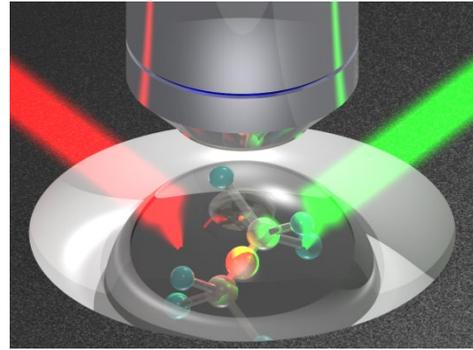


Bachelor Journal Club 2022

Forschungsthemen AG Quantenoptik

Prof. Dr. Christoph Becher

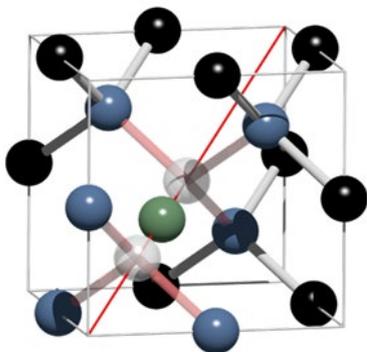


Unsere Forschungsschwerpunkte

Wir arbeiten auf den Gebieten der optischen Spektroskopie und Quantenoptik mit Farbzentren in Diamant, der Nanophotonik mit Mikroresonatoren in Diamant und der nichtlinearen Optik mit einzelnen Photonen. Unser Ziel ist es, Farbzentren in Diamant und einzelne Photonen für Anwendungen in den Quantentechnologien verfügbar zu machen, z.B. für den Aufbau von Quantennetzwerken oder für Anwendungen in der Quantenmesstechnik.

Spektroskopie und Quantenoptik mit Farbzentren in Diamant

Zum Aufbau eines Quantennetzwerkes benötigen wir Quantenspeicher (Netzwerkknoten) zwischen denen mittels Photonen Quanteninformationen ausgetauscht werden können. Die Anforderungen an solche Netzwerkknoten sind somit zum einen ihre Wechselwirkung mit Photonen und zum anderen lange Kohärenzzeiten, um die Quanteninformationen möglichst lange speichern zu können. In den letzten Jahrzehnten stellte sich heraus, dass sowohl gefangene Atome und Ionen, Quantenpunkte, supraleitende Quantenbits als auch Farbzentren in Diamant dafür in Frage kommen.



*Silizium-Fehlstellenzentrum im
Diamantgitter*

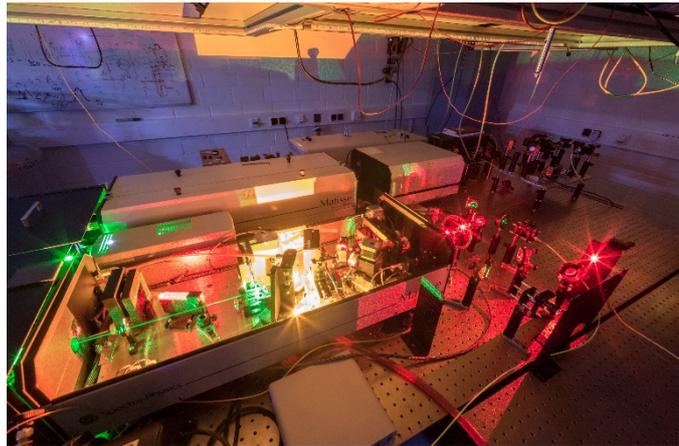
Farbzentren in einem Diamanten kann man sich wie “künstliche” Atome im Diamantgitter vorstellen. Sie besitzen eine diskrete Niveaustuktur und können ähnlich wie gefangene Atome/Ionen optisch adressiert werden. Der Unterschied zu Atomen/Ionen liegt darin, dass sie nicht technisch aufwendig gefangen werden müssen, sondern sie direkt im Festkörper integriert sind. Das hat jedoch den Nachteil, dass sie auch in Wechselwirkung mit den Gitterschwingungen des Wirtsmaterials, dem Diamanten, stehen. Um die Gitterschwingungen und damit auch die dazugehörige Wechselwirkung zu

minimieren, untersuchen wir die spektroskopischen Eigenschaften der Farbzentren bei ultrakalten Temperaturen bis zu 1,6 K. Dazu stehen uns mehrere Heliumkryostate mit integrierten konfokalen Mikroskopen zur Verfügung.

Wenn die spektroskopischen Eigenschaften eines Farbzenters ausreichend erforscht sind, können wir mit Experimenten zur Implementierung eines Quantenspeichers starten. Dazu werden die Farbzentren mit maßgeschneiderten Laserpulsen bestrahlt, was eine präzise Kontrolle der Zustände der Farbzentren ermöglicht.

Methoden

- Werkzeuge: Laser, selbstgebaute konfokale Mikroskope, Elektronik und Computersteuerung von Experimenten
- Mikroskopie und Spektroskopie bei tiefen Temperaturen (bis 1,6K)
- Messungen der Statistik von Einzelphotonen
- Theoretische Simulationen der Besetzungsdynamik unter Einwirkung von Lichtfeldern (Matlab)
- Experimente zur kohärenten Kontrolle (Modulation von Laserlicht, Automatisierung und Optimierung von Pulssequenzen)



Farbstoff - Laser bei 620 nm zur resonanten Anregung eines Zinn-Fehlstellenzentrums in Diamant

Abschlussarbeiten / Kürzliche Themen

- Bachelor: Aufbau eines konfokalen Mikroskops zur Spektroskopie an einzelnen Stickstoff-Fehlstellen Zentren in Diamant
- Bachelor: Spektroskopie an Silizium-Fehlstellen-Zentren in Diamant-Nanostrukturen
- Master: Spektroskopie an Zinn-Fehlstellenzentren Zentren in Diamant
- Master: Erzeugung ununterscheidbarer Einzelphotonen mit Zinn-Fehlstellenzentren in Diamant

Nanophotonik

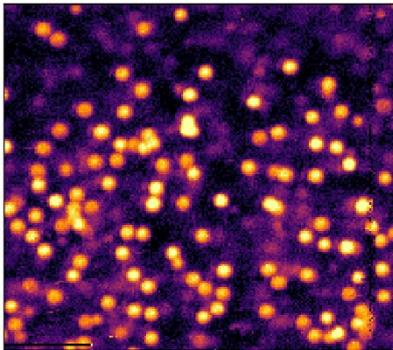
Die Wechselwirkung von Licht und Materie ist naturgemäß sehr schwach. Da Farbzentren als Quantenbits mit Lichtpulsen gesteuert werden, ist eine Erhöhung dieser Wechselwirkung für eine effiziente Kontrolle unabdingbar. Eine bekannte und gut erprobte Möglichkeit, um diese Wechselwirkung zu erhöhen sind optische Resonatoren. Indem sehr kleine Resonatoren (Mikroresonatoren) direkt um die Farbzentren herum gebaut werden, können sowohl Absorptions- als auch Emissionseigenschaften der Farbzentren positiv beeinflusst werden, was einer vollumfänglichen Verstärkung der Licht-Materie-Wechselwirkung entspricht. Das ideale Design für einen solchen Mikroresonator ermitteln wir durch detaillierte Simulationen und theoretische Modelle. Um ein theoretisches Design experimentell an einem Diamanten umzusetzen, werden *state-of-the-art* Technologien eingesetzt, die allesamt aus der etablierten Halbleitertechnik stammen: Mittels Ionenimplantation werden die Farbzentren an wohldefinierten Positionen im Diamanten erzeugt. Beim Ionenstrahlschreiben (Kooperation mit Materialwissenschaften) kann sodann ein erster Prototyp



Prototypen für plan-sphärische Mikroresonatoren

des gewünschten Resonators direkt im Diamanten strukturiert werden. Ist das Design ausgereift, verwenden wir reaktives Ionenätzen, um die Struktur in vielfacher Ausführung herzustellen. Die Charakterisierung der Funktionsfähigkeit des Mikroresonators erfolgt durch konfokale Rasterlasermikroskopie. Die Nanofabrikation umfasst damit nahezu alle in der Arbeitsgruppe abgedeckten Bereiche: Sowohl theoretische und experimentelle Quantenoptik und Nanophotonik als auch Materialwissenschaften werden benötigt, wodurch ein vollumfänglicher Einblick garantiert ist.

Methoden



Fluoreszenz einzelner Zinn-Fehlstellenzentren in einer 25 µm dicken Diamantmembran

- Dotierung von hochreinen Diamanten
- Erzeugung einzelner Farbzentren
- Behandlung der Diamantoberfläche (chemische und thermische Oxidation)
- Herstellung von Mikroresonatoren (reaktives Ionenätzen, fokussiertes Ionenstrahlschreiben)
- Untersuchung der Emission der Farbzentren (konfokale Rasterlasermikroskopie, Einzelphotonenemission etc)
- Modellierung und Simulation der

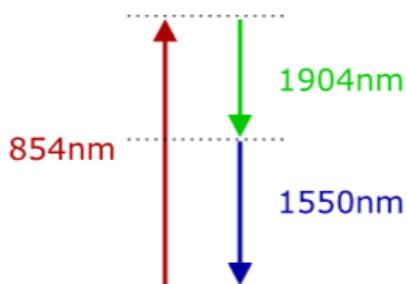
Photophysik, Nanophotonik, etc. (Comsol, Lumerical, Matlab, Python, u.v.m.)

Abschlussarbeiten / Kürzliche Themen

- Master: Design, Herstellung und Vermessung plan-sphärischer Mikroresonatoren in Diamant
- Master: Theoretische und praktische Implementierung nanophotonischer Strukturen in Diamant

Nichtlineare Optik

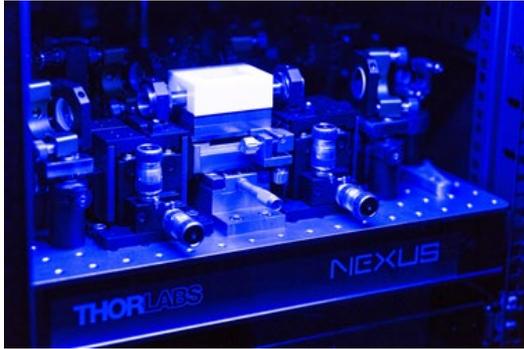
Hier liegt der Schwerpunkt unserer Arbeiten bei der Quantenfrequenzkonversion: Um die von den Farbzentren erzeugten Einzelphotonen für Quantenkommunikationsexperimente zu nutzen, werden diese in Glasfasern eingekoppelt. Da die Wellenlänge der Einzelphotonen allerdings im sichtbaren Bereich liegt, wo die Faserverluste besonders hoch sind, sind Experimente über lange Distanzen



Schema des Konversionsprozesses

zunächst nicht möglich. Koppelt man die Einzelphotonen zusammen mit einem starken Pumplaser in einen nichtlinearen Kristall ein, so zerfallen diese durch den Pumplaser stimuliert jeweils in zwei Photonen geringerer Frequenz. Diese lässt sich durch die Wahl der Pumpwellenlänge so einstellen, dass die Photonen in das Telekom-C-Band (1550nm) konvertiert werden, wo Faserverluste minimal sind. Dadurch werden anwendungsnahe Experimente in realen Quantennetzwerken ermöglicht. Die experimentelle Herausforderung besteht darin, einen möglichst effizienten und kompakten Aufbau zu

realisieren, der die von den Photonen getragene Quanteninformation nicht beeinflusst.



Realer Aufbau

Methoden

- Realisierung optischer Aufbauten
- Simulationen von optischen Wellenleitern, Optimierung von Kopplungseffizienzen
- Elektronik und Computersteuerung von Experimenten
- Automatisierte Polarisationskontrolle
- Laserstabilisierung
- Messung des Quantenzustands von Photonen (Quantenzustandstomographie)

Abschlussarbeiten / Kürzliche Themen

- Bachelor: Frequenzstabilisierung von Diodenlasern für Experimente zur Quantenfrequenzkonversion
- Bachelor: Quantentomographie von einzelnen Photonen
- Master: Polarisationserhaltende Quantenfrequenzkonversion einzelner $^{40}\text{Ca}^+$ -resonanter Photonen in das Telekom-C-Band
- Master: Zweistufige Quantenfrequenzkonversion von einzelnen Photonen aus Silizium-Fehlstellen Zentren in Diamant

Projekte

Unsere Arbeiten sind in eine große Zahl von Forschungsprojekten eingebunden, die uns interessante Arbeitsmöglichkeiten und hervorragende Ausstattung bieten, z.B.:

- Transregio-Sonderforschungsbereich „QuCoLiMa“: Erzeugung von verschränkten Zuständen (cluster states) mit vielen Photonen durch Anregung von Farbzentren in Diamant
- Forschungsnetzwerk „QR.X – Quantenrepeater.Link“: Demonstration von grundlegenden Konzepten eines „Quantenrepeaters“ für die Quantenkommunikation über eine Faserstrecke in Saarbrücken
- Forschungsnetzwerk „QPIC-1 – Photonisch-integrierter Quantencomputer“: Erzeugung von verschränkten Photonen-Zuständen für einen optischen Quantencomputer

Betreuung

- enge & persönliche Betreuung durch Doktoranden oder Postdocs
- wöchentliche Treffen der Arbeitsgruppe
- Möglichkeit der Teilnahme an wiss. Seminaren
- optional: HiWi Vertrag (Lehre)

Bei Interesse an unseren Forschungsthemen bieten wir gerne individuelle Laborführungen und Beratungen an. Dabei können wir auch konkrete Themen für Bachelor- und Masterarbeiten benennen.

Ansprechpartner

- Prof. Dr. Christoph Becher: christoph.becher@physik.uni-saarland.de
- Robert Morsch: r.morsch@physik.uni-saarland.de (Spektroskopie)
- Philipp Fuchs: p.fuchs@physik.uni-saarland.de (Nanophotonik)
- Tobias Bauer: tobias.bauer@physik.uni-saarland.de (Nichtlineare Optik)