



## Abschlussbericht QK\_QuaLReP

<b>Zuwendungsempfänger:</b> Leibniz-Institut für Festkörper- und Werkstoffforschung Dresden e.V.(IFW), Prof. Dr. Oliver G. Schmidt	<b>Förderkennzeichen:</b> 16BQ1032
<b>Vorhabensbezeichnung:</b> „Quantenrepeater-Plattformen auf der Basis von Halbleitern“ Teilprojekt: „Angeordnete und spektral kontrollierte Quantenpunktsysteme zur Verschränkung räumlich getrennter stationärer Quantum Bits“	
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.11.2010 - 31.10.2013	
<b>Berichtszeitraum:</b> 01.11.2010 - 31.10.2013	

Kurze Darstellung zu:

### 1. Aufgabenstellung des Teilprojektes zum Verbundprojekt

- **Herstellung hochqualitativer selbst-organisierter und deterministisch positionierter Quantenpunkte:** Selbst-organisierte (willkürlich angeordnet) und perfekt angeordnete Quantenpunkte werden mittels Molekularstrahlepitaxie gewachsen. Alle Strukturen werden hinsichtlich der optischen Qualität und der Einstellbarkeit der elektronischen Struktur optimiert. Es ist das Ziel, eine innovative „Quanten-Hardware“ zu schaffen, welche Schlüsselexperimente für den Quantenrepeater mittels optischer Methoden ermöglicht.
- **Entwicklung und Anwendung einer flexiblen Technologie zur Abstimmung der QP Emission mittels Kombination von elastischer Verspannung und elektrischen Feldern:** Quantenpunktstrukturen sollen auf aktiven piezoelektrischen Substraten integriert werden, die die Abstimmung der optischen Eigenschaften (insbesondere die Emissionsfrequenz) in einem breiten Spektralbereich durch elastische Verspannung ermöglichen. Gleitzeitig sollte die zu entwickelnde Technologie kompatibel mit diversen Quantenpunktstrukturen sein (insbesondere mit QP mit Emission im Spektralbereich der Telekommunikation, sowie mit QP eingebettet in optische Mikroresonatoren, die ideal zur effizienten Interkonversion sind). Zudem sollte sie das Anlegen elektrischer Felder an den QP ermöglichen. Der Ansatz wird zur Optimierung der Zwei-Photonen Interferenz zwischen Trionenemission von unabhängigen QPs benutzt, was ein Schlüsselement zur Verschränkung separater Spins darstellt.

### 2. Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben während der gesamten Förderperiode durchgeführt wurde

Verschiedene wichtige Forschungsaufbauten wurden benötigt, um das Forschungsziel zu erreichen. Um die Linienbreite einzelner QPs zu prüfen wurde ein Fabry-Perot Interferometer (mit Kontrolleinheit) aufgebaut. In den Aufbau zur Messung der Zwei-Photonen-Interferenz wurden zwei Silizium Avalanche-Photodioden und ein faserbasiertes 50:50 Verbindungsstück integriert. Ein Michelson Interferometer wurde mit zwei neuen retro-Reflektoren aufgebaut, um die Kohärenzzeit einzelner Photonen zu messen.

Stellen für einen Doktoranden und einen Wissenschaftler mit abgeschlossener Promotion wurden besetzt, um die Aufgabenstellung des Projektes zu erfüllen. Dank dieser Arbeitskräfte konnten die Projektziele erfolgreich erreicht werden. Außerdem konnte uns eine studentische Hilfskraft bei der Automatisierung unserer Versuchsaufbauten in den optischen Laboren unterstützen.

### 3. Planung und Ablauf des Vorhabens

In diesem Abschnitt haben wir die Verläufe der einzelnen Arbeitspakete zusammengefasst.

**IFW\_AP1:** Epitaxie hochqualitativer selbst-organisierter und positionierter Quantenpunkte (QPs). Dieses Ziel wurde vollständig erreicht. Die Emissionswellenlänge der QPs liegt bei 900 nm. Die Erfolgsrate bei der Positionierung der QPs liegt bei 40% und die Linienbreite dieser einzelnen QPs bei exzellenten  $7\mu\text{eV}$ , was 10 mal schmaler als die ursprünglich erwarteten  $70\mu\text{eV}$ .

**IFW\_AP2:** Entwicklung einer Technologie zur Kontrolle der QP Emission mittels Kombination von mechanischer Verspannung und elektrischen Feldern. Dieser Abschnitt dokumentiert den größten Erfolg der letzten drei Jahre. Wir können die Wellenlänge einzelner QPs um mehr als 20 meV durchstimmen, was die ursprünglichen Anforderungen um mehr als 9 meV übertrifft.

**IFW\_AP3:** Optische Untersuchung und Verständnis der verspannungsinduzierten Effekte. Die Durchstimmung durch mechanische Verspannung deckte einige entscheidende physikalische Zusammenhänge auf. So konnte ein Anticrossing der strahlenden Anregungszustände beobachtet werden. Theoretische Modelle wurden entworfen, um die Beobachtungen zu erklären.

**IFW\_AP4:** Zwei-Photonen Interferenz zwischen Trionenemission von unabhängigen QPs. Die Wellenlängen zweier isolierter QPs konnten erfolgreich in Resonanz versetzt werden. Darüber hinaus ist es möglich, die Lebenszeit und Emissionswellenlänge einzelner QPs unabhängig voneinander anzupassen, was entscheidend für die Verwirklichung der Fourier-begrenzten Einzelphotonenerzeugung ist. Die Vermessung der zwei-Photonen-Interferenz ist zurzeit Thema unserer aktuellen Forschung.

### 4. Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde, insbesondere

Für das Wachstum von hochwertigen Halbleiter QPs haben wir eine Loch-Auffüllungs-Technologie entwickelt und damit Einzelphotonenemissionen mit sehr schmalen Linienbreiten erreicht. Die Ununterscheidbarkeit der Einzelphotonen, die von den deterministisch platzierten QPs erzeugt wurden, erreicht Werte von bis zu 0,73 (Joens *et al.*, Nano Letter 13, 126). Damit konnte die Güte im Vergleich zum Stand von vor 3 Jahren entscheidend verbessert werden. Im nächsten Schritt sollen die Wachstumsbedingungen weiter optimiert und hochwertige QPs auch für andere Spektralbereiche erzeugt werden.

Die ersten Versuche zur spektralen Anpassung mittels mechanischer Verspannung wurden von S. Seidl *et al.* (Appl. Phys. Lett. 88, 203113) durchgeführt. Die maximale Verspannung, die dabei angelegt werden konnte, war durch die Dicke des Substrates beschränkt. Unsere Gruppe hat eine Prozedur basierend auf Nanomembranen entwickelt, mit der viel höhere Verspannungen (mehr als eine Größenordnung) an die QPs angelegt werden können (T. Zander *et al.*, Opt. Exp. 17, 22452 and F. Ding *et al.*, Phys. Rev. Lett. 104, 067405). Während der Förderperiode wurde diese Technologie mit den jetzigen Strukturen weiter verfeinert. So können nun entweder Starkverschiebungen durch elektrische Felder oder ultraschnelle elektronische Anregungen implementiert werden. Dies ermöglicht die unabhängige Beeinflussung wichtiger Parameter in den QPs, so z.B. die Wellenlänge bei getacketer Einzelphotonenerzeugung und die Eliminierung der Feinstrukturaufspaltung in einzelnen QPs. Im nächsten Schritt sollen sowohl verschränkte Photonenpaare erzeugt werden, die mittels mechanischer Verspannung spektral durchgestimmt werden können, als auch die Zweiphotoneninterferenz von unabhängig elektrisch angeregten QPs und die Kopplung zwischen Halbleiter QP und atomarem Gas erforscht werden. Diese Ziele scheinen erst durch die Erfahrungen aus der letzten Förderperiode möglich.

### 5. Angabe bekannter Konstruktionen, Verfahren und Schutzrechte, die für die Durchführung des Vorhabens benutzt wurde



Die Herstellung geordneter QPs beruht auf unseren früheren Erkenntnissen auf diesem Gebiet, wie beispielsweise beschrieben in "Lateral Alignment of Epitaxial Quantum Dots (ISBN 978-3-540-46936-0)" verfasst von Prof. Oliver G. Schmidt.

Die Entwicklung der mechanisch durchstimmbaren QP-Strukturen basiert zum Teil auf der Vorarbeit anderer Gruppen (z.B., Seidl et al., Appl. Phys. Lett. 88, 203113) und unserer eigenen Gruppe (z.B., F. Ding et al., Phys. Rev. Lett. 104, 067405).

## 6. Angabe der verwendeten Fachliteratur sowie der benutzten Informations- und Dokumentationsdienste

Die Forschungstätigkeiten basierten auf vorherigen Veröffentlichungen in den jeweiligen Gebieten, detaillierte Auflistungen sind in den Bezugslisten unserer Artikel zu finden.

## 7. Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Partner	Akronym	Kooperation in Bezug auf
Universität Kassel	<b>UKAS</b>	Abstimmbare Quantenpunkte mit effizienter Lichtemission im Wellenlängenbereich um 1,55 $\mu\text{m}$
Universität Stuttgart	<b>US</b>	Hong-Ou-Mandel Messungen an einzelnen Quantenpunkten
Technische Universität Dortmund	<b>TUDo</b>	Lieferung von unverspannten und statisch geladenen GaAs/AlGaAs Quantenpunktstrukturen
Universität Paderborn	<b>UPB</b>	Lieferung von angeordneten Quantenpunktketten für Wellenleiter
Technische Universität München	<b>TUM</b>	Lieferung von angeordneten Quantenpunkten für photonische Kristallstrukturen
Universität Würzburg	<b>UW</b>	Abstimmbare Quantenpunkte in Mikroresonatoren
Max-Planck-Institut für Festkörperforschung Stuttgart	<b>MPI</b>	Interpretation der beobachteten verspannungsinduzierten Phänomene
Technical University of Delft	<b>TUD</b>	Eine hybride Grenzfläche zwischen den Halbleiter QPs und atomarem Rubidiumgas.
University of Nottingham	<b>UON</b>	Laserinduzierte Diffusion von Mn-Zwischengitterionen in Quantentöpfen.
Cardiff University	<b>CU</b>	Ultraschnelle Spektroskopie an QPs
Johannes Kepler Universität Linz	<b>JKU</b>	Leichtlochzustände in QPs

## 8. Gesamtliste der Veröffentlichungen

"Strain-induced tuning of the emission wavelength of high quality GaAs/AlGaAs quantum dots in the spectral range of the 87Rb D2 lines"

S. Kumar, R. Trotta, E. Zallo, J. D. Plumhof, P. Atkinson, A. Rastelli, O. G. Schmidt, Appl. Phys. Lett. 99, 161118 (2011)

"Hybrid semiconductor-atomic interface: slowing down single photons from a quantum dot"

N. Akopian, L. Wang, A. Rastelli, O. G. Schmidt, V. Zwiller,

Nature Photon. 5, 230 (2011)

"Strain-induced anticrossing of bright exciton levels in single self-assembled GaAs/Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As and In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As/GaAs quantum dots"

J. D. Plumhof, V. Křápek, F. Ding, K. D. Jöns, R. Hafenbrak, P. Klenovský, A. Herklotz, K. Dörr, P. Michler, A. Rastelli, O. G. Schmidt,  
Phys. Rev. B 83, 121302 (2011)

"Independent wavelength and density control of uniform GaAs/AlGaAs quantum dots grown by infilling self-assembled nanoholes"

P. Atkinson, E. Zallo, O. G. Schmidt,  
J. Appl. Phys. 112, 054303 (2012)

"Universal Recovery of the Energy-Level Degeneracy of Bright Excitons in InGaAs Quantum Dots without a Structure Symmetry"

R. Trotta, E. Zallo, C. Ortix, P. Atkinson, J. D. Plumhof, J. van den Brink, A. Rastelli, and O. G. Schmidt,  
Phys. Rev. Lett. 109, 147401 (2012)

"Controlling quantum dot emission by integration of semiconductor nanomembranes onto piezoelectric actuators"

Rastelli et al.,  
Phys. Status Solidi B, 249, 687 (2012)

"Nanoengineering the built-in electric field of a photonic device by interstitial-ion diffusion"

Nasir, O. Makarovskiy, S. Kumar, M. W. Fay, R. Champion, A. Rastelli, O. G. Schmidt, L. Eaves, and A. Patane,  
Phys. Rev. B 85, 195317 (2012)

"Nanomembrane quantum-light-emitting diodes integrated onto piezoelectric actuators"

R. Trotta et al.,  
Adv. Mater. 24, 2668 (2012)

"Experimental methods of post-growth tuning of the excitonic fine structure splitting in semiconductor quantum dots"

J. D. Plumhof, R. Trotta, A. Rastelli, O. G. Schmidt  
Nanoscale Research Letters 7, 336 (2012)

"Triggered Indistinguishable Single Photons with Narrow Line Widths from Site-Controlled Quantum Dots"

K. D. Jöns, P. Atkinson, M. Müller, M. Heldmaier, S. M. Ulrich, O. G. Schmidt, and P. Michler,  
Nano Letters 13, 126 (2013)

"Tuning of the valence band mixing of excitons confined in GaAs/AlGaAs quantum dots via piezoelectric-induced anisotropic strain"

J. D. Plumhof, R. Trotta, V. Křápek, E. Zallo, P. Atkinson, S. Kumar, A. Rastelli, O. G. Schmidt  
Phys. Rev. B 87, 075311 (2013)

"A Nanomembrane-based wavelength-tunable high-speed single-photon-emitting diode"

J. Zhang, F. Ding, E. Zallo, R. Trotta, B. Höfer, L. Han, S. Kumar, Y. Huo, A. Rastelli, O. G. Schmidt  
Nano Lett. 13 (12), 5808 (2013)

"Independent control of exciton and biexciton energies in single quantum dots via electroelastic fields"

R. Trotta, E. Zallo, E. Magerl, O. G. Schmidt, A. Rastelli  
Phys. Rev. B 88, 155312 (2013)

"Vectorial nonlinear coherent response of a strongly confined exciton–biexciton system"

J. Kasprzak, S. Portolan, A. Rastelli, L. Wang, J. D. Plumhof, O. G. Schmidt, W. Langbein  
New J. Phys. 15, 055006 (2013)



“Ultra-small excitonic fine structure splitting in highly symmetric quantum dots on GaAs (001) substrate”

Y. H. Huo, A. Rastelli, and O. G. Schmidt  
Appl. Phys. Lett. 102, 152105 (2013)

“Anomalous anticrossing of neutral exciton states in GaAs/AlGaAs quantum dots”

S. Kumar, E. Zallo, Y. H. Liao, P. Y. Lin, R. Trotta, P. Atkinson, J. D. Plumhof, F. Ding, B. D. Gerardot, S. J. Cheng, A. Rastelli, O. G. Schmidt  
Phys. Rev. B 89, 115309 (2014)

“A light-hole exciton in a quantum dot”

Y. H. Huo, B. J. Witek, S. Kumar, J. R. Cardenas, J. X. Zhang, N. Akopian, R. Singh, E. Zallo, R. Grifone, D. Kriegner, R. Trotta, F. Ding, J. Stangl, V. Zwiller, G. Bester, A. Rastelli, O. G. Schmidt  
Nat. Phys. 10, 46 (2014)

**Datum: 03.04.2014**

**TP-Leiter: Oliver G, Schmidt**

## Berichtsblatt

1. ISBN oder ISSN	2. Berichtsart (Schlussbericht oder Veröffentlichung) Veröffentlichung
3. Titel	
<ol style="list-style-type: none"> <li>1. <i>"Strain-induced tuning of the emission wavelength of high quality GaAs/AlGaAs quantum dots in the spectral range of the 87Rb D2 lines"</i></li> <li>2. <i>"Hybrid semiconductor-atomic interface: slowing down single photons from a quantum dot"</i></li> <li>3. <i>"Strain-induced anticrossing of bright exciton levels in single self-assembled GaAs/AlxGa1-xAs and InxGa1-xAs/GaAs quantum dots"</i></li> <li>4. <i>"Independent wavelength and density control of uniform GaAs/AlGaAs quantum dots grown by infilling self-assembled nano-holes"</i></li> <li>5. <i>"Universal Recovery of the Energy-Level Degeneracy of Bright Excitons in InGaAs Quantum Dots without a Structure Symmetry"</i></li> <li>6. <i>"Controlling quantum dot emission by integration of semiconductor nanomembranes onto piezoelectric actuators"</i></li> <li>7. <i>"Nanoengineering the built-in electric field of a photonic device by interstitial-ion diffusion"</i></li> <li>8. <i>"Nanomembrane quantum-light-emitting diodes integrated onto piezoelectric actuators"</i></li> <li>9. <i>"Experimental methods of post-growth tuning of the excitonic fine structure splitting in semiconductor quantum dots"</i></li> <li>10. <i>"Triggered Indistinguishable Single Photons with Narrow Line Widths from Site-Controlled Quantum Dots"</i></li> <li>11. <i>"Tuning of the valence band mixing of excitons confined in GaAs/AlGaAs quantum dots via piezoelectric-induced anisotropic strain"</i></li> <li>12. <i>"A Nanomembrane-based wavelength-tunable high-speed single-photon-emitting diode"</i></li> <li>13. <i>"Independent control of exciton and biexciton energies in single quantum dots via electroelastic fields"</i></li> <li>14. <i>"Vectorial nonlinear coherent response of a strongly confined exciton–biexciton system"</i></li> <li>15. <i>"Ultra-small excitonic fine structure splitting in highly symmetric quantum dots on GaAs (001) substrate"</i></li> </ol>	
4. Autor(en) [Name(n), Vorname(n)] Schmidt, Oliver G.; Rastelli, Armando; Ding, Fei; Trotta, Rinaldo; Plumhof, Johannes D.; Kumar, Santosh; Atkinson, Paula; Huo, Yongheng; Zallo, Eugenio; Krapek, Vlastimil; Zhang, Jiaxiang; Höfer Bianca; Zwiller, Valery; Akopian, Nika; Bestler, Gabriel; Singh, Ranber; Witek, Babara; etc.	5. Abschlussdatum des Vorhabens 31.10.2013
	6. Veröffentlichungsdatum
	7. Form der Publikation
8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse)	9. Ber. Nr. Durchführende Institution
<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Institute for Integrative Nanosciences, IFW Dresden, Helmholtzstraße 20, 01069 Dresden, Germany</li> <li>2. Institute of Semiconductor and Solid State Physics, Johannes Kepler University Linz, Altenbergerstraße 69, 4040 Linz, Austria</li> <li>3. Center for Advancing Electronics Dresden (CfAED), Dresden University of Technology, 01067 Dresden, Germany</li> <li>4. Kavli Institute of Nanoscience, Delft University of Technology, Lorentzweg 1, 2628CJ Delft, The Netherlands</li> <li>5. Max-Planck-Institute for Solid State Research, Heisenbergstraße 1, 70569 Stuttgart, Germany</li> </ol>	10. Förderkennzeichen
	11. Seitenzahl
12. Fördernde Institution (Name, Adresse)  Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) 53170 Bonn	13. Literaturangaben
	14. Tabellen
	15. Abbildungen
16. Zusätzliche Angaben	
17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum)	

#### 18. Kurzfassung

Ein Quantenrepeater für optische Quantenkommunikation kann auf Grundlage einzelner selbstorganisierter Halbleiter-Quantenpunkte (QPs) hergestellt werden. Dies beruht auf der Tatsache, dass Halbleiter QPs zu den vielversprechendsten Kandidaten für nichtklassische Quantenlichtquellen, wie Einzelphotonen und verschränkte Photonenpaare, zählen. Dennoch stellen inhomogene spektrale Aufweitungen von ca. 10 meV, sowie nicht-entartete strahlende Anregungszustände, eine große Hürde für die Anwendung bei Quantentechnologien dar, welche unvermeidbar bei der Produktion von QPs sind. Darum ist die präzise Kontrolle der Emissionseigenschaften von QPs notwendig. Während der Förderperiode haben wir eine Nanolöcher-Auffüll-Methode zur Herstellung von platzierten und optisch hochwertigen QPs entwickelt, was schließlich zur Realisierung von ununterscheidbaren Einzelphotonenemissionen aus diesen Strukturen führte. Zusätzlich zu der in-situ Wachstumssteuerung, haben wir ebenfalls eine neuartige Nanomembran-basierte ex-situ Technik zur Deformationsregelung entworfen, die die QP Emissionslinien um mehr als 20 meV verschieben und außerdem die Feinstrukturaufspaltung der neutralen Anregungszustände eliminieren kann. Damit können spektral durchstimmbare Einzelphotonen, sowie verschränkte Photonenpaare erzeugt werden. Mit dieser Technologie haben wir die Kopplung zwischen atomarem Rubidiumgas und Einzelphotonen aus QP-Emittern gezeigt, was den Weg in Richtung eines hybriden Quantenspeichers ebnet. Da Halbleiter QPs monolithisch in elektronische und photonische Strukturen anhand ausgereifter Halbleiter-Fabrikationstechniken integriert werden können, konnten die ersten voll-elektronisch spektral durchstimmbaren Einzelphotonenquellen eindrucksvoll demonstriert werden. Dabei wurde die Einzelphotonenerzeugung durch kurze elektrische Impulse mit einer Arbeitsfrequenz von bis zu 0,8 GHz realisiert. Zusammengefasst stellen diese Arbeiten eine äußerst vielversprechende Perspektive zur Verwirklichung eines Festkörper-Quantenrepeaters dar, der auf hochreinen Einzelphotonen und verschränkten Photonenpaaren beruht.

#### 19. Schlagwörter

#### 20. Verlag

#### 21. Preis

## Ausführliche Erläuterungen zum Abschlussbericht QK\_QuaHLReP

<b>Zuwendungsempfänger:</b> Leibniz-Institut für Festkörper- und Werkstoffforschung Dresden e.V.(IFW), Prof. Dr. Oliver G. Schmidt	<b>Förderkennzeichen:</b> 16BQ1032
<b>Vorhabensbezeichnung:</b> „Quantenrepeater-Plattformen auf der Basis von Halbleitern“ Teilprojekt: „Angeordnete und spektral kontrollierte Quantenpunktsysteme zur Verschränkung räumlich getrennter stationärer Quantum Bits“	
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.11.2010 - 31.10.2013	
<b>Berichtszeitraum:</b> 01.11.2010 - 31.10.2013	

Eingehende Darstellung

### 1. des erzielten Ergebnisses

Nachfolgend erläutern wir ausführlich die bedeutendsten Ergebnisse, die während der Förderungsdauer erzielt wurden. Diese werden in den vier Arbeitspaketen aufgelistet.

- **IFW\_AP1: Epitaxie hochwertiger selbst-organisierter und positionierter Quantenpunkte**

Ziel des Arbeitspaketes war es, optisch hochwertige Quantenpunkte (QPs) für die Verbundpartner herzustellen. Damit hat das QuaHL-Rep die Entwicklung der Wachstumstechniken für hochwertige III-V Halbleiter-QPs, mit einer Emissionswellenlänge zwischen 700-790 nm (GaAs/AlGaAs QPs) oder 900-1000 nm (InGaAs/GaAs), unterstützt. Dies sind die wichtigsten Ergebnisse im Einzelnen:

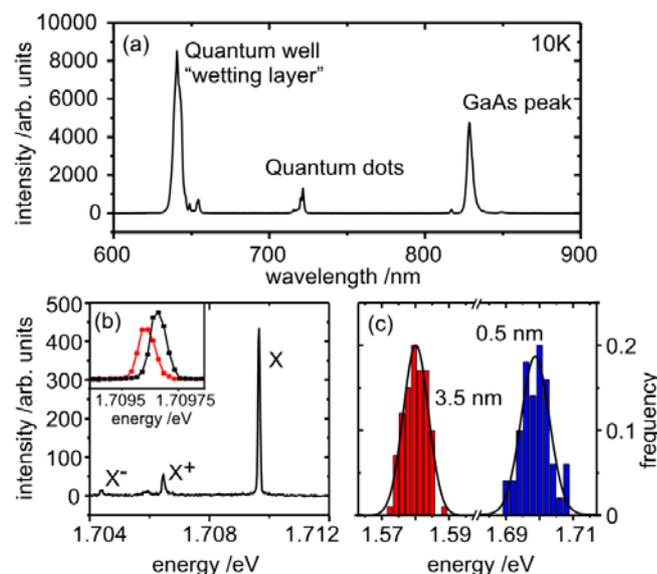


Abbildung 1 (a) Photolumineszenzspektrum einer durchschnittlich 1 nm dicken QP-Schicht. (b) Spektrum eines einzelnen QPs mit neutraler und geladener Excitonspektrallinie. Das Spektrum oben links zeigt die orthogonal polarisierten Emissionslinien des neutralen Excitons (Feinstrukturaufspaltung).

(c) Frequenzverteilung der Emissionsenergien des neutralen Excitons von 100 (50), durchschnittlich 3.5 nm (0.5 nm) dicken QPs, aus Ref. [4].

Das Wachstum von einzelnen GaAs/AlGaAs QPs in selbstorganisierten Nanolöchern, die durch ein Gallium-Tröpfchen-Ätzverfahren gewonnen werden, wurde gezeigt. Die Halbwertsbreite der Emissionslinien ist kleiner als 10 meV, und die Emissionslinienbreite der einzelnen QPs liegt an der spektralen Auflösungsgrenze ( $<40 \mu\text{eV}$ ). Abbildung 1(a) zeigt das Photolumineszenzspektrum (PL-Spektrum) einer GaAs Probe mit geringer QP-Größenverteilung, bei der die Emissionswellenlänge bei 720 nm liegt. Die einzelnen Emissionslinien eines isolierten QPs sind in Abbildung 1(b) dargestellt, wobei hier eindeutig zwischen der Excitonlinie (X) und den geladenen Excitonlinien ( $X^+$ ,  $X^-$ ) unterschieden werden kann. Der kleine Einschub links oben in Abbildung 2(b) zeigt die polarisationsaufgelöste Feinstrukturaufspaltung des Excitons (X). Bemerkenswert ist, dass die Halbwertsbreite der Emission des ganzen QP-Spektrums kleiner als 10 meV ist, was die gute homogene Größenverteilung der QPs beweist. Eine andere faszinierende Eigenschaft der QPs ist die sehr genaue Kontrolle der Emissionsenergie von 1.6 eV bis 1.8 eV, die durch Änderung der Depositionsmenge des GaAs in die geätzten Nanolöcher erreicht wird (siehe Abbildung 2).

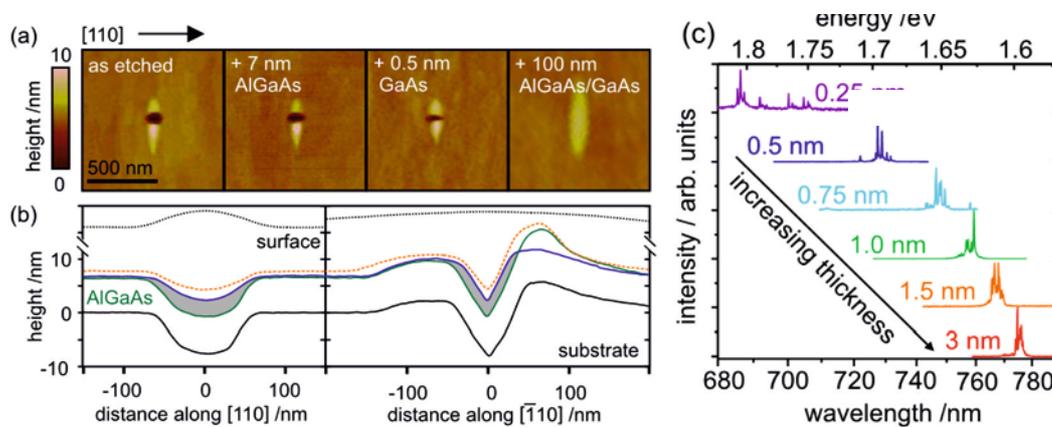


Abbildung 2 (a) AFM-Bilder der Nanolöcher zu verschiedenen Zeiten des QP-Wachstumsprozesses. (b) AFM Linienprofile (durchschnitt über 10 gescannte Nanolöcher): nach den Ätzen (schwarz), nach dem ersten Wachstumsschritt von 7 nm AlGaAs (grün), 0.5 nm GaAs (blau), 1.5 nm GaAs (orange gestrichelt), und nach dem Wachstum der Deckschicht von 80 nm AlGaAs und 20 nm GaAs (schwarz gestrichelt). Der graue Bereich zeigt das Volumen der 0.5 nm GaAs QPs. (c) PL der fertigen QPs mit verschiedenen Dicken des GaAs - Aus Ref. [4].

Dieses neue Wachstumsverfahren wurde außerdem erfolgreich eingesetzt, um QPs mit sehr kleiner Feinstrukturaufspaltung (FSS) herzustellen (siehe Abbildung 3). Dabei bilden sich symmetrische Nanolöcher durch ein Aluminiumtröpfchen-Ätzverfahren heraus. Wie man durch AFM-Messungen sehen kann, bilden sich die Löcher symmetrisch entlang der zwei orthogonalen Kristallachsen. Die polarisationsabhängige PL-Messung spiegelt die Symmetrie der QPs wieder und zeigt eine durchschnittliche FSS von nur  $3.9 \mu\text{eV}$ . [15] Damit bietet sich eine geeignete Möglichkeit der Erzeugung verschränkter Photonenpaare.

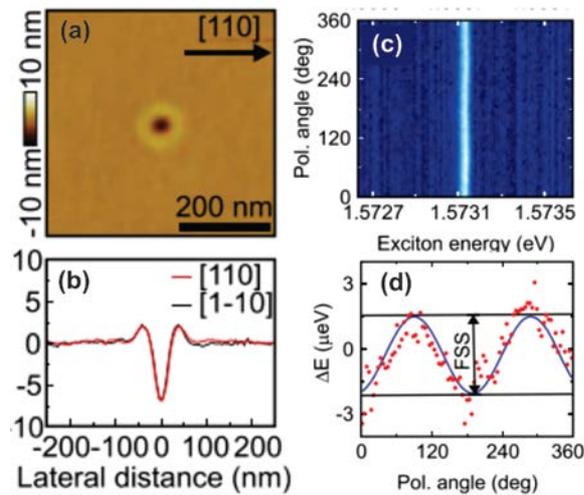


Abbildung 3 (a) AFM Bild eines einzelnen, durch Tröpfchenätzverfahren gewonnenen Nanolochs. (b) Liniennprofil des Nanolochs. (c) Polarisationsabhängiges PL Spektrum eines QPs. (d) FSS eines QPs (aus Ref.[15]).

Weiterhin konnten hochwertige, in den Wachstumseigenschaften gut kontrollierbare, InAs/GaAs QPs hergestellt werden. In Zusammenarbeit mit der Universität Stuttgart konnten sehr schmale Linienbreiten einzelner QPs (um  $7\mu\text{eV}$ ) nachgewiesen werden. Anhand von Hong-Ou-Mandel (HOM) Experimenten konnte nachgewiesen werden, dass diese QPs ununterscheidbare Photonen emittieren. In Abbildung 4 sind diese, in den Wachstumseigenschaften gut zu kontrollierenden QPs, die auf einem vorstrukturierten GaAs Substrat gewachsen wurden, dargestellt. Um verbleibende Verunreinigungen zu beseitigen, wurde ein in-situ Wasserstoffreinigungsverfahren angewendet. Mit Hilfe der Mikro-PL wurde in Abbildung 4(b) die kontrollierte Verteilung der QPs mit einer Effektivität von 40% gemessen. Die statistische Verteilung der Linienbreite der QPs ist in Abbildung 4(c) dargestellt. Der Einschub rechts oben zeigt ein hochauflösendes Spektrum, gemessen mit einem Fabry-Perot-Interferometer. Die beobachtete Linienbreite von weniger als  $7\mu\text{eV}$  zeigt die hervorragende optische Qualität dieser QPs. Die Universität Stuttgart konnte nachweisen, dass diese QPs einzelne, ununterscheidbare Photonen emittieren (Gütwert aus dem HOM-Experiment: 0.73). [10]

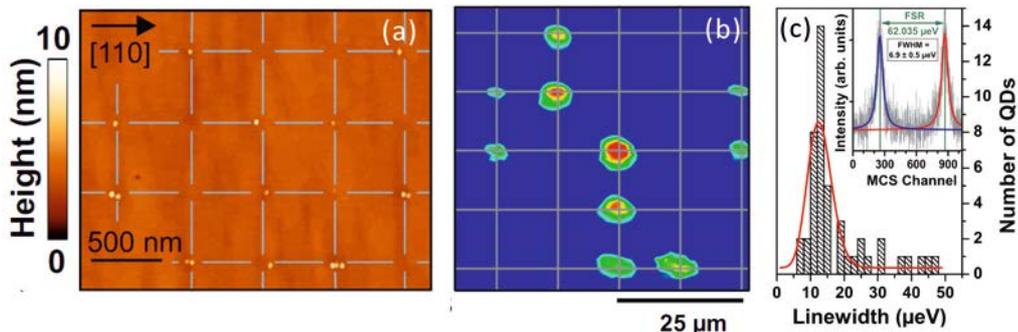


Abbildung 4 (a) AFM Bild zeigt die QP-Verteilung über ein 500 nm Raster. (b) Räumlich dargestellte PL Spektren der QPs. (c) Statistik der PL Linienbreite der QPs. Der Einschub rechts oben zeigt ein hochauflösendes PL Spektrum eines einzelnen QPs mit einer Linienbreite von  $7\mu\text{eV}$  (aus Ref. [10]).

- **IFW\_AP2: Entwicklung einer Technologie zur Kontrolle der QP Emission mittels Kombination von Verspannung und elektrischen Feldern**

In den vergangenen zwei Jahren hat unsere Arbeitsgruppe an der kontrolliert dynamischen Beeinflussung der optischen Eigenschaften einzelner QPs durch mechanische Verformungsverfahren gearbeitet. Kürzlich konnten wir eine auf Nanomembranen basierende Leuchtdiode (LED) erfolgreich auf ein piezoelektrisches Substrat transferieren.[5,8] Mit dieser Anordnung (siehe Abbildung 5) können wir die Emissionseigenschaften einzelner QPs durch eine Kombination von äußeren elektrischen Feldern (Stark Effekt) und elastischer Verspannung deterministisch kontrollieren.

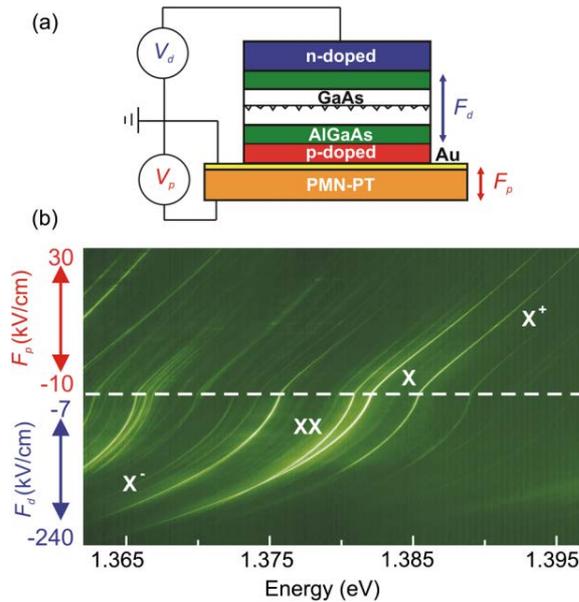


Abbildung 5 (a) Skizze des von uns entwickelten Diodendesigns. Die Emission der QPs kann durch Anlegen eines elektrischen Feldes an die Diode ( $V_d$ ) und an das piezoelektrische Substrat ( $V_p$ ) durchgestimmt werden. (b) Verschiebung der Emissionsenergie durch elektrische Felder an der Diode ( $F_d$ ) und Verspannungsfelder ( $F_p$ ) (aus Ref. [5]).

Die in Abbildung 5(a) gezeigte Struktur zeigt die Kombination dieser zwei leistungsstarken Durchstimmtechniken, die bis heute bekannt sind (äußere elektrische Felder und Verspannungsfelder). Die QPs befinden sich in einer dünnen n-i-p Nanomembran, die auf ein PMN-PT Substrat durch Thermokompressionsverfahren von Goldoberflächen, integriert wurde. Die emittierenden InGaAs QPs, eingebettet in der Mitte eines 10 nm dicken GaAs/AlGaAs Quantentopfes, wurden auf einem GaAs Substrat gewachsen. Diese Art der Struktur, verglichen mit anderen Strukturen ohne diesen Quantentopf, reduziert die Ladungsionisation bei hohen elektrischen Feldern an der Diode ( $F_d$ ) und erlaubt damit einen großen Verschiebungsbereich der Emissionsenergie durch das Anlegen einer entgegen gerichteten Spannung ( $V_d$ ) an der Nanomembran. Gleichzeitig ist es möglich, durch das Anlegen einer weiteren Spannung  $V_p$  (resultierendes elektrisches Feld:  $F_p$ ) an das PMN-PT eine im Piezo liegende biaxiale Verspannung (Druck- oder Zugbelastung) in der QP-Schicht zu erzeugen und damit die Emissionsenergie der QPs zu beeinflussen. Damit ist eine außergewöhnlich große Energieverschiebung von bis zu 30meV (siehe Abbildung 5(b)) möglich.

Weiterhin haben wir mit ähnlichen Techniken elektrisch anregbare und durchstimbare Quantenleuchtdioden (Q-LED), die mit sehr hoher Taktung (bis zu 0.8GHz) einzelne Photonen erzeugen können, hergestellt.[12] Diese ausschließlich elektrisch betriebenen und durchstimbaren Q-LEDs sind der erste bedeutende Schritt zur Erzeugung ununterscheidbarer Photonen aus separaten elektrisch angeregten QPs.

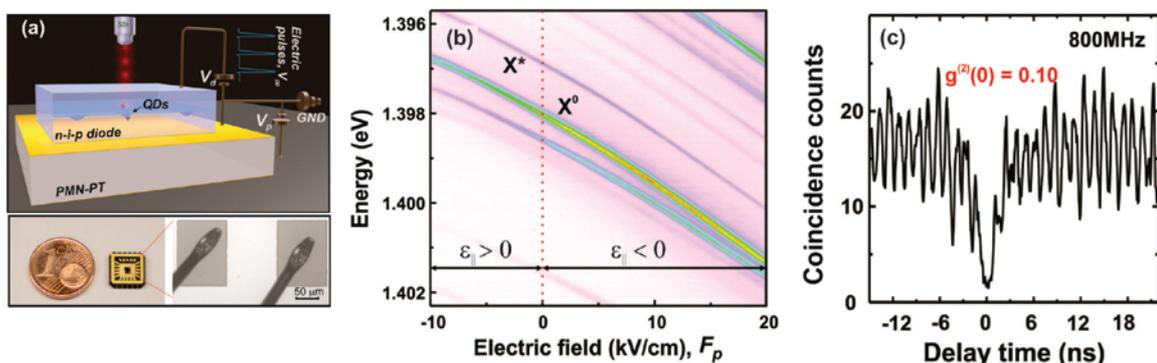


Abbildung 6 (a) Darstellung der durchstimbaren, auf Nanomembranen basierenden, Q-LED. Die n-i-p GaAs Diode enthält selbst organisierte QPs und ist auf einen piezoelektrischen Kristall, der durch Verspannungsfelder die Emissionsenergie der QPs durchstimmen kann, aufgebracht. Außerdem ist eine Mikroskopaufnahme des Bauteils gezeigt. Auf der rechten Seite sind die kontaktierten Nanomembranen auf dem piezoelektrischen Kristall und die n-GaAs Kontakte gezeigt. (b) Durch biaxiale Verspannung

durchgestimmte Emissionsenergie eines einzelnen QPs. (c) Autokorrelationsmessung der Emissionsenergie eines einzelnen QPs bei einer Anregungsfrequenz von 800 MHz (aus Ref.[12]).

- **IFW\_AP3: Optische Untersuchung und Verständnis der verspannungsinduzierten Effekte**

Mit Hilfe der neuentwickelten Durchstimmetechnologie sind wir in der Lage den Einfluss von mechanischen Verspannungen auf die QPs mit bisher unerreichter Präzision zu studieren. Die bedeutendste Erkenntnis dabei ist, dass es, mit einer Kombination aus biaxialen mechanischen sowie simultan angelegten elektrischen Feldern, möglich ist, die Feinstrukturaufspaltung (FSS) der strahlenden Anregungszustände vollständig ausgelöscht werden kann. Diese Technik, die auf fast alle QP-Strukturen anwendbar ist, beruht auf dem Einbringen einer externen Störung, um die Polarisierung der Emission entlang der Wirkungsachse einer zweiten Störung auszurichten[5]. Diese Erkenntnis betont die Möglichkeiten der Kombination sich ergänzender externer Felder, um den strengen Anforderungen der skalierbaren halbleiterbasierten Quantentechnologie gerecht zu werden.

Ein weiterer grundlegender physikalischer Zusammenhang konnte nachgewiesen werden, indem der Grundzustand des Loches mit hoher effektiver Masse (HH) in einen Zustand mit geringer effektiver Masse (LH) überführt wurde. Den Lochspins in QPs kommt eine immer höhere Aufmerksamkeit zu, da Dekohärenz aufgrund von Hyperfein-Wechselwirkungen mit der nuklearen Spinumgebung, im Vergleich zum Elektronenspin reduziert werden sollte. Alle bisherigen experimentellen Untersuchungen wurden an HH-Zuständen durchgeführt. Der Grund ist, dass Quanten-Confinement und mechanische Kompression in selbstorganisierten QPs die Valenzbandentartung aufheben und die HH-Zustände energetisch deutlich über den LH-Zuständen liegen. Dennoch wäre die Nutzung von LHs an Stelle von HHs vorteilhaft für Quanteninformationstechnologien, zum Beispiel bei der kohärenten Umwandlung von Photonen in Elektronenspins und der Möglichkeit die LH-Spins direkt mit Hilfe von Mikrowellen zu kontrollieren. Wir nutzen die gezielte Verspannungsregelung, um die Loch-Grundzustände zu beeinflussen: Ausgehend von nahezu unverspannten GaAs QPs in einer AlGaAs Matrix mit herkömmlichen HH-Grundzustand,[17] kehren wir die energetische Reihenfolge der HH- und LH-Bänder durch Anlegen einer biaxialen Zugspannung um, wie in Abbildung 8 dargestellt.

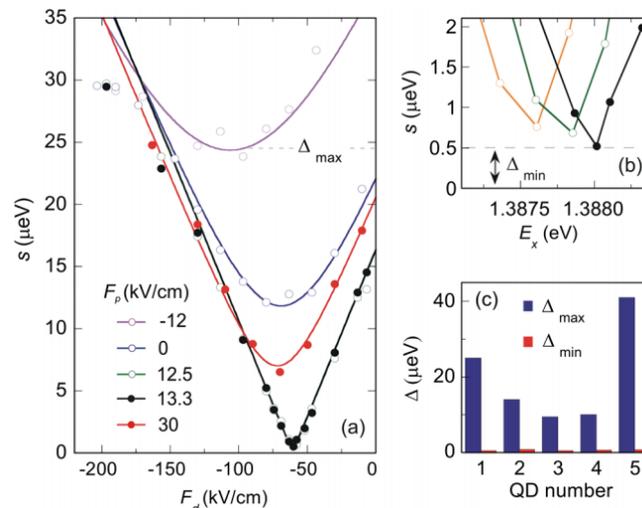


Abbildung 7 (a) FSS aufgetragen über  $F_p$  und  $F_d$  (siehe auch Abbildung 4). An jedem Spannungsfeldpunkt ( $F_p$ ) haben wir das elektrische Feld ( $F_d$ ) durchlaufen lassen und somit die einzelnen FSS an jedem FP als  $\Delta$  beobachtet. (b) Durch die Kombination beider Durchstimmetechniken können wir die FSS bis auf sehr kleine  $\Delta$ -Werte minimieren (c) Für alle untersuchten QPs war es möglich, die FSS auszulöschen (aus Ref. [5]).

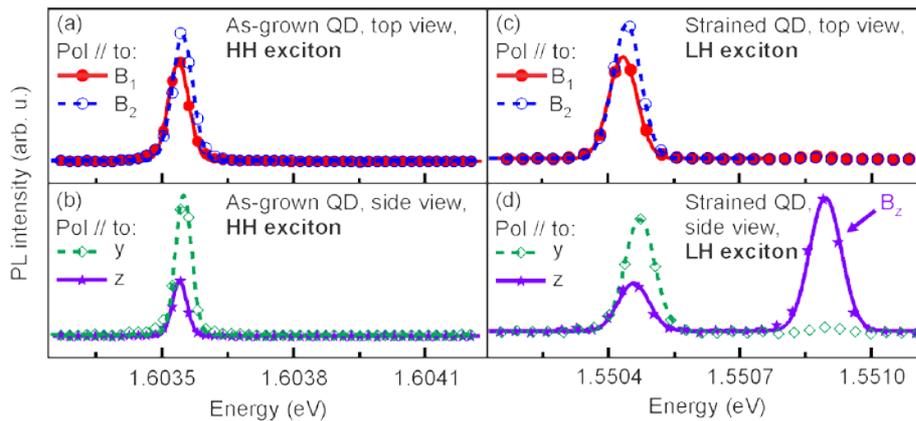


Abbildung 8 Mikro-PL Spektren von Excitonen der leichten und schweren Löcher eines einzelnen GaAs/AlGaAs QPs. (a) bis (d): Spektren der neutralen Excitonen eines repräsentativen unbelasteten (a,b) sowie eines zugverspannten (c,d) QPs entlang zweier orthogonaler Polarisierungsrichtungen. Die Spektren wurden sowohl entlang der konventionellen z- [001] (a,c) als auch der x- [110] Richtung einer Bruchkante (b,d) aufgenommen. Die ausgefüllten (offenen) Kreise (B1 und B2) stellen laterale Polarisierungen dar (x und y), ausgefüllte Sterne kennzeichnen normale Polarisierung (z). Die durchgezogenen Linien zeigen angepasste Lorentzkurven (aus Ref. [17]).

- **IFW\_AP4: Zwei-Photonen Interferenz zwischen Trionenemission von unabhängigen QP**

Das Arbeitspaket 4 beinhaltet die Realisierung der Zwei-Photonen-Interferenz, wobei die dafür benötigten Photonen aus der Trionenemission zweier separater QPs stammen. Dafür muss die Kontrolle der geladenen Zustände in den QPs gewährleistet werden. Eine weitere Herausforderung ist die aktive Stabilisierung der QP-Emission mit Hilfe von externen Verspannungen. Es ist bekannt, dass die piezoelektrischen Substrate (PMN-PT) einen langsamen Driftprozess aufweisen. Dieser wird durch das in Abbildung 8 gezeigte Feedbacksystem behoben. Damit konnte die erfolgreiche Stabilisierung der Emission einzelner GaAs QPs (bei 780.2 nm) gezeigt werden, was die Kopplung dieser QPs an die Hyperfeinstruktur der <sup>87</sup>Rb D2 Linie ermöglichen kann [1,6]. Diese Eigenschaft zusammen mit der Durchstimm-Möglichkeit der Emissionswellenlänge stellt einen großen Schritt in Richtung Zwei-Photonen-Interferenz von zwei verschiedenen Einzelphotonenquellen (QLEDs) dar [12].

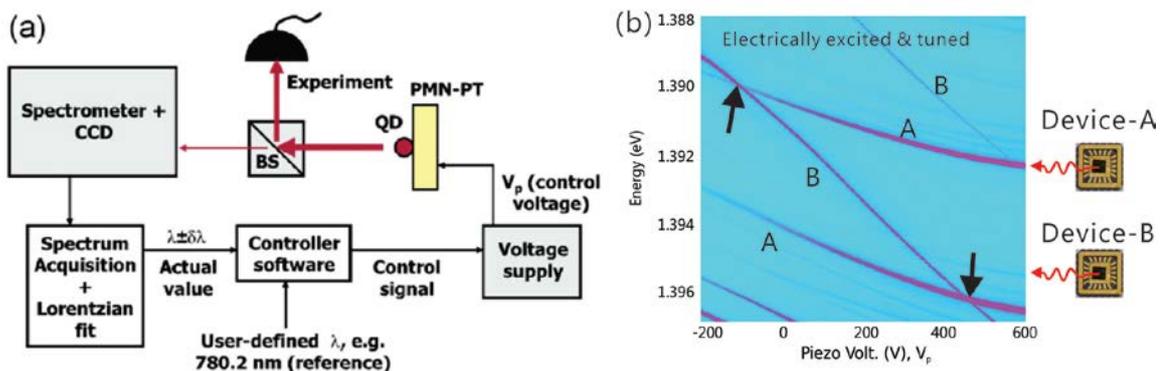


Abbildung 9 (a) Skizze des für die Stabilisierung der QP-Emission notwendigen Feedbacksystems (aus Ref. [6]). (b) In Übereinstimmung gebrachte Einzelphotonenemission von zwei verschiedenen Q-LEDs.

## 2. des voraussichtlichen Nutzens, insbesondere der Verwertbarkeit des Ergebnisses und der Erfahrungen

Die wichtigste technologische Errungenschaft unserer Forschungen ist die Herstellung von elektro-elastischen nicht-klassischen Quantenlichtquellen, die ein zentrales Element in Festkörper-Quantenrepeatern darstellen können. Es ist nicht unwahrscheinlich, dass ein solches Bauelement eine wichtige Rolle in zukünftigen optischen Quantennetzwerken spielen wird. In anbetracht der kürzlich realisierten Quantenteleportation über eine Entfernung von 143 km (Ma *et al.*, Nature **489** 269, 2012), glauben wir, dass es nicht mehr lange dauern wird, bis das technologische know-how der Quantenrepeater in kommerzielle Produkte überführt werden kann.



Deutschland spielt eine weltweit führende Rolle bei der Erforschung und Entwicklung von halbleiterbasierten optoelektronischen Bauelementen. Es gibt viele Vorteile der hier zu entwickelnden elektromechanisch manipulierbaren Quantenlichtquellen, z. B. eine hohe Wiederholrate (möglich bis in den GHz Bereich), Einzelphotonenerzeugung auf Festkörperbasis, hohe Stabilität, Elektrolumineszenz und, am wichtigsten, die Kompatibilität mit industriellen Halbleiterverfahrenstechniken. Daher sehen wir großes Potenzial für einen wirtschaftlichen Erfolg unserer Prototypen. Kurzfristig würden vor Allem andere Forschergruppen unmittelbar von unseren Erkenntnissen profitieren. Längerfristig wird sich jedoch aus der Zusammenarbeit mit Unternehmen aus dem Bereich der Optoelektronik eine Entwicklung von kommerziellen Produkten für Quantennetzwerke und Quantenfernkommunikation ergeben.

### 3. des während der Durchführung des Vorhabens dem Zuwendungsempfänger bekannt gewordenen Fortschritts auf diesem Gebiet bei anderen Stellen

Seit der ersten Veröffentlichung eines Nanomembranbasierten QP-Verspannungsexperiments [T. Zander et al., Opt. Exp. 17, 22452 (2009) und F. Ding et al., Phys. Rev. Lett. 104, 067405 (2010)] sind verschiedene andere Forschungsgruppen eingebunden, um die Verspannungstechniken von QPs mit den verschiedensten Techniken zu erforschen. Zum Beispiel hat die Arbeitsgruppe von Brian Gerardot der Heriot Watt Universität die Feinstrukturaufspaltung von QPs im Telekommunikationsbereich [Sapienza et al., Physical Review B **88**, 155330 (2013)] sowie Verspannungstechniken an Einzelpartikelzuständen [Kuklewicz et al., Nano Letters, **12**, 3761 (2012)] untersucht. Die Arbeitsgruppe von Edo Waks der Universität von Maryland und die Arbeitsgruppe von W. Chang der Nationalen Chiao Tung Universität arbeiten an Verspannungstechniken von QPs, die durch starke Kopplung an Mikroresonatoren gebunden sind [Sun et al., Appl. Phys. Lett. **103**, 151102 (2013) und Lin et al., Phys. Rev. B **84**, 201301(R) (2011)].

### 4. der erfolgten oder geplanten Veröffentlichung des Ergebnisses (the succeeded or envisaged publication of the results)

- [1]. "Strain-induced tuning of the emission wavelength of high quality GaAs/AlGaAs quantum dots in the spectral range of the 87Rb D2 lines"  
S. Kumar, R. Trotta, E. Zallo, J. D. Plumhof, P. Atkinson, A. Rastelli, O. G. Schmidt,  
Appl. Phys. Lett. 99, 161118 (2011)
- [2]. "Hybrid semiconductor-atomic interface: slowing down single photons from a quantum dot"  
N. Akopian, L. Wang, A. Rastelli, O. G. Schmidt, V. Zwiller,  
Nature Photon. 5, 230 (2011)
- [3]. "Strain-induced anticrossing of bright exciton levels in single self-assembled GaAs/Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As and In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As/GaAs quantum dots"  
J. D. Plumhof, V. Křápek, F. Ding, K. D. Jöns, R. Hafenbrak, P. Klenovský, A. Herklotz, K. Dörr, P. Michler, A. Rastelli, O. G. Schmidt,  
Phys. Rev. B 83, 121302 (2011)
- [4]. "Independent wavelength and density control of uniform GaAs/AlGaAs quantum dots grown by infilling self-assembled nanoholes"  
P. Atkinson, E. Zallo, O. G. Schmidt,  
J. Appl. Phys. 112, 054303 (2012)
- [5]. "Universal Recovery of the Energy-Level Degeneracy of Bright Excitons in InGaAs Quantum Dots without a Structure Symmetry"  
R. Trotta, E. Zallo, C. Ortix, P. Atkinson, J. D. Plumhof, J. van den Brink, A. Rastelli, and O. G. Schmidt,  
Phys. Rev. Lett. 109, 147401 (2012)
- [6]. "Controlling quantum dot emission by integration of semiconductor nanomembranes onto piezoelectric actuators"  
Rastelli et al.,  
Phys. Status Solidi B, 249, 687 (2012)
- [7]. "Nanoengineering the built-in electric field of a photonic device by interstitial-ion diffusion"  
Nasir, O. Makarovsky, S. Kumar, M. W. Fay, R. Champion, A. Rastelli, O. G. Schmidt, L. Eaves, and A. Patane,  
Phys. Rev. B 85, 195317 (2012)

- [8]. "Nanomembrane quantum-light-emitting diodes integrated onto piezoelectric actuators"  
R. Trotta et al.,  
Adv. Mater. 24, 2668 (2012)
- [9]. "Experimental methods of post-growth tuning of the excitonic fine structure splitting in semiconductor quantum dots"  
J. D. Plumhof, R. Trotta, A. Rastelli, O. G. Schmidt  
Nanoscale Research Letters 7, 336 (2012)
- [10]. "Triggered Indistinguishable Single Photons with Narrow Line Widths from Site-Controlled Quantum Dots"  
K. D. Jöns, P. Atkinson, M. Müller, M. Heldmaier, S. M. Ulrich, O. G. Schmidt, and P. Michler,  
Nano Letters 13, 126 (2013)
- [11]. "Tuning of the valence band mixing of excitons confined in GaAs/AlGaAs quantum dots via piezoelectric-induced anisotropic strain"  
J. D. Plumhof, R. Trotta, V. Křápek, E. Zallo, P. Atkinson, S. Kumar, A. Rastelli, O. G. Schmidt  
Phys. Rev. B 87, 075311 (2013)
- [12]. "A Nanomembrane-based wavelength-tunable high-speed single-photon-emitting diode"  
J. Zhang, F. Ding, E. Zallo, R. Trotta, B. Höfer, L. Han, S. Kumar, Y. Huo, A. Rastelli, O. G. Schmidt  
Nano Lett. 13 (12), 5808 (2013)
- [13]. "Independent control of exciton and biexciton energies in single quantum dots via electroelastic fields"  
R. Trotta, E. Zallo, E. Magerl, O. G. Schmidt, A. Rastelli  
Phys. Rev. B 88, 155312 (2013)
- [14]. "Vectorial nonlinear coherent response of a strongly confined exciton–biexciton system"  
J. Kasprzak, S. Portolan, A. Rastelli, L. Wang, J. D. Plumhof, O. G. Schmidt, W. Langbein  
New J. Phys. 15, 055006 (2013)
- [15]. "Ultra-small excitonic fine structure splitting in highly symmetric quantum dots on GaAs (001) substrate"  
Y. H. Huo, A. Rastelli, and O. G. Schmidt  
Appl. Phys. Lett. 102, 152105 (2013)
- [16]. "Anomalous anticrossing of neutral exciton states in GaAs/AlGaAs quantum dots"  
S. Kumar, E. Zallo, Y. H. Liao, P. Y. Lin, R. Trotta, P. Atkinson, J. D. Plumhof, F. Ding, B. D. Gerardot, S. J. Cheng, A. Rastelli, O. G. Schmidt  
Phys. Rev. B 89, 115309 (2014)
- [17]. "A light-hole exciton in a quantum dot"  
Y. H. Huo, B. J. Witek, S. Kumar, J. R. Cardenas, J. X. Zhang, N. Akopian, R. Singh, E. Zallo, R. Grifone, D. Kriegner, R. Trotta, F. Ding, J. Stangl, V. Zwiller, G. Bester, A. Rastelli, O. G. Schmidt  
Nature Phys. 10, 46 (2014)

**Datum: 03.04.2014**

**TP-Leiter: Oliver G. Schmidt**

## Document Control Sheet

1. ISBN or ISSN	2. type of document (e.g. report, publication) Publications
3. title	
<ol style="list-style-type: none"> <li>1. <i>"Strain-induced tuning of the emission wavelength of high quality GaAs/AlGaAs quantum dots in the spectral range of the 87Rb D2 lines"</i></li> <li>2. <i>"Hybrid semiconductor-atomic interface: slowing down single photons from a quantum dot"</i></li> <li>3. <i>"Strain-induced anticrossing of bright exciton levels in single self-assembled GaAs/AlxGa1-xAs and InxGa1-xAs/GaAs quantum dots"</i></li> <li>4. <i>"Independent wavelength and density control of uniform GaAs/AlGaAs quantum dots grown by infilling self-assembled nanostructures"</i></li> <li>5. <i>"Universal Recovery of the Energy-Level Degeneracy of Bright Excitons in InGaAs Quantum Dots without a Structure Symmetry"</i></li> <li>6. <i>"Controlling quantum dot emission by integration of semiconductor nanomembranes onto piezoelectric actuators"</i></li> <li>7. <i>"Nanoengineering the built-in electric field of a photonic device by interstitial-ion diffusion"</i></li> <li>8. <i>"Nanomembrane quantum-light-emitting diodes integrated onto piezoelectric actuators"</i></li> <li>9. <i>"Experimental methods of post-growth tuning of the excitonic fine structure splitting in semiconductor quantum dots"</i></li> <li>10. <i>"Triggered Indistinguishable Single Photons with Narrow Line Widths from Site-Controlled Quantum Dots"</i></li> <li>11. <i>"Tuning of the valence band mixing of excitons confined in GaAs/AlGaAs quantum dots via piezoelectric-induced anisotropic strain"</i></li> <li>12. <i>"A Nanomembrane-based wavelength-tunable high-speed single-photon-emitting diode"</i></li> <li>13. <i>"Independent control of exciton and biexciton energies in single quantum dots via electroelastic fields"</i></li> <li>14. <i>"Vectorial nonlinear coherent response of a strongly confined exciton–biexciton system"</i></li> <li>15. <i>"Ultra-small excitonic fine structure splitting in highly symmetric quantum dots on GaAs (001) substrate"</i></li> </ol>	
4. author(s) (family name, first name(s)) Schmidt, Oliver G.; Rastelli, Armando; Ding, Fei; Trotta, Rinaldo; Plumhof, Johannes D.; Kumar, Santosh; Atkinson, Paula; Huo, Yongheng; Zallo, Eugenio; Krapek, Vlastimil; Zhang, Jiayang; Höfer Bianca; Zwiller, Valery; Akopian, Nika; Bester, Gabriel; Singh, Ranber; Witek, Babara; etc.	5. end of project 31.10.2013
	6. publication date Various dates
	7. form of publication Journal publication
8. performing organization(s) (name, address)	9. originator's report no.
<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Institute for Integrative Nanosciences, IFW Dresden, Helmholtzstraße 20, 01069 Dresden, Germany</li> <li>2. Institute of Semiconductor and Solid State Physics, Johannes Kepler University Linz, Altenbergerstraße 69, 4040 Linz, Austria</li> <li>3. Center for Advancing Electronics Dresden (CfAED), Dresden University of Technology, 01067 Dresden, Germany</li> <li>4. Kavli Institute of Nanoscience, Delft University of Technology, Lorentzweg 1, 2628CJ Delft, The Netherlands</li> <li>5. Max-Planck-Institute for Solid State Research, Heisenbergstraße 1, 70569 Stuttgart, Germany</li> </ol>	10. reference no.
	11. no. of pages
12. sponsoring agency (name, address)  Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) 53170 Bonn	13. no. of references
	14. no. of tables
	15. no. of figures
16. supplementary notes	
17. presented at (title, place, date)	

18. abstract

A quantum repeater for optical quantum communication applications can be fabricated based on single self-assembled semiconductor quantum dots (QDs). This relies on the fact that semiconductor QDs are among the most promising candidates for the generation of non-classical quantum light sources, such as single photons and entangled photon pairs. However, an inhomogeneous spectral broadening of about 10 meV and a non-degenerated bright excitonic state are unavoidable during the QD growth, which present enormous obstacles towards the exploitation of QDs in quantum technologies. Thus the precise control over the QD emission properties is essential. During the funding period we have developed a nano-hole infilling technique to fabricate high optical quality site-controlled QDs, and indistinguishable single photon emissions have been realized with these QDs. Beyond the growth *in-situ* control we have also developed a novel nanomembrane-based *ex-situ* strain tuning technique, which can shift the single QD emission lines by more than 20 meV and can eliminate the fine structure splitting in the neutral excitonic states. Therefore, wavelength-tunable single photons and entangled photon pair emissions can be realized. With this technique we have demonstrated the coupling between Rubidium atom vapors and the single photons emitted by single QDs, paving the way towards a hybrid quantum memory. Most remarkably, due to the fact that semiconductor QDs allow monolithic integration with electronic and photonic elements with mature semiconductor technologies, the first all-electrically operated wavelength-tunable single-photon source is demonstrated. In this device triggered single photons are generated via injection of short electrical pulses at operation speeds up to 0.8 GHz. When combined together, these works provide exciting perspectives towards the realization of a solid state quantum repeater relying on high quality single photon and entangled photon pair sources.

19. keywords

20. publisher

21. price