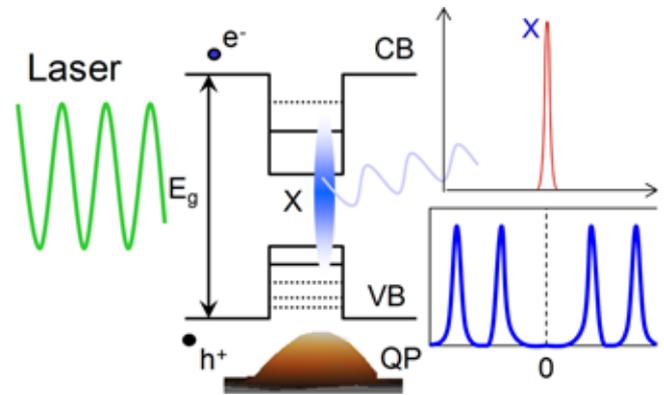


Die fortschreitende Miniaturisierung von Halbleiter-Bauelementen führt oft zu der Frage: „Wie klein müssen wir Bauelemente machen, um grundlegend neue Eigenschaften bekommen haben?“ Quantenpunkte haben enorme Chancen für die physikalische Forschung und technologische Anwendungen zur Verfügung gestellt, einschließlich der Quanten-Informationsverarbeitung und Optoelektronik. Quantenpunkte sind kleine Objekte mit einer Größe von wenigen zehn Nanometern (10 hoch minus 9 Metern), die aus Tausenden von Atomen aufgebaut sind und werden oft als „künstliche Atome“ bezeichnet, weil sie lokal einzelne Ladungen in diskreten Energiezuständen aufweisen, analog zu den Energieniveaus der Orbitale von natürlichen Atomen. Allerdings können Quantenpunkte während der Produktion durch die Kontrolle ihrer Eigenschaften „getunt“ werden, sodass jede gewollte Farbe des Lichts emittiert werden kann., wodurch sie ideal in ein Bauelement integriert werden können.

Die Forschungsarbeit von Benyoucef und Kollegen konzentriert sich auf die Entwicklung von neuartigen Quantenpunkten, die auf verschiedenen Materialien, wie Gallium-Arsenid (GaAs), Silizium (Si) und Indium-Phosphid (InP) aufgewachsen werden. Die Quantenpunkte emittieren im sichtbaren und nahen Infrarot-Bereich und es finden Untersuchung ihrer optischen und elektronischen Eigenschaften und deren mögliche Anwendung in Quanten-Informationsverarbeitung statt. Im Zuge der Laserbestrahlung eines einzigen Quantenpunktes, kommt es zu einer Rekombination von Loch und Elektron und ein Photon mit bestimmter Farbe wird emittiert, welches als Exziton bezeichnet wird. Ein einzelner Quantenpunkt mit einem einzelnen Exziton sollte ein einzelnes Photon emittieren. Um das zu prüfen, führt Benyoucef



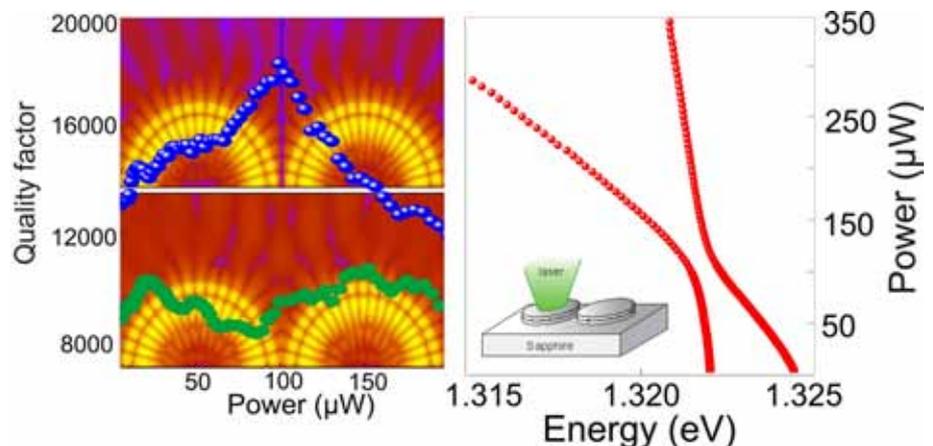
Künstliche Atome: Einzelphotonenquelle

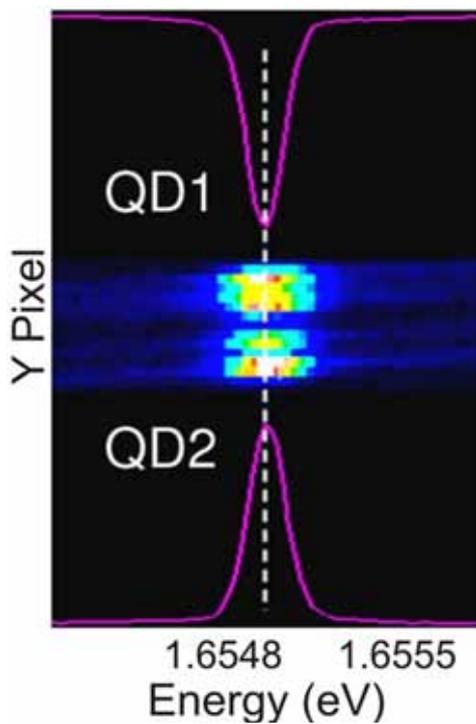
Photonen-Korrelations-Messungen unter Impuls- oder Dauerstrich-Laseranregung durch.

### Benyoucef und Kollegen können Licht-Emission manipulieren

Die Manipulation von Licht-Emission im Mikrometerbereich kann durch photonischen Moleküle hergestellt werden. Diese bestehen aus gekoppelten Mikroresonatoren mit jeweils hoher Quantenpunktdichte erlauben es, die Wechselwirkung zwischen Quantenpunkten in separaten Resonatoren zu vermitteln und bieten dadurch neue Funktionalitäten für Bauelemente. Benyoucef und Kollegen haben eine

Starke Kopplung in photonischen Molekülen





Identische Einzelphotonenquellen von unabhängigen Quantenpunkten

starke Kopplung in photonischen Molekülen durch ein geeignetes Einstellen des Brechungsindexes der Resonatoren erreicht. Zum ersten Mal konnte experimentell die Erhöhung der Resonanzschärfe (Q-Faktor) in stark gekoppelten photonischen Molekülen demonstriert werden. Ein großer Q-Faktor ist essentiell für niedrigschwellige Laser, hohe

Sensorempfindlichkeit und selektive Filterung von Wellenlängen in einem schmalen optischen Bereich.

### Erste Einzelphotonquelle auf Silizium-Substrat

Silizium ist das wichtigste Material für die Mikro- und Nano-Elektronik. Aufgrund der niedrigen Kosten besitzt es einen Marktanteil von ca. 90% bei den Halbleiterbauelementen. Quantenpunkte sind oft ideale Systeme für Anwendungen der Quanten-Informationsverarbeitung. Im Prinzip können die Quantenpunkte als effiziente Einzelphotonquelle genutzt werden. Zum ersten Mal konnten Benyoucef und Kollegen durchstimmbare Einzelphotonemission (jeder Impuls enthält nur ein Photon) zeigen. Die Emission von einzelnen, auf Silizium-Substrat gewachsenen, II-VI Quantenpunkten findet im sichtbarem Licht statt. Die Ergebnisse zeigen, dass es machbar ist, qualitativ hochwertige identische Einzelphotonenquellen großtechnisch in die Silizium-Technologie zu integrieren. Benyoucefs aktuelles Ziel ist die Integration von Silizium III-V Halbleiter, um die Lichtemission in den nahen Infrarotbereich zu verlagern, um eine Hochgeschwindigkeits-

Kommunikation und photonisch integrierte Schaltung in der CMOS Fertigungstechnologien zu realisieren.

### Identische Photonen

Es wäre wünschenswert, identische Photonen aus verschiedenen Quantenpunkten zu erhalten, da dies für verschiedene Arten von Quantenalgorithmen wichtig ist. Aufgrund von Größenschwankungen emittieren in der Regel alle Quantenpunkten bei unterschiedlichen Wellenlängen, somit sind identische Photonen ziemlich schwierig zu realisieren. Benyoucef und Kollegen haben eine geeignete Strategie zur Verbesserung der Situation entwickelt. Erste Schritte zur Realisierung identische Einzelphotonenquellen von unabhängigen Quantenpunkten wurden demonstriert. Die Emissionslinien von zwei oder mehreren Quantenpunkten wurden in Resonanz gebracht. Als ein Ergebnis emittierten QPs einzelnen Photonen der gleichen Farbe.

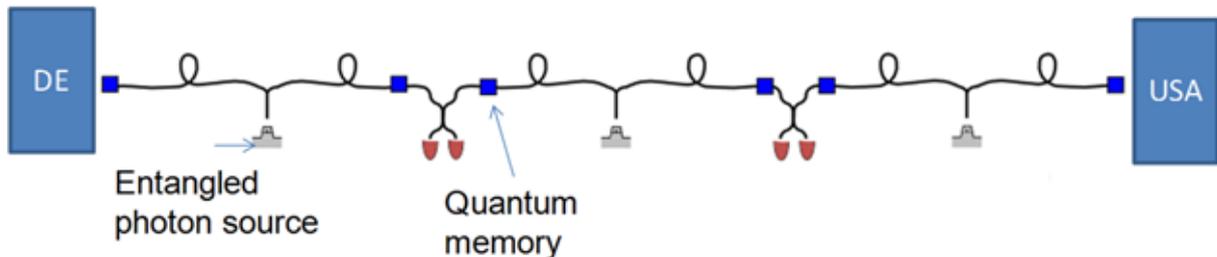
### Sichere Quanteninformationen

Heutzutage ist der Informationstechnologiesektor zu einem der führenden Wirtschaftszweige in modernen Industrieländern geworden. Daher wird die Sicherheit von Informationen immer bedeutender. Eine einfache nicht zu knackende Verschlüsselung liegt vor, wenn Sender und Empfänger den gleichen Schlüssel besitzen. Einzelne Photonen sind ideale Träger für sicheren Quanteninformation über lange Distanzen, da eine geringen Wechselwirkung mit der Umgebung erfolgt. Dennoch nimmt die Transmissionsrate, infolge von Verlusten, exponentiell mit dem Abstand ab. Direkte und sichere Quanten-Kommunikation im sichtbaren Bereich von einem Ort zum anderen ist durch Verluste in den Glasfasern auf ca. 200 km begrenzt.

Um größere Übertragungslängen zu erreichen sind Einzelphotonenquellen im Bereich der Telekommunikations-Wellenlängen, also für 1,31  $\mu\text{m}$  oder/und 1,55  $\mu\text{m}$ , erforderlich. In diesem Bereich sind die Verluste in den Glasfasern minimal. Benyoucef und Kollegen entwickeln einen neuen Typ von Quantenpunkten, welche bei 1,55 Mikrometer Einzel-Photonen emittieren. Das Ziel ist es, dadurch die Verluste stark zu reduzieren und eine sichere Datenübertragung von Daten über große Distanzen zu

erreichen. Um noch größere Übertragungreichweiten von 1000 km zu erreichen ist der Einsatz von so genannten Quanten-Repeatern notwendig. Quanten-Repeater sind die Analogons der klassischen optischen Verstärker, anstelle der Umwandlung von Elektrizität, verstärkt es ein Kommunikationssignal,

um die Degradation (Absorption in der Faser) über die Entfernung zu verhindern. Er enthält zwei Speicherblöcke zwischen den Standorten, eine um eine Nachricht aufzunehmen (speichern) und eine zweite um die Nachricht zu kopieren und anschließend weiterzusenden.



Quanten-Repeater: um eine sichere Übertragung von Daten über große Distanzen zu erreichen

## Dr. Mohamed Benyoucef

Mohamed Benyoucef erhielt seinen Dokortitel in Physik im Bereich der Halbleiter mit großer Bandlücke an der Universität Bristol (UK) im Jahre 2002. Nach der Promotion arbeitete er als Research Associate an Halbleiter Nanostrukturen an der Universität Bremen und Stuttgart. Daraufhin ist er der MBE-Arbeitsgruppe in der Abteilung des Nobelpreisträgers Prof. Klaus von Klitzing am Max-Planck-Institute für Festkörperforschung in Stuttgart beigetreten. Dort baute er ein optisches Spektroskopiesystem auf, um die optischen Eigenschaften von Nanostrukturen zu untersuchen. Von 2007 bis 2010, hat er als Leiter der optischen Spektroskopie-Labor am Institut für Integrative Nanowissenschaften am IFW Dresden gearbeitet. Seit 2010 ist er als Akademischer Rat an der Universität Kassel tätig und ist Leiter der Gruppe Angewandte Spektroskopie am Institut für Nanostrukturtechnologie und Analytik sowie Assoziiertes Mitglied im CINSaT. Die aktuellen Forschungsschwerpunkte von Herrn Benyoucef liegen im Bereich der fundamentalen elektronischen und optischen Eigenschaften von Halbleiter Nanostrukturen im Hinblick auf deren Anwendung in der Photonik und Quanten-Informationstechnologie sowie der Integration von III-V Halbleiter-Lichtquellen mit Silizium und dem Einsatz von nanostrukturierten Oberflächen für optische Bauelemente.

