreys, Benjamin J. Metcalf, Justin B. Spring, Merritt Moore, Xian-Min Jin, Marco Barbieri, W. Steven Kolthammer and Ian A. Walmsley

*Phys. Rev. Lett.* **111**, 2013 - Published October 9, 2013

#### Coherent Ultrafast Measurement of Time-Bin Encoded Photons

John M. Donohue, Megan Agnew, Jonathan Lavoie, and Kevin J. Resch

*Phys. Rev. Lett.* **111**, 2013 - Published October 9, 2013

In contrast to classical bits of information that are either 0 or 1, quantum bits - or „qubits“ - can be in superposition states of 0 and 1. Just like classical bits, however, qubits are physical objects that have to be implemented in real physical systems. Researchers have used single photons as physical qubits, with the quantum information encoded in terms of polarization, angular momentum, and many other degrees of freedom. The time-bin degree of freedom (that is, encoding quantum information in terms of relative arrival times of light pulses) offers a particularly robust kind of single-photon qubits, and two recent papers have advanced the use of time-bin qubits in dramatic ways.

Writing in *Physical Review Letters*, Peter Humphreys and colleagues at the University of Oxford, UK, have developed a technique for optical quantum computing using time-bin qubits [1]. In principle, their concept allows photonic quantum computing using a single optical path (or fiber) rather than a maze of multiple paths, thereby drastically reducing the overall complexity of these kinds of systems. Also in *Physical Review Letters*, John Donohue and colleagues at the Institute for Quantum Computing, University of Waterloo, Canada, have demonstrated an ultrafast measurement technique for time-bin qubits that could enable higher data rates and fewer errors in photonic systems [2]. These two developments represent a huge step towards the realization of practical quantum information processing devices using single-photon qubits.

Time-bin qubits were originally developed by a group at the University of Geneva, Switzerland [3]. To understand the basic form of these qubits, consider a single-photon wave packet passing through a two-path Mach-Zehnder interferometer: if the two paths have different lengths, the photon wave packet will exit the interferometer in a quantum-mechanical superposition of an „early time bin“ and „later time bin“. By adjusting the parameters of the interferometer to control relative phase and amplitude, one can accurately produce arbitrary time-bin qubits. The Geneva group famously showed that these time-bin qubits could propagate over long distances in optical fibers with very little decoherence, allowing much more robust quantum communication systems than those based on polarization-encoded qubits [4, 5].

Extending these ideas from the realm of quantum communication, Humphreys *et al.* have now shown that it is possible to use time-bin qubits for quantum computing [1]. Their approach is based on the well-known linear optics quantum computing (LOQC) paradigm that uses large numbers of ancilla photons and measurement-based nonlinearities to realize near-deterministic quantum logic gates [6]. Previous work on the LOQC approach has primarily been based on polarization qubits and spatial modes that can quickly escalate into extremely unwieldy nested interferometers with very large numbers of paths that need to be stabilized to subwavelength precision [6–8]. In contrast, Humphreys *et al.* have now shown that the use of time-bin qubits enables the LOQC approach in a *single spatial mode*, offering the possibility of far less experimental complexity and a potential for reduced decoherence mechanisms.

As shown in Fig. 1, their approach involves a large string of time-bin qubits propagating along a single waveguide (such as an optical fiber), with the available polarization degree of freedom used to define a „register“ mode for propagation and storage, and a „processing“ mode for qubit manipulations. As the qubits propagate along the waveguide, Humphreys *et al.* pull out various time bins from the register mode, process them with phase shifts, bit flips, and couplings, and then return them to the register mode in a coherent way. The authors used these ideas to propose the full suite of single-qubit operations and two-qubit entangling gates needed for universal quantum computation. The validity of their basic method was demonstrated in a very convincing experiment that used single-photon qubits and linear opticelements for time-bin creation and manipulation [1].

In any approach to quantum information processing, one of the key requirements is the ability to measure arbitrary qubit states. For the time-bin qubits discussed here, this turns out to mean that the separation between the „early“ and „late“ time bins has to be much greater than the resolution time of the photon detection system being used. With commercially available devices, this typically requires nanosecond-scale separation of the time bins and limits the effective „data rate“ for sending time-bin qubits down a quantum channel. Using a radical departure from traditional time-bin qubit detection techniques, Donohue *et al.* have now pushed this number down to the picosecond scale, offering the potential for much higher information density [2].

The approach of Donohue *et al.* is essentially a clever method for coherently converting time bins into „frequency bins“ that can be easily measured with slow detectors - even when the time bins are pushed arbitrarily close together. As illustrated in the inset to Fig. 1, this time-to-frequency conversion is based on qubit frequency conversion techniques that mix a single-photon qubit with an auxiliary strong laser pulse in a nonlinear medium [9]. By oppositely „chirping“ the qubit and strong laser signals (i.e., stretching them so that their frequencies vary oppositely in time - like mirror-image rainbows), the authors were able to show that the time-bin information maps perfectly into corresponding frequency bins. The real power of the technique - the ability to make measurements of arbitrary time-bin qubits - arises when the auxiliary laser pulse is also put into a superposition of time bins. Using this approach, Donohue *et al.* were able to experimentally demonstrate ultrafast measurements on arbitrary time-bin states [2].

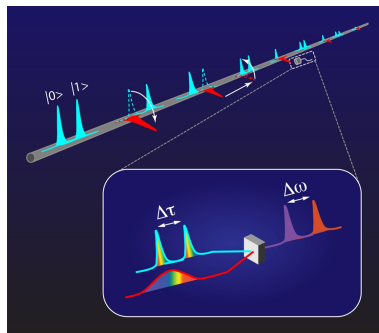


FIG. 1: Conceptual illustration of linear optical quantum computing in a single spatial mode [1]. A long string of single-photon time-bin qubits propagates down a single waveguide (like a fiber), and the polarization degree of freedom is used to switch various time bins into a „processing mode“ for qubit operations, logic gates, and detection. The inset to the figure illustrates a new method for ultrafast detection of time-bin qubits in which chirped laser pulses and sum frequency generation are used to coherently map the time bins into frequency bins [2]. (APS/Alan Stonebraker)

The next steps for moving these two new promising ideas from the research lab towards „practical quantum information processing devices“ will be of a more technical nature. For Humphrey's time-bin LOQC approach, this simply means an emphasis on improving the efficiency of the photonics technologies (switches, phaseshifters, etc.) needed, while for Donohue's ultrafast time-bin qubit detectors, it means improving the efficiency of the time-to-frequency conversion process. Combining these ideas with other recent advances in photonic quantum information processing is also an exciting prospect. For example, chip-based devices have recently demonstrated remarkable stability [10], and a hybrid scheme involving several spatial modes with Humphrey's temporal methods [1] and Donohue's ultrafast detection scheme [2] may enable near-term realizations of quantum circuits with more than „a few“ single-photon qubits.

## References

- [1] P. C. Humphreys, B. J. Metcalf, J. B. Spring, M. Moore, X-M. Jin, M. Barbieri, W. S. Kolthammer, and I. A. Walmsley, „Linear Optical Quantum Computing in a Single Spatial Mode,“ *Phys. Rev. Lett.* **111**, 150501 (2013).
- [2] J. M. Donohue, M. Agnew, J. Lavoie, and K. J. Resch, „Coherent Ultrafast Measurement of Time-Bin Encoded Photons,“ *Phys. Rev. Lett.* **111**, 153602 (2013).
- [3] J. Brendel, N. Gisin, W. Tittel, and H. Zbinden, „Pulsed Energy-Time Entangled Twin-Photon Source for Quantum Communication,“ *Phys. Rev. Lett.* **82**, 2594 (1999).
- [4] I. Marcikic, H. de Riedmatten, W. Tittel, H. Zbinden, M. Legré, and N. Gisin, „Distribution of Time-Bin Entangled Qubits over 50 km of Optical Fiber,“ *Phys. Rev. Lett.* **93**, 180502 (2004).
- [5] J. D. Franson, „Bell Inequality for Position and Time,“ *Phys. Rev. Lett.* **62**, 2205 (1989).
- [6] E. Knill, R. LaFlamme, and G. J. Milburn, „A Scheme for Efficient Quantum Computation with Linear Optics,“ *Nature (London)* **409**, 46 (2001).
- [7] T. B. Pittman, M. J. Fitch, B. C. Jacobs, and J. D. Franson, „Experimental Controlled-NOT Logic Gate for Single Photons in the Coincidence Basis,“ *Phys. Rev. A* **68**, 032316 (2003).
- [8] J. L. O'Brien, G. J. Pryde, A. G. White, T. C. Ralph, and D. Branning, „Demonstration of an All-Optical Quantum Controlled-NOT Gate,“ *Nature (London)* **426**, 264 (2003).
- [9] J. Huang and P. Kumar, „Observation of Quantum Frequency Conversion,“ *Phys. Rev. Lett.* **68**, 2153 (1992).
- [10] A. Politi, M. J. Cryan, J. G. Rarity, S. Yu, and J. L. O'Brien, „Silica-on-Silicon Waveguide Quantum Circuits,“ *Science* **320**, 646 (2008)

## About the Author

### Todd Pittman

Todd Pittman is an Associate Professor of physics at University of Maryland, Baltimore County, Baltimore, where he performs research on photonic quantum information processing, the generation of nonclassical states of light, and ultralow-power optical nonlinearities. Pittman received a B.S. from Bucknell University in 1990 and a Ph.D. in experimental quantum optics from UMBC in 1996. From 1996 to 2006, he worked as a post-doc and senior scientist at the Johns Hopkins University Applied Physics Laboratory.

DOI: 10.1103/Physics.6.110

URL: <http://link.aps.org/doi/10.1103/Physics.6.110>

© 2013 American Physical Society



## 2 Gute Zeiten für QuBits

Physics 6, 110 (2013)

### Standpunkt

Gute Zeiten für QuBits

**Todd Pittman**

*Institut für Physik, Universität von Maryland, Baltimore MD 21250, USA*

Veröffentlicht am 9. Oktober 2013

*Zeitlich codierte Qubits verbessern die Aussichten für Quantencomputer mit einzelnen Photonen.*

Themenbereiche: **Quanteninformation, Optik**

#### Eine Sicht auf:

##### **Lineare optische Quanteninformatik im Einzelraummodus**

Peter C. Humphreys, Benjamin J. Metcalf, Justin B. Spring, Merritt Moore, Xian-Min Jin, Marco Barbieri, W. Steven Kolthammer and Ian A. Walmsley

*Phys. Rev. Lett.* **III**, 2013 - Veröffentlicht am 9. Oktober 2013

##### **Kohärente ultraschnelle Messung von Time-Bin-codierten Photonen**

John M. Donohue, Megan Agnew, Jonathan Lavoie, and Kevin J. Resch

*Phys. Rev. Lett.* **III**, 2013 - Veröffentlicht am 9. Oktober 2013

Im Gegensatz zu klassischen Informationsbits, die entweder den Wert 0 *oder* 1 annehmen, können Quantenbits - oder „Qubits“ - in Überlagerungszuständen von 0 *und* 1 vorliegen. Genau wie klassische Bits sind Qubits physikalische Objekte, die in realen Systemen implementiert werden müssen. Forscher haben Einzelphotonen als Qubits verwendet, wobei die Quanteninformation in Form von Polarisation, Drehimpuls und vielen anderen Freiheitsgraden kodiert wird. Der Freiheitsgrad Time-Bin (d. h. die Kodierung von Quanteninformationen in Form relativer Ankunftszeiten von Lichtimpulsen) bietet eine besonders robuste Art von Einzelphotonen-Qubits<sup>1</sup>. Zwei kürzlich erschienene Arbeiten haben die Verwendung von Time-Bin-Qubits<sup>2</sup> auf dramatische Weise weiterentwickelt.

In der Fachzeitschrift *Physical Review Letters* haben Peter Humphreys und Kollegen von der Universität Oxford (Vereinigtes Königreich) eine Technik für optisches Quantencomputing mit TBQs entwickelt [1]. Im Prinzip ermöglicht ihr Konzept das photonische Quantencomputing unter Verwendung eines einzigen optischen Pfads (oder einer Faser) anstelle eines Labyrinths aus mehreren Pfaden, wodurch die Gesamtkomplexität dieser Art von Systemen drastisch reduziert wird. Ebenfalls in *Physical Review Letters* haben John Donohue und Kollegen vom Institute for Quantum Computing der Universität Waterloo, Kanada, eine ultraschnelle Messtechnik für TBQs vorgestellt, die höhere Datenraten und weniger Fehler in photonischen Systemen ermöglichen könnte [2]. Diese beiden Entwicklungen sind ein großer Schritt auf dem Weg zur Realisierung praktischer Quanteninformationsverarbeitungsgeräte mit SBQs.

TBQs wurden ursprünglich von einer Gruppe an der Universität Genf Schweiz entwickelt [3]. Um die Grundform dieser Qubits zu verstehen, betrachtet man ein Einzelphotonen-Wellenpaket, das ein Mach-Zehnder-Interferometer mit zwei Pfaden durchläuft. Wenn die beiden Pfade unterschiedlich lang sind, verlässt das Einzelphotonen-Wellenpaket das Interferometer in einer quantenmechanischen Überlagerung eines „früheren Time-Bins“<sup>3</sup> und eines „späteren Time-Bins“<sup>4</sup>. Wenn man die

<sup>1</sup>Single-Photon Qubit = SPQ

<sup>2</sup>Time-Bin Qubit = TBQ

<sup>3</sup>in der Time-Bin-Konfiguration TBK<sub>SZS</sub> der vorausseilende Satellit

<sup>4</sup>in der TBK<sub>SZS</sub> der nacheilende Satellit

Parameter des Interferometers so einstellt, dass man die relative Phase und Amplitude kontrolliert, kann man beliebige TBQs<sup>5</sup> erzeugen<sup>6</sup>. Die Genfer Gruppe hat gezeigt, dass sich diese TBQs über große Entfernungen in optischen Fasern mit sehr geringer Dekohärenz ausbreiten können, was wesentlich robustere Quantenkommunikationssysteme ermöglicht als solche, die auf polarisationskodierten Qubits basieren [4, 5].

In Erweiterung dieser Ideen aus dem Bereich der Quantenkommunikation haben Humphreys *et al.* nun gezeigt, dass es möglich ist, TBQs für Quantencomputer zu verwenden [1]. Ihr Ansatz basiert auf dem bekannten Paradigma des Linear Optics Quantum Computing (LOQC), das eine große Anzahl von Ancilla-Photonen<sup>7</sup> und messungsbasierte Nichtlinearitäten verwendet, um nahezu deterministische Quantenlogik-Gatter zu realisieren [6]. Frühere Arbeiten zum LOQC-Ansatz basierten in erster Linie auf Polarisations-Qubits und räumlichen Moden, die sich schnell zu extrem unhandlichen, verschachtelten Interferometern mit einer sehr großen Anzahl von Pfaden auswachsen können, die mit einer Präzision unterhalb der Wellenlänge stabilisiert werden müssen [6–8]. Im Gegensatz dazu haben Humphreys *et al.* nun gezeigt, dass die Verwendung von TBQs den LOQC-Ansatz in einem *einzigsten räumlichen Modus* implementiert, was die Möglichkeit einer weitaus geringeren experimentellen Komplexität und eines geringeren Potentials für Dekohärenzmechanismen bietet.

Wie in Abb. 1 gezeigt, beinhaltet ihr Ansatz eine große Kette von TBQs, die sich entlang eines einzelnen Wellenleiters (z. B. einer optischen Faser) ausbreiten, wobei der verfügbare Polarisationsfreiheitsgrad genutzt wird, um einen „Register“-Modus für die Ausbreitung und Speicherung und einen „Verarbeitungs“-Modus für Qubit-Manipulationen zu definieren. Während sich die Qubits entlang des Wellenleiters ausbreiten, ziehen Humphreys *et al.* verschiedene Zeitabschnitte aus dem Registermodus heraus, verarbeiten sie mit Phasenverschiebungen, Bitumkehrungen und Kopplungen und führen sie dann auf kohärente Weise in den Registermodus zurück. Die Autoren nutzten diese Ideen, um eine vollständige Reihe von SPQ-Operationen und Zwei-Qubit-Verschränkungsgattern vorzuschlagen, die für eine universelle Quantenberechnung erforderlich sind. Die Gültigkeit ihrer grundlegenden Methode wurde in einem sehr überzeugenden Experiment demonstriert, bei dem SPQs und lineare optische Elemente zur Erzeugung und Manipulation von TBQs verwendet wurden [1].

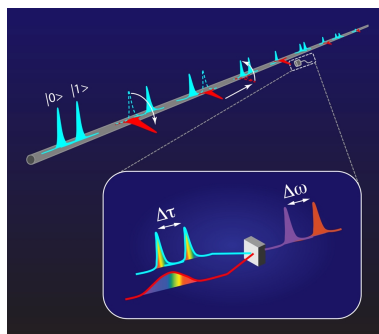


Abb. 1: Konzeptuelle Darstellung des LOQC in einem einzigen räumlichen Modus [1]. Eine lange Kette von SPQs breitet sich in einem einzigen Wellenleiter (wie einer Faser) aus. Der Freiheitsgrad der Polarisation wird genutzt, um verschiedene Zeit-Bins in einen „Verarbeitungsmodus“ für Qubit-Operationen, logische Gatter und Detektion zu schalten. Die Abbildung zeigt eine neue Methode zur ultraschnellen Detektion von Zeitbits, bei der gechirpte Laserpulse und Summenfrequenzgenerierung verwendet werden, um die Zeitbits kohärent in Frequenzbits abzubilden [2]. (APS/Alan Stonebraker)

Bei jedem Ansatz zur Quanteninformationsverarbeitung ist eine der wichtigsten Voraussetzungen die Fähigkeit, beliebige Qubitzustände zu messen. Für die hier diskutierten Zeitbits bedeutet dies, dass der Abstand zwischen den „frühen“ und „späten“ Zeitbits viel größer sein muss als die Auflösungszeit des verwendeten Photonendetektionssystems. Bei handelsüblichen Geräten erfordert dies in der Regel eine Trennung der Zeitbins im Nanosekundenbereich und begrenzt die effektive „Datenrate“ für das Senden von TBQs über einen Quantenkanal. Durch eine radikale Abkehr von den traditionellen TBQ-Detektionstechniken haben Donohue *et al.* diese Zahl nun auf die Pikosekundenskala gesenkt, was das Potential für eine wesentlich höhere Informationsdichte bietet [2].

<sup>5</sup>in der **TBK<sub>SZS</sub>** als eigentlicher Informationsträger der Zentralpeak

<sup>6</sup>weitere Informationen als Einstieg zum Forschungsthema **TBK<sub>SZS</sub>**, siehe:

<https://de.wikipedia.org/wiki/Time-Bin-Konfiguration#Literatur>

<https://www.nadirpoint.de/Dokumentenserver.html#MAS>

<sup>7</sup>„Hilfs“photonen, welche notwendige Prozesse anstoßen, wofür Einzelphotonen nicht genutzt werden (können).



Der Ansatz von Donohue *et al.* ist im Wesentlichen eine clevere Methode zur kohärenten Umwandlung von Zeitabschnitten in „Frequenzabschnitte“, die mit langsamen Detektoren leicht gemessen werden können, selbst wenn die Zeitabschnitte beliebig dicht beieinander liegen. Wie in Abb. 1 dargestellt, basiert diese Zeit-Frequenz-Umwandlung auf Qubit-Frequenzumwandlungstechniken, bei denen ein SPQ mit einem zusätzlichen starken Laserpuls in einem nichtlinearen Medium gemischt wird [9]. Durch gegensätzliches „Chirpen“ des Qubits und der starken Lasersignale (d. h., sie werden so gedehnt, dass ihre Frequenzen in der Zeit entgegengesetzt variieren - wie spiegelbildliche Regenbögen) konnten die Autoren zeigen, dass die Zeitbin-Informationen perfekt auf entsprechende Frequenzbereiche abgebildet werden. Die eigentliche Stärke der Technik, die Fähigkeit, Messungen beliebiger TBQs durchzuführen, ergibt sich, wenn der Hilfsaserpuls ebenfalls in eine Überlagerung von Zeitbins gesetzt wird. Mit diesem Ansatz konnten Donohue *et al.* experimentell ultraschnelle Messungen an beliebigen Zeitbin-Zuständen nachweisen [2].

Die nächsten Schritte, um diese beiden neuen vielversprechenden Ideen aus dem Forschungslabor in „praktische Geräte zur Quanteninformationsverarbeitung“ zu überführen, werden eher technischer Natur<sup>8</sup> sein. Für Humphreys Time-Bin-LOQC-Ansatz bedeutet dies einfach, dass der Schwerpunkt auf der Verbesserung der Effizienz der benötigten Photonentechnologien (Schalter, Phasenschieber usw.) liegt, während es für Donohues ultraschnelle TBQ-Detektoren bedeutet, die Effizienz des Zeit-Frequenz-Umwandlungsprozesses zu verbessern. Die Kombination dieser Ideen mit anderen jüngsten Fortschritten in der photonischen Quanteninformationsverarbeitung ist ebenfalls eine spannende Perspektive. So haben chipbasierte Geräte kürzlich eine bemerkenswerte Stabilität gezeigt [10] und ein hybrides Schema, das mehrere räumliche Moden mit zeitlichen Methoden von Humphreys [1] und Donohues ultraschnellem Detektionsschema [2] umfasst, könnte in naher Zukunft die Realisierung von Quantenschaltungen mit mehr als „ein paar“ SPQs ermöglichen.

## References

- [1] P. C. Humphreys, B. J. Metcalf, J. B. Spring, M. Moore, X-M. Jin, M. Barbieri, W. S. Kolthammer, and I. A. Walmsley, „Lineare optische Quanteninformatik im Einzelraummodus,“ *Phys. Rev. Lett.* **111**, 150501 (2013).
- [2] J. M. Donohue, M. Agnew, J. Lavoie, and K. J. Resch, „Kohärente ultraschnelle Messung von Time-Bin-codierten Photonen,“ *Phys. Rev. Lett.* **111**, 153602 (2013).
- [3] J. Brendel, N. Gisin, W. Tittel, and H. Zbinden, „Gepulste energie- und zeitverschränkte Zwillingphotonenquelle für die Quantenkommunikation,“ *Phys. Rev. Lett.* **82**, 2594 (1999).
- [4] I. Marcikic, H. de Riedmatten, W. Tittel, H. Zbinden, M. Legré, and N. Gisin, „Verteilung von zeitverschränkten Qubits über eine 50km-Glasfaser,“ *Phys. Rev. Lett.* **93**, 180502 (2004).
- [5] J. D. Franson, „Bells Ungleichung für Position und Zeit,“ *Phys. Rev. Lett.* **62**, 2205 (1989).
- [6] E. Knill, R. LaFlamme, and G. J. Milburn, „Eine Möglichkeit für effiziente Quantenberechnungen mit linearer Optik,“ *Nature (London)* **409**, 46 (2001).
- [7] T. B. Pittman, M. J. Fitch, B. C. Jacobs, and J. D. Franson, „Experimentelles nichtlogisch kontrolliertes Gatter für Einzelphotonen auf Koinzidenzbasis,“ *Phys. Rev. A* **68**, 032316 (2003).
- [8] J. L. O’Brien, G. J. Pryde, A. G. White, T. C. Ralph, and D. Branning, „Demonstration eines rein optischen quantengesteuerten nichtlogischen Gatters,“ *Nature (London)* **426**, 264 (2003).
- [9] J. Huang and P. Kumar, „Beobachtung von Quantenfrequenzumwandlungen,“ *Phys. Rev. Lett.* **68**, 2153 (1992).
- [10] A. Politi, M. J. Cryan, J. G. Rarity, S. Yu, and J. L. O’Brien, „Quantenschaltungen aus Siliziumdioxid auf Silizium-Wellenleitern-Basis,“ *Science* **320**, 646 (2008)

---

<sup>8</sup>Stichwort Temperaturstabilität, um dieses limitierende Problem zu lösen, wird es eine Zusammenarbeit von Anwendungsentwicklung und Grundlagenforschung weiterhin geben müssen.

## About the Author

### Todd Pittman

Todd Pittman ist außerordentlicher Professor für Physik an der Universität von Maryland, Baltimore und forscht auf dem Gebiet der photonischen Quanteninformationsverarbeitung, der Erzeugung nichtklassischer Zustände des Lichts und optischer Nichtlinearitäten bei extrem niedriger Leistung. Pittman erhielt 1990 einen B.S. von der Bucknell Universität und 1996 den Dokortitel in experimenteller Quantenoptik von der UMBC. Von 1996 bis 2006 arbeitete er als Post-Doc und leitender Wissenschaftler am der Johns Hopkins Universität im Bereich Angewandte Physik.

DOI: 10.1103/Physics.6.110

URL: <http://link.aps.org/doi/10.1103/Physics.6.110>

© 2013 American Physical Society

Alle Rechte und Pflichten bei Todd Pittman.  
Übersetzung: Dipl.- Ing. Björnstjerne Zindler, M.Sc.  
Im Zweifel gilt die englische Fassung.  
Keine kommerzielle Nutzung!

L<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X 2<sub>ε</sub>

