

Projekt QMint

Abschlussbericht 2025

Zuwendungsempfänger: Universität Stuttgart 3. Phys. Inst.	Förderkennzeichen 13N15976
Vorhabenbezeichnung: Verbundprojekt: QMinT	
Laufzeit des Vorhabens: 01.09.2021 - 31.08.2024	
Berichtszeitraum 01.09.2021 - 31.08.2024	
Berichtsdatum 24. Februar 2025	
Vorgelegt beim Projektträger: VDI Technologiezentrum GmbH	
Vorgelegt durch: Prof. J. Wrachtrup Allmandring 13, 70569 Stuttgart Telefon: +49 711 68565278 E-mail: wrachtrup@physik.uni-stuttgart.de	

1. Kurze Darstellung

1.1. Aufgabenstellung

Das Ziel des Projekts bestand darin, Infrastruktur zur Mikro- und Nanostrukturierung besonders von optisch auslesbaren Quantenbits, speziell solche, die sich für den Einsatz in Quantensensoren eignen, zu beschaffen, zu installieren und für die Quantensensorforschung zu nutzen.

Spin-basierte Quantensensoren und Quantenbits (Qubits) werden derzeit praktisch ausschließlich als Einzelstücke in Forschungslaboren hergestellt. Ein Transfer hin zu einer skalierbaren Herstellung und Funktionalisierung der Quantensysteme erfordert eine verlässliche und skalenübergreifende Strukturierungs- und Verbindungstechnologie für die beteiligten elektronischen Kontrollstrukturen und die optische/photonische Peripherie. Dabei muss der Übergang von der Nanoskala hin zur einige 100µm betragenden klassischen optischen/photonischen Peripherie in einer Form geschehen, die es erlaubt, die beteiligten Herstellungsprozesse mit einer Präzision von teilweise besser als 10nm zu überlappen. Der Antrag umfasst daher Forschungsarbeiten, welche es mittels dreier im Rahmen des Projekts zu beschaffenden Geräte, die gemeinsam die hohen Anforderungen in Bezug auf die Fertigungsgenauigkeit über die gesamte Längenskala erfüllen, erstmalig ermöglicht, die

bisher bestehende Lücke zwischen der nanoskaligen Herstellung von Quantensystemen und der benötigten mesoskaligen Aufbau- und Verbindungstechnik zu schließen. Beantragt wurde eine Elektronenstrahlolithographieanlage, die es erlaubt, mit einer räumlichen Präzision von besser als 10 nm über einen Bereich von mehr als 500 µm Spinquantenbits zu platzieren, ein 3D Drucker für qualitativ hochwertige frei formbare Optiken um die Spinquantenbits mit einer makroskopischen Optik zu verbinden.

Weiterhin sollte ein integrierter Quantensensor beschafft und getestet und mit ihm externe Magnetfelder charakterisiert werden. Im Berichtszeitraum konnten die beantragten Geräte beschafft und installiert werden. Die Geräte wurden getestet und erfüllen die von den Herstellern angegebenen Spezifikationen. Mit den Geräten wurden Quantensensoren entwickelt und erforscht, die durch die verbesserte Anordnung von Dotierungen und die gesteigerte Nachweisempfindlichkeit von Photonen eine deutlich gesteigerte Empfindlichkeit aufwiesen. Mit diesen Sensoren konnte erstmals das magnetische Signal eines menschlichen Herzens außerhalb von abgeschirmten Laboratorien nachgewiesen werden.

1.2 Technische und wissenschaftlichen Voraussetzungen

Das Projekt basiert auf der in Stuttgart in der jüngeren Vergangenheit geschaffenen Gebäudeinfrastruktur. Insbesondere wurde mit dem Zentrum für Angewandte Quantentechnologie (ZAQ) ein Forschungsgebäude erstellt, das einen Reinraum zur Unterbringung der Technologie für die Nanostrukturierung aufweist. Gleichzeitig verfügt das Gebäude über ein abgeschirmtes Labor, in dem äußere Magnetfelder auf ca. 50pT reduziert werden. Die Antragsteller verfügen zudem über eine jahrelange Erfahrung im Bereich der Erforschung und Anwendung von Spinddefekten in Diamant.

1.3 Projektstruktur

Das Projekt wurde in Zusammenarbeit zwischen dem 3.Physikalischen Institut (Physik) und dem Institut für Intelligenten Sensoren (Elektrotechnik) durchgeführt. Das Projekt umfasst die Installation und die Inbetriebnahme der beschafften Geräte. Im Einzelnen waren die folgenden Meilensteine geplant.

MS: Erzeugung eines Arrays von Spinquantenbits mit 20nm Abstand auf einer Fläche von 200x200µm² und einer Ausbeute von 50%.

MS: Anbindung der Qubits an einen ASIC für die elektronische Kontrolle sowie Anbindung einer Faser/einen PIC die für das optische Auslesen dienen

1.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand

Zu Beginn des Projekts war die großflächige und effiziente Implantation von Dotierungen in Diamant, speziell von NV Zentren weitgehend unerforscht. Über Erzeugung der Masken, die für die Implantation notwendig sind, war zuvor berichtet worden. Allerdings sind diese Masken nur über eine kleine Fläche erzeugt worden. Weiterhin gab es vor dem Projekt keine Berichte

über den effizienten und hochwertigen Einsatz von gedruckten photonischen Strukturen in der Festkörperquantensensorik. Um beide Felder bearbeiten zu können, wurden zwei Geräte beschafft. Die Geräte wurden entsprechend des ursprünglich anvisierten Zeitplans installiert und konnten pünktlich in Betrieb genommen werden. Das Vorhaben hat sich daher entsprechend des initial geplanten Zeitplans entwickelt. Erste Strukturen bzw. photonische Verbindungen konnten bereits 6 Monate nach der Lieferung der Geräte hergestellt werden. Besonders hervorzuheben ist, dass der von der Firma Qant gelieferte Sensor, trotz der aufwendigen Entwicklung pünktlich geliefert wurde und exakt die Spezifikationen eingehalten hat, die im Rahmen der Beschaffung vereinbart war.

1.5 Zusammenarbeit

Das Projekt wurde in Zusammenarbeit des 3PI und IIS durchgeführt. Sowohl die wissenschaftlichen Arbeiten zur Nanostrukturierung also auch der Herstellung von photonischen Strukturen wurden im Reinraum des ZAQ durchgeführt. In allen Anwendungsfällen werden beide Arbeitsschritte koordiniert ausgeführt, d.h. integriert. Die Zusammenarbeit im Rahmen des beschafften Quantensensors und dem 3PI war durch den Vergleich der vom 3PI hergestellten Quantensensoren und dem erworbenen Sensor gegeben.

2. Eingehende Darstellung

2.1 Verwendung der Zuwendung und des erzielten Ergebnisses im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele

Das Projekt QMINT sollte dazu dienen, neuartige Infrastruktur zur Verbesserung der Entwicklung von Quantensensoren zu installieren und für die Erforschung von Quantensensoren einzusetzen. Zu diesem Zweck wurde im Rahmen des Projekts ein Elektronenstrahlschreiber mit einem besonders großen Schreibbereich beschafft und eingesetzt. Zusätzlich wurde ein 3D Drucker für die flexible Herstellung von optischen Verbindungen für einen integrierter Quantensensor beschafft. Mit den Geräten wurde die Verbesserung der Empfindlichkeit von Quantensensoren erreicht.

Weithin wurde ein integrierter Quantensensor gekauft und mit den im 3PI entwickelten Systemen verglichen.

Mikro- und Nanostrukturierung für die Verbesserung der Empfindlichkeit von Quantensensoren.

Im Rahmen von QMinT wurden Geräte zur Diamantstrukturierung, der gezielten Platzierung von Dotierungen und der Herstellung von photonischen Strukturen beschaffen. Die Geräte sind im Reinraum des ZAQuant installiert worden. Abb. 1 zeigt einen Blick in den Reinraum.



Abb. 1 Reinraum des ZAQuant. Rechts hinten ist der beschaffte 3D Drucker zu sehen. Der Elektronenstrahlschreiber ist im hinteren Bereich des Reinraums installiert, der durch eine separate Schleuse vom abgebildeten Bereich getrennt ist.

Beantragte Arbeiten:

1) Herstellung nanoskaliger Arrays von Spinqantenbits für die Quantensorik

In einem ersten Arbeitsschritt sollte über einen Bereich von ca. 0.5mm und mit einer Präzision von ca. 10nm eine Lochmaske auf Diamant erzeugt werden, durch die dann Stickstoff oder Silizium zur Erzeugung von Spinqantenbits implantiert werden sollten. Der Lochabstand sollte dabei schrittweise von ca. 200nm auf bis zu 20nm reduziert werden, während der Lochdurchmesser bei ca. 20nm liegt. Auf diese Weise werden Spinqantenarrays mit

maximaler Dichte, die noch eine gezielte Quantenkontrolle erlauben, erzeugt. Geringere Abstände führen zu einer zu großen Wechselwirkung der Qubits untereinander, sodass die Spins nicht mehr kontrolliert werden können und die Empfindlichkeit der Sensoren bzw. Steuerbarkeit der Qubits leidet.

MS: Als überprüfbarer Meilenstein soll die Erzeugung eines Arrays von Spinquantenbits mit 20nm Abstand auf einer Fläche von $200 \times 200 \mu\text{m}^2$ und einer Ausbeute von 50% erreicht werden.

Durchgeführte Arbeiten:

Die beantragten Arbeiten wurden durchgeführt und entsprechende Lochmasken hergestellt. Anfänglich konnte eine Ausbeute von ca. 20% erreicht werden. Weiterhin wurden die Durchmesser der Lochmasken systematisch variiert und die Ausbeute, d.h. das Verhältnis von implantierten Stickstoff-Ionen und erzeugten NV-Zentren untersucht. Es konnte gezeigt werden, dass durch eine gezielte Nachbehandlung der Proben die Ausbeute auf die Zielmarke von 50% erhöht werden konnte.

2) Integration der Arrays in eine elektronische und photonische Peripherie

Beantragte Arbeiten:

In einer weiteren Phase des Projekts sollten die anfänglich erforschten und implementierten Prozesse dahingehend erweitert werden, dass die entstehenden Quantensysteme mit aktiven und passiven elektronischen und photonischen integrierten Schaltkreisen kombiniert werden. Hierzu soll der beschaffte 3D Drucker dienen.

MS: Als überprüfbarer Meilenstein soll die Anbindung der Qubits an einen ASIC für die elektronische Kontrolle sowie eine Faser/einen PIC für das optische Auslesen dienen.

Durchgeführte Arbeiten:

Im Antrag wurden beispielhaft Strukturen gezeigt, die mit den beschafften Geräten hergestellt werden sollten. Abb. 2 zeigt die Planskizze einer solchen Struktur. Einerseits umfasst sie die mit einem Drucker herzustellende Übergangsoptik, die die im Diamant hergestellte nanooptische Struktur kontaktiert. Andererseits besteht die Anordnung aus einem optischen Resonator, der mittels Nanostrukturierung aus Diamanten gefertigt werden muss. In dieser Nanostruktur sind die Dotierungen angeordnet.

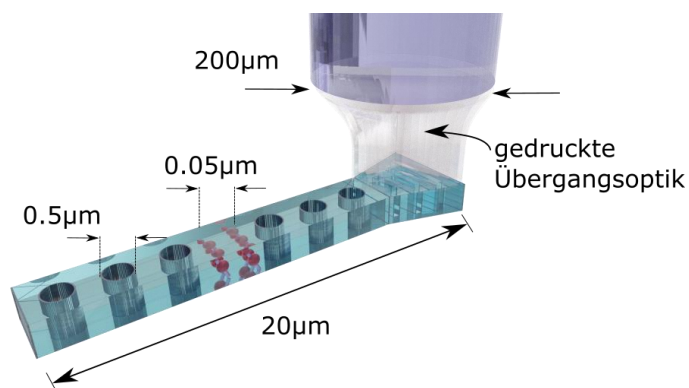


Abb. 2 In der Antragsskizze entworfene Beispielstruktur, die aus einer 3D gedruckten Übergangsoptik und einem Diamantresonator besteht. Im Resonator sind Dotierungen platziert, deren optisches Signal mittels des Resonators gezielt verstärkt und in die Übergangsoptik eingekoppelt wird.

Zum Vergleich zeigen die Abb. 3a,b die im Rahmen von QMinT hergestellten Strukturen. In der Abb. 3a sind die photonischen Wellenleiter, die mit dem 3D Drucker hergestellt wurden zu sehen. Sie verbinden die unter den rechteckigen Abdeckungen verborgenen Diamant-Nanostrukturen mit der Peripherie. Die photonischen Wellenleiter sind mit einem optimierten Koppler an die Diamantresonatoren angekoppelt. Die Dämpfung der Wellenleiter beträgt weniger als 0.1dB/cm.

Abb. 3b zeigt einen mittels der durch QMinT beschafften Elektronenstrahlithographie hergestellten Resonator aus Diamant. Anders als der in Abb. 2 skizzierte Resonator handelt es sich bei diesem Resonator um eine Ausführung, die aus einem korrigierten Wellenleiter besteht. Mit dieser Resonatortyp konnte die Arbeitsgruppe des Antragstellers Güten von besser als 1×10^4 erreichen. Entscheidend für diese Werte war es, dass der beschaffte Elektronenstrahlschreiber ein verzerrungsfreies Schreibfeld von nahezu einem Millimeter aufweist, was dazu führt, dass eine Vielzahl von Resonatoren hergestellt werden können und die optimale Resonatorstruktur durch eine systematische Variation der Abmessungen des Resonators ermittelt werden kann.

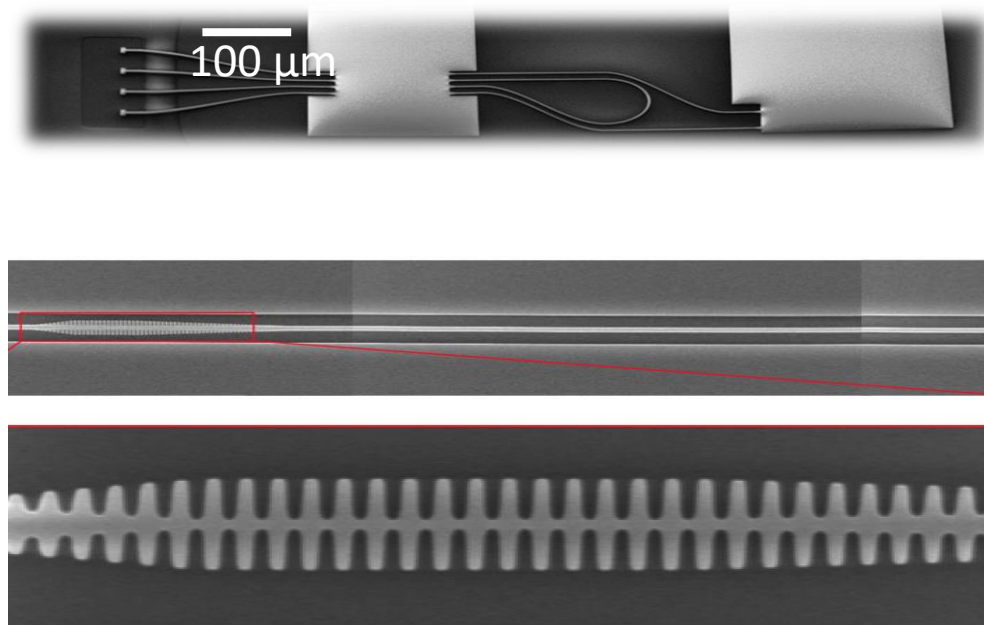


Abb. 3a Nanophotonische Struktur bestehend aus Diamantresonatoren und 3D gedruckten Polymerwellenleitern. Auf der linken Seite sind die Eingangsports der Struktur zu sehen. Die Diamantresonatoren sind unter einer gedruckten Polymerabdeckung vergraben b) Diamantnanoresonator. Der Resonator besteht aus einem freistehenden Wellenleiter, dessen Seitenwände korrigiert sind. Die Periode der Korrigation bestimmt die Resonanzwellenlänge des Resonators. Der obere Teil der Abbildung zeigt die lange Einkoppelstruktur des Resonators, an die sich der 3D gedruckte Polymerwellenleiter anschließt.

Der beantragte 3D Drucker wurde ebenfalls dazu genutzt, mikroskopische Übergangsoptiken zwischen makroskopischen Diamanten und einem Wellenleiter zu drucken. Abb. 4 zeigt ein

repräsentatives Beispiel. Hier wurde eine parabolische Linse um einen Diamantkristall gedruckt, um die Lichtsammelleffizienz zu erhöhen. Da die Linse einen Durchmesser von ca. 0.1mm hat, wurde ein Verfahren gewählt, das es erlaubt, einzelne Druckbereiche aneinander zu fügen, ohne Versetzungen zwischen den Bereichen zu erhalten. Die Linse erhöht die Gesamtsammelleffizienz von ca. 45% auf über 80% und stellt eine kostengünstige Variante gegenüber anderen Verfahren, wie der Anfertigung von Sammelkörpern durch Materialabtrag, dar.

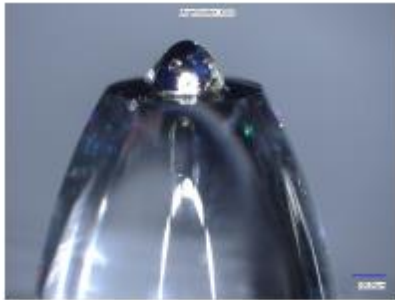


Abb. 4 Mittels eines 3D Druckers hergestellte Linse zur effizienten Sammlung der Fluoreszenz eines Diamanten. Der Diamant befindet sich auf der ebenen Fläche der im unteren Teil der Abbildung sichtbaren parabolischen Linse. Die mit 3D Druck gedruckte Linse ist um den Diamanten herum gedruckt und sitzt auf dieser Fläche auf.

Wie bereits erwähnt erreicht die Methode sehr gute Werte für die Koppeffizienz. Voraussetzung dafür ist es, den Druckprozess so zu optimieren, dass bei dem notwendigen großen Durchmesser der Linse, keine Streuprozesse an den Rändern der Druckvolumina entstehen. Im Rahmen des Projekts wurde der Druckprozess so optimiert, dass die Streuverluste auf weniger als 10% reduziert werden konnten.

2.2. Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

2.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Um die ambitionierten Projektziele zu erreichen, wurden im Wesentlichen alle Arbeiten durchgeführt, die innerhalb des Projektarbeitsplans vorgesehen waren. Der dabei erbrachte Arbeitsaufwand war angemessen und liegt im Rahmen der Planung. Die im Projekt entwickelten Methoden, Demonstratoren und erzielten Messergebnisse, sowie die Analyse der Messdaten trugen einen wichtigen Teil zum Projekterfolg bei.

2.4 Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit des Ergebnisses

Im Rahmen des Projekts konnte eine der wesentlichen Kriterien für die wirtschaftliche Verwertbarkeit des Diamantquantensensors erfüllt werden, nämlich die Verfügbarkeit von qualitativ hochwertigem nanostrukturierten Diamantmaterial mit einem verlässlichen Fabrikationsprozess.

Es ist geplant die Erkenntnisse des optimierten Sensoraufbaus als portables „Stand-Alone“-Gerät im Rahmen einer Start-Up Gründung weiterzuentwickeln und als Entwicklungsumgebung für andere Forschungseinrichtungen bereitzustellen. Weiter ist geplant das Sensorsystem für die wissenschaftliche chemische Analytik sowie Neurowissenschaft zu optimieren.

Als weitere mittelfristige Verwertung hat sich die Qualitätskontrolle von mikroelektronischen Schaltkreisen erwiesen. Auch diese Verwertung wird aktuell in dem geplanten Gründungsvorhaben im Detail diskutiert.

In weiteren, eingereichten Projektskizzen soll das Konsortium um weitere Spezialisten aus anderen Fachgebieten erweitert werden. Hier sind unter anderem Neurowissenschaftler sowie System-Softwareingenieure mit Expertise in Mustererkennungsalgorithmen und Kompetenz in Maschine-Learning eingebunden. Es wird davon ausgegangen, dass der Aufbau eines Magnetoenzephalografiesystems für Mensch-Maschine-Schnittstellen basierend auf Quantensensoren weitere 6-9 Jahre Entwicklungszeit benötigt.

2.5 Bekannt gewordener Fortschritt

Während der Durchführung des Projektes wurde über eine Veröffentlichung (arXiv:1911.05070v2) bekannt, dass sich die Empfindlichkeit mithilfe von magnetischen Flusskonzentratoren steigern lässt. Diese Methode wurde in diesem Projekt erfolgreich mit der verbesserten photonischen Ankopplung kombiniert.

Weiter wurde eine Veröffentlichung von einer japanischen Forschergruppe bekannt, die ebenso ein Diamant Gradiometer entwickelt hat¹. Jeder Diamant ist an einer optischen Faser befestigt, um eine freie Sensorplatzierung zu ermöglichen. Ohne jegliche magnetische Abschirmung erreicht dieses Gradiometer ein magnetisches Rauschspektrum, das mit dem eines dreischichtigen magnetisch abgeschirmten Gehäuses vergleichbar ist und reduziert die Geräusche im Niederfrequenzbereich unter 1 Hz sowie bei der Frequenz von 50 Hz (Netzfrequenz) und ihren Oberschwingungen. Die Sensitivität dieses Gradiometers ist mit einem Rauschboden von 50 nT jedoch noch nicht geeignet, um schwache biomagnetische Signale im pT Bereich aufzuzeichnen.

¹ Masuyama, Y.; Suzuki, K.; Hekizono, A.; Iwanami, M.; Hatano, M.; Iwasaki, T.; Ohshima, T. Gradiometer Using Separated Diamond Quantum Magnetometers. *Sensors* **2021**, *21*, 977. <https://doi.org/10.3390/s21030977>