

Verbundprojekt InQuRe

Schlussbericht Teil 2

Zuwendungsempfänger: Universität Stuttgart, 3. Phys. Inst.	Förderkennzeichen: 16KIS1639K
Field testing an integrated quantum repeater node Mit dem Teilvorhaben: Entwicklung eines Quanten-Netzwerk-Knotens basierend auf Farbzentren im Siliziumcarbid	
Laufzeit des Vorhabens: 01.07.2022 - 30.06.2025	
Berichtszeitraum 01.07.2022 - 30.06.2025	
Berichtsdatum 28.08.2025	
Vorgelegt beim Projektträger: VDI	
Ansprechpartner: Manuel Kraft	
Vorgelegt durch: Prof. J. Wrachtrup Allmandring 13; 70569 Stuttgart Telefon: +49 711 68565278 E-mail: wrachtrup@physik.uni-stuttgart.de	

1) Wichtigste wissenschaftlich-technische Ergebnisse und andere Ereignisse, die Einfluss auf das Vorhaben gehabt haben

Die Projektarbeiten haben die wesentlichen Ziele des Vorhabens erreicht. Dazu gehört die Adressierung von drei Kernspinqubits, die Einbindung von V2 Defekten in ein Fasernetzwerk sowie die Spin-Photon Verschränkung einzelner Photonen und Elektronenspins des V2 Defekts. Dieses Ziel wurde ebenfalls von einer Arbeitsgruppe aus China erreicht [R-Z Fang et al. Phys. Rev. Lett. **132**, 160801]. Die Arbeitsgruppe in Stuttgart hat V2 Zentren in Wellenleiter integriert und eine Nachweiseffizienz für Photonen der Defekte von besser als 80% erreicht. Dies ist eine wesentliche Voraussetzung für die effiziente Konversion der Photonen zu

Telecomwellenlängen und damit die Einbindung in ein Fasernetzwerk. Die verschränkten Photonen konnten in ein Fasernetzwerk eingekoppelt werden. Damit wurde das Ziel des Vorhabens erreicht.

**2) Vergleich des Vorhabenstandes mit der ursprünglichen (bzw. mit Zustimmung des ZG geänderten) Arbeits-, Zeit- und Ausgaben-/Kostenplanung.
Bei Abweichungen ist eine detaillierte Erläuterung erforderlich.**

Das Vorhaben liegt im Wesentlichen innerhalb der ursprünglichen (bzw. mit Zustimmung des ZG geänderten) Arbeits-, Zeit- und Ausgaben- bzw. Kostenplanung.

* Eine Anpassung der ursprünglichen Arbeitsplanung war erforderlich (detaillierte Erläuterung erforderlich)

Im Rahmen des Arbeitspakets **USTUTT_AP 3C.a** war der Transport des SiC Experiments nach Südfrankreich vorgesehen, um die in Stuttgart entwickelte Einzelphotonenquelle im dortigen Fasernetzwerk zu testen. Mittlerweile ist eine gleichwertiges Fasernetzwerk in Stuttgart und Umgebung installiert worden. Da die einzige Komponente, die nicht in Stuttgart verfügbar war, ein leicht transportabler Wellenlängenkonverter (s. Abb. 4) war, war es viel zeit- und kosteneffizienter die Experimente in Stuttgart durchzuführen. Dabei ist zu berücksichtigen, dass die Einzelphotonenquelle in Stuttgart einen optischen Tisch, Kryostaten, frequenzstabilisierte Laser und eine aufwendige Kontrollperipherie für die Spinkontrolle umfasst (Gesamtgewicht ca. 899kg), während der Wellenlängen-konverter justagefrei ist und lediglich ein Gewicht von 20kg umfasst und mit geringem Aufwand transportiert werden konnte. Weiterhin war zu erwarten, dass nach dem Transport eine umfangreiche Neujustage der Photonenquelle notwendig wäre. Alle geplanten Experimente konnten in Stuttgart durchgeführt werden. Das weitere Arbeitsprogramm blieb daher unverändert und konnte vor allem im beantragten Zeitrahmen durchgeführt werden.

* Es sind zeitliche Verzögerungen aufgetreten (Erläuterung erforderlich).

Nein

*Es sind Mehr- oder Minderausgaben aufgetreten (Erläuterung erforderlich).

1) Im Verlauf des Projekts hat es sich herausgestellt, dass die Einzelphotonenquelle einen verbesserten optischen Tisch benötigt, um die Photonenemission zeitlich stabiler zu halten. Zu diesem Zweck wurden Sachmittel in Investitionsmittel umgewandelt. Ein entsprechender Antrag wurde gestellt und vom Projektträger genehmigt.

2) Die Durchführung des Feldversuchs in Stuttgart erforderte einige Anpassungen des Fasernetzwerkzugangs an die Einzelphotonenquelle, die ursprünglich nicht vorgesehen waren. Wir haben daher im Projektverlauf einen Antrag stellen, um die nicht benötigten Reisemittel in Sachmittel umzubuchen.

3) Haben sich die Aussichten für das Erreichen der Ziele des Vorhabens innerhalb des ursprünglichen (bzw. zwischenzeitlich mit Zustimmung des Zuwendungsgebers geänderten) Ausgaben-/Kostenzeitraums im aktuellen Berichtszeitraums verändert, so dass ggf. eine Anpassung des Arbeitsplans erforderlich wird?

X Die Aussichten für das Erreichen der Ziele des Vorhabens haben sich gegenüber dem Zeitpunkt der Antragstellung nicht verändert.

* Die Aussichten für das Erreichen der Ziele des Vorhabens haben sich geändert (Erläuterung erforderlich).

4) Sind im aktuellen Berichtszeitraum FuE-Ergebnisse Dritter bekannt geworden, die für die Durchführung des Vorhabens relevant sind?

X* Nein

* Ja (Erläuterung erforderlich)

5) Sind oder werden Änderungen in der Zielsetzung notwendig?

X* Nein

* Ja (Erläuterung erforderlich)

6) Jährliche Fortschreibung des Verwertungsplans: Sind Änderungen oder Ergänzungen des im Antrag dargestellten Verwertungsplans erforderlich?

X* Nein, der Verwertungsplan gilt unverändert wie bei Antragstellung.

* Ja, folgende Änderungen/Ergänzungen des Verwertungsplans sind erforderlich:

* Im Berichtszeitraum sind folgende Erfindungen/Schutzrechte angemeldet worden:

* Im Berichtszeitraum sind Änderungen der wirtschaftlichen Erfolgsaussichten nach Projektende gegenüber der Darstellung im Antrag aufgetreten (Erläuterung erforderlich).

* Im Berichtszeitraum sind Änderungen der wissenschaftlichen und/oder technischen Erfolgsaussichten nach Projektende gegenüber der Darstellung im Antrag aufgetreten (Erläuterung erforderlich).

* Im Berichtszeitraum sind Änderungen der wissenschaftlichen und/oder technischen Anschlussfähigkeit nach Projektende gegenüber der Darstellung im Antrag aufgetreten (Erläuterung erforderlich).

Detaillierter Ergebnisbericht

USTUTT_AP 1A.c2 M3 Quantenkontrolle von drei Kernspin-Qubits

Die Arbeitsgruppe in Stuttgart hat systematisch die Kernspinumgebung eines einzelnen V2 Defekts spektroskopisch charakterisiert und deren Kernspinkontrolle untersucht. Im Detail hat die Gruppe die kohärente Kontrolle von solchen Kernspins erreicht, die eine starke ($>2\text{MHz}$) Hyperfeinwechselwirkung mit dem Elektronenspin aufweisen. Aufgrund dieser Hyperfeinwechselwirkung wird das effektive magnetische Moment des Kernspins vergrößert, was deren kohärente Kontrolle vereinfacht.

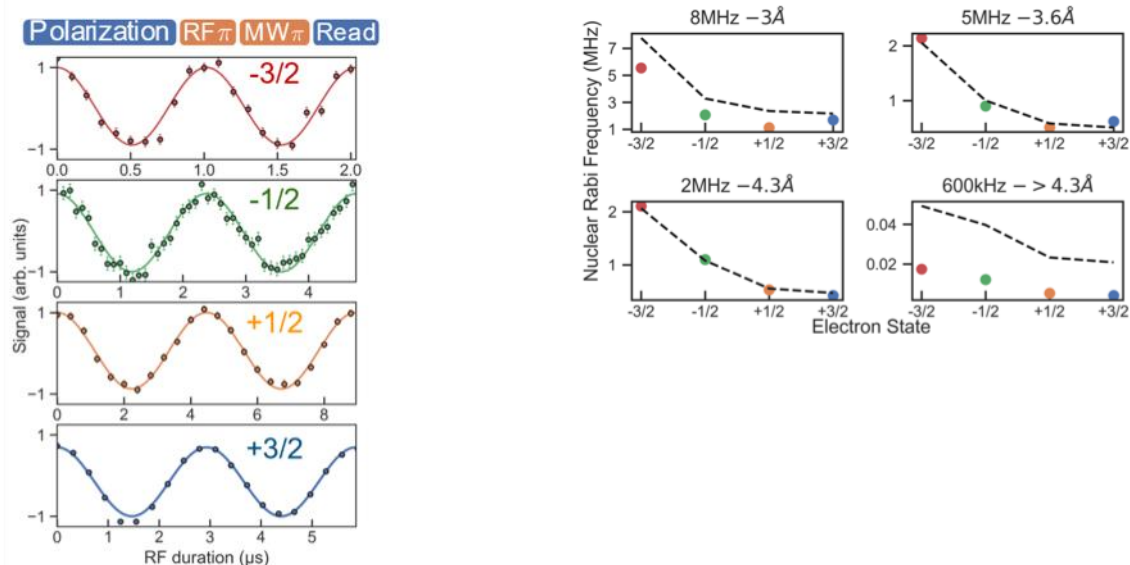


Abb. 1 (links) Kohärente Kontrolle eines einzelnen Kernspins in den verschiedenen Elektronen-spinniveaus $\pm 1/2$ und $\pm 3/2$. (rechts) Rabi-frequenzen für insgesamt vier Kernspins. Die erreichte Rabi-frequenz hängt vom Spinzustand des Elektronenspin ab. Die Hyperfeinkopplung der Kernspins ist über den Teilgraphiken angegeben und beträgt 8MHz , 5MHz , 2MHz und 600kHz . Die Adressierung der Kernspins erfolgt über deren spezifische Resonanzfrequenz, die durch die Hyperfeinkopplung und damit die Position der Kerne relativ zum Elektronenspin gegeben ist. Insgesamt lassen sich ca. 20-30 einzelne Kernspin-qubits pro V2 Defekt individuell adressieren.

Die Antragsteller haben verschiedene Kontrollsequenzen entwickelt, bzw. auf das $S=3/2$ System des V2 angepasst. Dazu gehört im Besonderen die Weiterentwicklung von Entkopplungssequenzen, die die Kohärenz des Elektronenspins verbessern und gleichzeitig eine Adressierung der Kernspins erlaubt. Erwähnt sei hier besonders die Weiterentwicklung der Kombination der gleichzeitigen kohärenten Kontrolle des Elektronen- und der Kernspins. Dazu wurde eine DD-RF Sequenz entwickelt, die es erlaubt alle innerhalb des T_1 -Limits adressierbaren Kernspins kohärent zu kontrollieren. Aufgrund der chemischen Zusammensetzung von SiC, stehen hierfür ^{13}C und ^{29}Si Kernspins zur Verfügung. Da dies die doppelte Zahl der z.B. in Diamant zur Verfügung stehenden Kernspins sind, lässt sich mit SiC ein vierfach größerer Hilbertraum adressieren.

Die Ergebnisse demonstrieren das Erreichen des Ziels für mindestens drei Kernspins eine kohärente Kontrolle zu demonstrieren.

Die kohärente Steuerung der schwach gekoppelten Speicher über die DDRF wurde in einer Form des CNOT-Gatter durchgeführt, das auf dem Kernspin durchgeführt wurde, gesteuert durch den Elektronenspin. Dieses Gatter ist für einen Quantenverschränkung- und Austausch unerlässlich. Schließlich wurde die Kontrolle von zwei schwach gekoppelten Spins durchgeführt, einer aus einem ^{29}Si und einer aus einem ^{13}C .

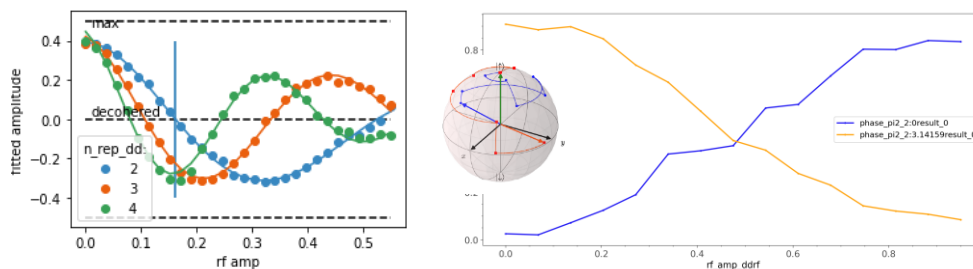


Abb 2. Kohärente Steuerung über die DDRF-Sequenz. Als Funktion der HF-Amplitude werden die kohärenten Schwingungen der Kernspins beobachtet. (Linkes Si2, rechts C1 Spin)

Die Tabelle unten listet die Hyperfeinkopplungen der drei genutzten Kernspinqubits auf:

ID	Hyperfine, Azz, MHz
Si1	5,00
Si2	0,063
C1	0,02

Tabelle 1. Liste der Kernspinqubits

USTUTT_AP 1A.d Oberflächenpassivierung von SiC-Proben

Die Arbeitsgruppe hat verschiedene Methoden erforscht, um die Oberfläche von SiC zu verändern, bzw. zu passivieren. Zu diesem Zweck wurden besonders die Anzahl der Elektronen in der Nähe von Grenzflächen modifiziert. Dazu wurden Oberflächenelektroden angebracht und mit deren Hilfe das Fermi-niveau in der Nähe der Defekte verändert.

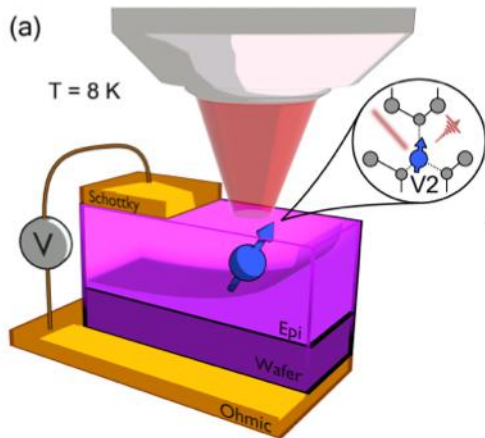


Abb. 3 Experimentelle Anordnung zur Vermessung des Einflusses von Oberflächenladungen auf das spektrale Verhalten von Defekten.

Das Resultat der Experimente besteht darin, dass sowohl die spektrale Position als auch die Linienbreite von dem außen angelegten Feld abhängen (s. Abb. 4). Die Linienverschiebung wird durch den Stark-Effekt des V2 Defektes bestimmt, während die Linienbreite durch die Fluktuationen des elektrischen Feldes in der Umgebung des Defektes verursacht wird.

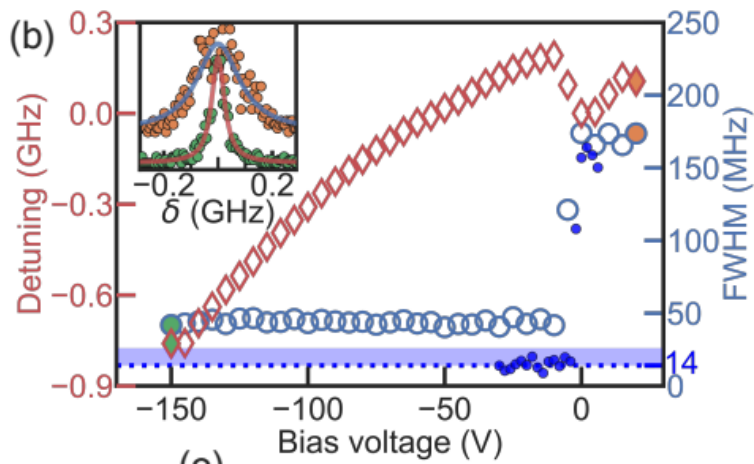


Abb. 4 Linienverschiebung und Veränderung der Linienbreite als Funktion der von außen angelegter Spannung. Gezeigt sind drei Beispiele von V2 Defekten.

Es zeigt sich, dass abhängig von der Position des Defektes eine teilweise erhebliche Reduktion der Linienbreite erreichen lässt. Dies führen wir auf eine Verringerung der Anzahl von freien Elektronen in der Umgebung der Defekte zurück. Die Experimente geben damit einen wichtigen Hinweis auf eine Strategie zur weiteren Optimierung der spektralen Stabilität des Defekts.

USTUTT_AP 3C.a Transport und Aufbau des SiC-Experimentes im Labor in Südfrankreich

Wie bereits unter 2) beschrieben, haben wir uns entschieden die im AP 3C.b beantragten Feldversuche in Stuttgart durchzuführen. Dazu wurde der Wellenlängenkonverter nach Stuttgart transportiert und im Labor installiert.

Die Planung des Projekts sehen vor, V2 Emitter in SiC zu nutzen, um einzelne Photonen über eine Faserstrecke zu transmittieren. Dies sollte ursprünglich durch eine Faserstrecke in Südfrankreich geschehen. In einem ersten Schritt nutzt die Gruppe in Stuttgart, um das Experiment zu demonstrieren. Dazu wurde eine Faser genutzt, die eigens für diese Zwecke auf dem Campusgelände und dessen Umgebung installiert wurde. Einzelne Photonen aus den im Labor in Stuttgart wurden mit einem Konverter (s. Abb. 5) auf Telekom-Wellenlängen konvertiert und anschließend durch die Faserstrecke transmittiert.

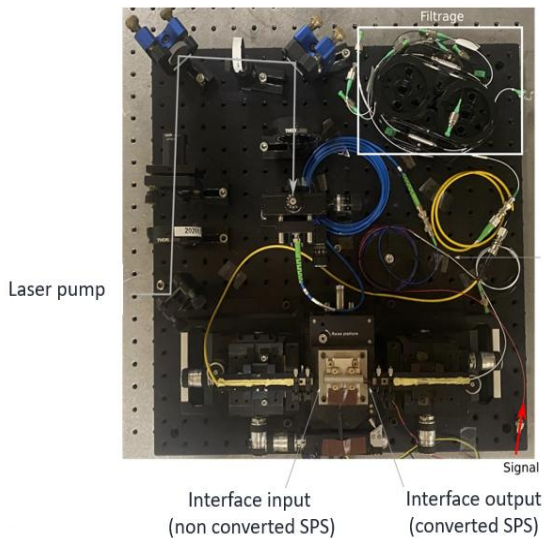


Abb. 5 Wellenlängenkonverter für die Konversion von V2 Photonen zu Telecom Wellenlängen. Der Konverter ist auf die Wellenlängen der V2 Photonen abgestimmt und erreicht eine Effizienz von ca. 30%.

USTUTT_AP 3C.b M6 Bestimmung der Leistungsfähigkeit des Quantennetzwerkknotens im Feldversuch

Zunächst wurde die Effizienz der Konversion untersucht. Dazu wurden systematisch Pumpleistung variiert und auf die in der V2 Einzelphotonenquelle vorhandene Emissionsrate und konkrete Wellenlänge angepasst. Es konnte eine optimale Konversionseffizienz von ca. 30% erreicht werden. Die Transmission und die Interferenzfähigkeit der Photonen durch das Fasernetzwerk konnte erfolgreich demonstriert werden. Zu diesem Zweck wurden die Photonen über eine Faserstrecke von 20km transmittiert und anschließend auf ihre Interferenzfähigkeit untersucht. In gepulsten Experimenten konnte eine Sichtbarkeit von 95% erzielt werden. Die Faserstrecke wurde auf verschiedene Größen, wie z.B. Polarisationsstabilität untersucht, bzw. optimiert. Erste Verbesserung und eine Reduktion der Dunkelzählrate im Fasernetzwerk wurden erreicht. Durch eine verbesserte Abschirmung der Einkoppelpunkte konnte die Dunkelzählrate im Fasernetzwerk um eine Größenordnung reduziert werden. Weiterhin hat sich die mechanische Stabilität des Einkoppelpunktes als kritisch herausgestellt.

USTUTT_AP 3C.c Bestimmung der Anforderungen für die Entwicklung neuer

Kryostat Plattformen

Die Arbeitsgruppe in Stuttgart hat einen Quantennetzwerkknoten in Stuttgart aufgebaut und verschiedene kritische Randparameter getestet. Dazu gehört die maximale Temperatur, die Größe des Probenraums und die Vibration des Probenraums, bzw. der Probe.

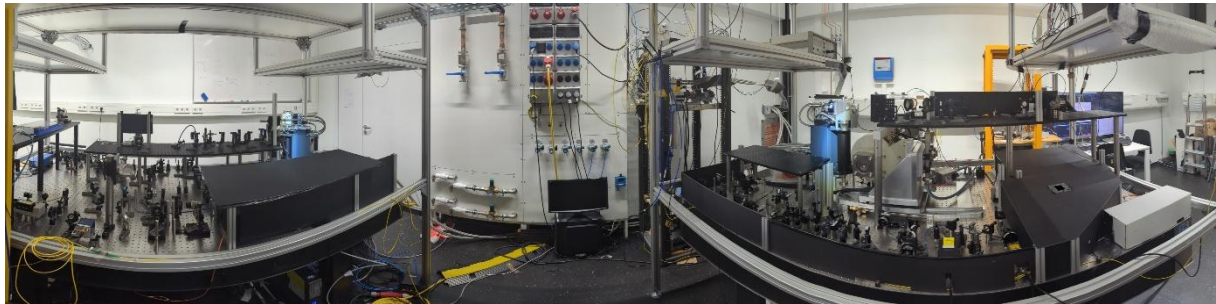


Abb. 6 Quantennetzwerkknoten im Stuttgarter Labor. Die beiden Seiten der Abbildung zeigen jeweils einen Knoten mit V2 Zentren in einem Kryostaten.

Als besonders kritischer Parameter wurde die Einkopplung der Emission der V2 Defekte in das Fasernetzwerk identifiziert. Besonders die Einkopplung der Photonen vom Wellenleiter in die Faser ist empfindlich gegen die Schwingung des Kryostaten. Da Wellenleiter und Faser evaneszent gekoppelt werden, führen kleinste mechanische Verschiebungen zu einer drastischen Veränderung der Effizienz der Kopplung. Durch eine Optimierung der Einkopplung und deren Stabilität gelang es der Gruppe eine Einkoppeleffizienz von besser als 80% mit einer Langzeitstabilität von mehreren Tagen zu erreichen.

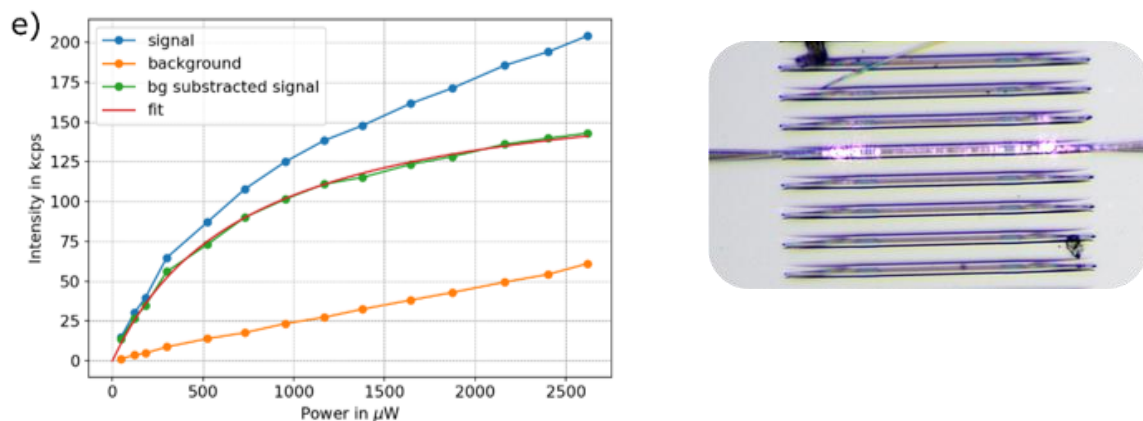


Abb. 7 Nachweis von Photonen eines einzelnen V2 Defekts durch eine an den Wellenleiter gekoppelte Faser. Die um den Hintergrund korrigierte Emissionsrate beträgt das Fünffache der nachgewiesenen Emissionsrate aus einer Volumenprobe. Die rechte Seite zeigt die Fasereinkopplung in dem Fall, dass beide Wellenleiterenden mit einer Faser gekoppelt sind. In diesem Fall werden Photonen unabhängig von deren Emissionsrichtung nachgewiesen.

Zusammenfassung

Das Projekt war in insgesamt fünf Meilenstein gegliedert, die den oben beschriebenen Arbeitspaketen zugeordnet waren. Meilenstein 1 (M1) betraf die Demonstration einer

direkten Faserkopplung von VSi-Zentren. Dieser Meilenstein wurde erreicht und die Ergebnisse sind veröffentlicht [Krumrein et al. ACS Photonics, 11, 2160 (2024)]. Der Meilenstein 2 betraf die Verfügbarkeit von stickstoffarmen a-plane Proben mit 1% Kernspingehalt. Die Proben konnten im ersten Projektjahr von einem Kooperationspartner zur Verfügung gestellt werden. Meilenstein 3 betraf die kohärente Kontrolle von drei Kernspins. Der Meilenstein wurde, wie im Bericht beschrieben, erreicht. Die Ergebnisse sind veröffentlicht worden [Hesselmeier et al. Phys. Rev. Lett. 132, 090601 (2024) und Hesselmeier et al. Phys. Rev. Lett. 132, 180804 (2024)]. Meilenstein 4 betraf die Synchronisation des Quantenlinks, d.h. die Synchronisation der Photodetektoren mit der Anregungsquelle für die VSi Farbzentren, sowie die Dunkelschaltung der Faser, d.h. der Sperrung der Faser für andere Nutzer. Dies konnte in Stuttgart realisiert werden. Der Abschließende Meilenstein war die Demonstration des Quantennetzwerkknotens im Feldversuch. Dazu wurde der in Abb. 6 des Berichts dargestellte Quantennetzwerkknoten, mit dem in Abb. 5 gezeigten Wellenlängenkonverter kombiniert und an das Stuttgarter Fasernetzwerk angeschlossen. Die emittierten Photonen des VSi konnten nachgewiesen werden.

Das Projekt hat alle Meilensteine erreicht. Die Ergebnisse sind in drei Publikationen veröffentlicht worden. Eine Veröffentlichung zur Einbindung des Quantennetzwerkknotens in das Fasernetzwerk ist in Vorbereitung.