# SPINNING Abschlussbericht (TUM) – Teil I

**FKZ 13N16214**

**Integrierte Detektoren und Quellen für die Diamant-Quantenphotonik**

**1.1.22 – 30.6.25**

J. J. Finley, M. Rieger, S. Strohauer
Walter Schottky Institut and TUM School of Natural Sciences
Am Coulombwall 4, 85748 Garching, Germany

Dieses Projekt hat zum Gesamtziel des SPINNING-Konsortiums, eine Spin-basierte Quantencomputerarchitektur mit einer verteilten Netzwerkstruktur zu demonstrieren, beigetragen. Die Knoten des geplanten Netzwerks bestehen aus optischen Resonatoren, die über Glasfasern und eine photonische Struktur miteinander verbunden sind. In der ersten Phase des Projekts sollten zwei Knoten gezeigt werden, die jeweils aus einem optischen Resonator mit einem aktiven Farbzentrum in Diamant bestanden, dessen elektronischer Spin über das Netzwerk mit den anderen Knoten und mit anderen Kernspins in ihrer unmittelbaren Umgebung quantenmechanisch verschränkt werden kann. Das übergeordnete Ziel des Konsortiums war es, diese Plattform zu nutzen, um nicht-lokale Quantengatter durchzuführen und so die Anzahl der Qubits in der Quantencomputerstruktur zu skalieren. In diesem Teilprojekt, das an der TUM angesiedelt ist, wurden zwei Schlüsselkomponenten erforscht und entwickelt, die für das SPINNING-Konsortium erforderlich sind:

i. Supraleitende Nanodraht-Einzelphotonen-Detektoren (*engl. Superconducting Single Photon Detectors* – SNSPDs), die quantenphotonenbasierte Signale erfassen können.
ii. Deterministische Halbleiter-basierte Einzelphotonenquellen, die mit elektrisch abstimmbaren und stabilisierten SiV-Zentren verbunden sind.

Die SNSPDs wurden für eine hohe Leistung bei allen wichtigen Wellenlängen für die Farbzentren der Gruppe IV (GIV) optimiert, während sich die Quellen auf SiV bei 737 nm konzentrierten. Die entwickelten Detektormodule bestanden aus kristallinen (NbTiN) supraleitenden Dünnschichten. Solche SNSPDs zeichnen sich aufgrund ihrer hervorragenden Eigenschaften wie Detektionseffizienz nahe 100 %, Subhertz-Dunkelzählraten und Pikosekunden-Timing-Jitter bei der Einzelphotonen-Detektion aus. Allerdings schränkt eine lokale Erhöhung der Stromdichte (engl. „*current crowding*“) in den Biegungen der mäanderförmigen SNSPDs diese Leistungskennzahlen ein. Durch die lokale Bestrahlung der geraden Segmente des SNSPD mit Helium Ionen, während die Biegungen unbestrahlt blieben, zeigten die im Projekt erzielten Ergebnisse, dass wir in der Lage sind, SNSPDs ohne Stromüberlastung und gleichzeitig mit verbesserter Empfindlichkeit zu realisieren. Wir erreichten eine interne Detektionseffizienz von 94 % mit einer Dunkelzählrate von 7 mHz nahe dem Beginn der Sättigungsdetektionseffizienz für Wellenlängen, die mit GIV-Zentren in Diamant kompatibel sind. Die mikroskopischen Ursachen dieser Leistungsverbesserungen konnten ebenfalls vollständig verstanden werden. Neben der Bereitstellung von Detektoren, die für das SPINNING-Konsortium geeignet sind, wurde ein Patent angemeldet und es wurden mehrere Fachartikel veröffentlicht. Während bestrahlte und nicht bestrahlte NbTiN-Schichten eine ähnliche Kristallinität aufwiesen, stellten wir fest, dass morphologische Veränderungen der supraleitenden Schicht und des darunterliegenden Substrats die Wärmeleitfähigkeit verringerten und dadurch die lokale Detektionsempfindlichkeit im He-bestrahlten Bereich verbesserten. Die erzielten Ergebnisse bieten einen hochinnovativen Ansatz zur lokalen Modifizierung der Substrateigenschaften zur Verbesserung der Detektorleistung und könnten

beispielsweise für Multipixel-Detektoren relevant sein, um die Empfindlichkeit verschiedener Elemente nach der Herstellung auf denselben Wert zu normieren.

Im Teil des Projekts, der sich auf Spin-Photon-Schnittstellen konzentriert, arbeitete die TUM-Gruppe intensiv an der Stabilisierung des Ladungszustands und der Steuerung der optischen Frequenz einzelner SiV-Zentren sowie an der Realisierung von Halbleiter-basierten Einzelphotonenquellen bei 737 nm. Wir können wie geplant den Ladungszustand und die Frequenz einzelner SiV-Zentren mithilfe lokaler elektrischer Felder manipulieren. Dafür entwickelten wir eine Methode, um den Ladungszustand zwischen dem optisch aktiven $SiV^-$ und dem dunklen $SiV^{2-}$ mit Megahertz-Raten und einem Kontrast von >90 % kontrolliert umwandeln zu können. Darüber hinaus zeigten wir, wie die SiV-Emissionsintensität durch eine kontrollierte optische Ansteuerungssequenz in Gegenwart elektrischer Felder um den Faktor ~$10^2$-$10^3$ verbessert werden kann. Darüber hinaus erhalten wir bisher unbekannte Informationen über die Defekte, die zur Photoleitfähigkeit beitragen, was auf das Vorhandensein von substituiertem Stickstoff und Divakanzen hinweist. Gleichzeitig wird gezeigt, dass die elektrischen Felder die Abstimmung der Frequenz eines einzelnen SiV-Zentrums ermöglichen. Wir haben die elektrische Abstimmung der SiV-Übergangsfrequenz mit einer Stark-Verschiebung von über 10 GHz demonstriert, vergleichbar mit der inhomogenen Linienbreite von 15 GHz. Unsere Ergebnisse zeigen, dass große elektrische Stark-Verschiebungen die inhomogene Verteilung der Übergangsfrequenzen überwinden können, was einen bedeutenden Schritt in Richtung skalierbarer SiV-basierter Quantentechnologien wie Quantenrepeatern darstellt. Schließlich haben wir Quantenpunkte (QDs) mittels Tropfenepitaxie auf GaAs sowie QDs InAs-AlGaAs Stranski-Krastanov-QDs gezüchtet und untersucht. Auch hier zeigte sich, dass der DC-Stark-Effekt die Abstimmung der Exzitonemission auf die SiV-Übergangsfrequenz erleichtert, und es wurden optimierte photonische Strukturen für die deterministische Quantenlichtquelle entworfen.

Die TUM-Gruppe entwickelte hochinnovative Ansätze zur Stabilisierung der Photophysik von Farbzentren der Gruppe IV unter Verwendung lokal angelegter statischer elektrischer Felder. Auf diese Weise konnte der Ladungszustand der SiV Farbzentren stabilisiert und ihre Stabilität erheblich erhöht werden. Der mikroskopische Mechanismus, der die Ladungsstabilität bestimmt, wurde verstanden und die Dynamik der Photoentladung und Ladungseinschließung aufgeklärt. Das epitaktische Wachstum von Halbleiter-Quantenpunkten, die resonant mit dem SiV-Zentrum emittieren, erwies sich als schwieriger und zeitaufwändiger als erwartet. Hinzu kam der vorübergehende Ausfall einer Molekularstrahlepitaxie-Anlage (MBE) an der TUM im zweiten Jahr des Projekts. Dieses Problem konnte durch die erfolgreiche Zusammenarbeit mit der Gruppe von Arne Ludwig an der Universität Bochum gemildert werden. Sobald das MBE-System wieder betriebsbereit war, milderte die TUM die schlechte quantenoptische Qualität der Tröpfchen-Epitaxie-QDs, die nahe am SiV emittieren, durch die Entwicklung eines neuartigen Ansatzes, der auf der Abdeckung von InAs-Punkten mit x=66 % $Al_xGa_{1-x}As$-Barrierematerialien mit großer Bandlücke basiert. Dies führte zu QDs mit ausgezeichneter optischer Qualität, die nahe am SiV-Zentrum emittieren. Obwohl diese QDs eine hohe quantenoptische Qualität aufweisen und genau im richtigen Wellenlängenbereich für SiV emittieren, konnten sie im Laufe des Projekts nicht in hochleistungsfähige optische Strukturen integriert werden. Diese Aktivitäten werden derzeit fortgesetzt.

Die TUM-Gruppe arbeitete eng mit der Universität Stuttgart (Jens Anders) bei der Entwicklung der analogen Ausleseelektronik für die entwickelten SNSPDs und mit Swabian Instruments GmbH bei der Entwicklung / Implementierung der ultraschnellen Impulselektronik zur Registrierung von Detektionsereignissen mittels Zeitmarkierung zusammen. Darüber hinaus organisierte die TUM zwei der Konsortiumstreffen.