

Abschlussbericht SPINNING

Zuwendungsempfänger: Universität Konstanz, Prof. Dr. G. Burkard	Förderkennzeichen: 13N16212
Vorhabensbezeichnung: Verbundprojekt: Diamond spin-photon-based quantum computer (SPINNING) Teilprojekt: Erforschung und Optimierung von Protokollen zum Verschränkungsaufbau und Simulation von nicht-lokalen Quantengattern	
Laufzeit des Vorhabens: 01.01.2022 – 31.12.2024 (kostenneutral verlängert bis 30.06.2025)	
Berichtszeitraum: 01.01.2022 – 31.12.2024 (kostenneutral verlängert bis 30.06.2025)	

1. Aufgabenstellung

Die Aufgabenstellung des Projekts enthält die folgenden sechs Teile.

1.1 Erweiterung der photonischen Architektur auf C-13 (UK1)

Das Verschränkungsverfahren zwischen Stickstoff-Kernspins in verschiedenen Knoten [Nemoto14] wird auf benachbarte ^{13}C -Kernspins als Quantenspeicher erweitert. Dabei wird die ortsabhängige Hyperfeinwechselwirkung zwischen Elektronen- und ^{13}C -Kernspin berücksichtigt. Der Stickstoffkernspin (meist ^{14}N , teils ^{15}N) bleibt im NV-Zentrum vorhanden und ist über Hyperfein- und Dipol-Dipol-Wechselwirkungen in das Protokoll eingebunden. Bei Gruppe-IV-Farbzentren kann meist von kernspinfreien Defekten ausgegangen werden.

1.2 Schwache Kopplung (UK2)

Zur Durchführung des Verschränkungsverfahrens bei schwacher Kopplung ($C \lesssim 1$) wird eine Variante mit stark asymmetrischem Resonator entwickelt [Nemoto14]. Zudem werden abgeschwächte Laserpulse statt Einzelphotonenquellen sowie deren Einfluss auf Erfolgswahrscheinlichkeit und Verschränkungsgüte theoretisch untersucht. Grundlage ist das erweiterte Modell aus [Nemoto14].

1.3 Gruppe-IV-Farbzentren (UK3)

Zur Integration in photonische Strukturen werden die optisch angeregten Zustände der Defekte mittels gruppentheoretischer Methoden und vorhandener ab-initio-Rechnungen (z.B. für SiV) analysiert. Darauf aufbauend werden Protokolle zur optischen und mikrowellenbasierten Kontrolle von Elektronen- und Kernspins sowie deren Kopplung innerhalb eines Knotens entwickelt und das Verschränkungsprotokoll angepasst.

1.4 Erzeugung massiv verschränkter Zustände (UK4)

Mit fünf bis zehn adressierbaren ^{13}C -Kernspins pro Knoten sollen Möglichkeiten zur Erzeugung stärkerer Verschränkung zwischen zwei Knoten untersucht werden. Neben der parallelen Erzeugung mehrerer Bell-Paare wird die direkte Erzeugung von Multi-Qubit-Verschränkung betrachtet, um die Fidelity nicht-lokaler Gatter zu erhöhen.

1.5 Optimierung der Güte (UK5)

Die Abhängigkeit der Fidelity verschränkter Zustände von Netzwerk- und Knotenparametern (z.B. Kooperativität, Detektoreffizienz, Kohärenzzeiten) wird theoretisch analysiert. Ziel ist die Optimierung des Demonstrators sowie die Weiterentwicklung des Protokolls unter realistischen experimentellen Randbedingungen, ggf. unter Nutzung gereinigter massiv verschränkter Zustände.

1.6 Nicht-lokale Quantengatter (UK6)

Es werden Konzepte zur Realisierung nicht-lokaler Quantengatter zwischen verschiedenen Knoten untersucht, insbesondere CNOT- und CZ-Gatter. Zunächst wird ein auf Bell-Paaren basierendes CNOT-Protokoll modelliert [Li16], anschließend werden Verbesserungen unter Einbeziehung massiv verschränkter Zustände zur Steigerung der Gatterfidelität entwickelt.

2. Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Am Lehrstuhl *Kondensierte Materie und Quanteninformation* an der Universität Konstanz arbeiteten zu Beginn des Projekts bereits zwei Mitarbeiter (Benedikt Tissot und Vladyslav Shkolnykov) an Forschungsprojekten im Umfeld dieses Projekts. Vorarbeiten zur Kontrolle von Spin-Qubits in Diamant und Siliziumkarbid, sowie zu Dekohärenz in diesen Systemen, waren bereits vorhanden.

3. Planung und Ablauf des Vorhabens

Nach anfänglichen Verzögerungen bei der Einstellung einer geeigneten Person als wissenschaftliche(r) Mitarbeiter(in) wurde ab Januar 2023 Dr. Wolf-Rüdiger Hannes mit diesem Projekt betreut. Unterstützt wurde er zudem von Benedikt Tissot (April 2023 bis Juni 2024) und von Dr. Regina Finsterhölzl (April-Dezember 2024). Die anfängliche Verzögerung konnte so rasch aufgeholt werden. Später kamen Dr. Yaser Hajati und Yetkin Pulcu (beide Januar bis Juni 2025) unterstützend dazu.

4. Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde

Wir haben uns bei Projektstart auf die folgenden eigenen Vorarbeiten und darin verwendete Methodik gestützt:

[V1] G. Burkard, D. Loss, and D. P. DiVincenzo, [Coupled quantum dots as quantum gates](#), Phys. Rev. B **59**, 2070 (1999)

[V2] G. Burkard, D. Loss, D. P. DiVincenzo, and J. A. Smolin, [Physical optimization of quantum error correction circuits](#), Phys. Rev. B **60**, 11404 (1999)

[V3] R. Hanson and G. Burkard, [Universal set of quantum gates for double-dot spin qubits with fixed interdot coupling](#), Phys. Rev. Lett. **98**, 050502 (2007)

[V4] M. Russ, D. M. Zajac, A. J. Sigillito, F. Borjans, J. M. Taylor, J. R. Petta, and G. Burkard, [High-fidelity quantum gates in Si/SiGe double quantum dots](#), Phys. Rev. B **97**, 085421 (2018)

[V5] D. M. Zajac, A. J. Sigillito, M. Russ, F. Borjans, J. M. Taylor, G. Burkard, and J. R. Petta, [Resonantly driven CNOT gate for electron spins](#), Science **359**, 439 (2018)

[V6] J. Cayao, M. Benito, and G. Burkard, [Programmable two-qubit gates in capacitively coupled flopping-mode spin qubits](#), Phys. Rev. B **101**, 195438 (2020)

[V7] M. Benito, X. Mi, J. M. Taylor, J. R. Petta, and G. Burkard, [Input-output theory for spin-photon coupling in Si double quantum dots](#), Phys. Rev. B **96**, 235434 (2017)

[V8] X. Mi, M. Benito, S. Putz, D. M. Zajac, J. M. Taylor, G. Burkard, and J. R. Petta [A Coherent Spin-Photon Interface in Silicon](#), Nature **555**, 599 (2018)

[V9] M. Benito, J. R. Petta, and G. Burkard, [Optimized cavity-mediated dispersive two-qubit gates between spin qubits](#), Phys. Rev. B **100**, 081412(R) (2019)

[V10] G. Burkard, M. J. Gullans, X. Mi, and J. R. Petta, [Superconductor-semiconductor hybrid cavity quantum electrodynamics](#), Nature Rev. Phys. **2**, 129 (2020)

- [V11] H. Ribeiro, G. Burkard, J. R. Petta, H. Lu, and A. C. Gossard, [Coherent Adiabatic Spin Control in the Presence of Charge Noise Using Tailored Pulses](#), Phys. Rev. Lett. **110**, 086804 (2013)
- [V12] M. Russ, F. Ginzler, and G. Burkard, [Coupling of three-spin qubits to their electric environment](#), Phys. Rev. B **94**, 165411 (2016)
- [V13] C. G. Péterfalvi and G. Burkard, [Hyperfine-induced dephasing in three-electron spin qubits](#), Phys. Rev. B **96**, 245412 (2017)
- [V14] M. Benito, X. Croot, C. Adelsberger, S. Putz, X. Mi, J. R. Petta, and G. Burkard, [Electric-field control and noise protection of the flopping-mode spin qubit](#), Phys. Rev. B **100**, 125430 (2019)
- [V15] F. Hilser and G. Burkard, [All-optical control of the spin state in the NV-center in diamond](#), Phys. Rev. B **86**, 125204 (2012)
- [V16] C. G. Yale, B. B. Buckley, D. J. Christle, G. Burkard, F. J. Heremans, L. C. Bassett, and D. D. Awschalom, [All-optical control of a solid-state spin using coherent dark states](#), Proceedings of the National Academy of Sciences **110**, 7595 (2013).
- [V17] C. G. Yale, J. F. Heremans, B. B. Zhou, A. Auer, G. Burkard, and D. D. Awschalom, [Optical manipulation of the Berry phase in a solid-state spin qubit](#), Nature Photonics **10**, 184 (2016)
- [V18] B.B. Zhou, P.C. Jerger, V.O. Shkolnikov, J.F. Heremans, G. Burkard, and D.D. Awschalom, [Holonomic Quantum Control by Coherent Optical Excitation in Diamond](#), Phys. Rev. Lett. **119**, 140503 (2017)
- [V19] L. C. Bassett, J. F. Heremans, D. J. Christle, C. G. Yale, G. Burkard, B. B. Buckley, and D. D. Awschalom, [Ultrafast optical control of orbital and spin dynamics in a solid-state defect](#), Science **345**, 1333 (2014)
- [V20] V.O. Shkolnikov, R. Mauch, and G. Burkard, [All-microwave holonomic control of an electron-nuclear two-qubit register in diamond](#), Phys. Rev. B **101**, 155306 (2020)
- [V21] A. Auer and G. Burkard, [Long-range photon-mediated gate scheme between nuclear spin qubits in diamond](#), Physical Review B **93**, 035402 (2016)
- [V22] G. Burkard, V.O. Shkolnikov, and D. D. Awschalom, [Designing a cavity-mediated quantum CPHASE gate between NV spin qubits in diamond](#), Phys. Rev. B **95**, 205420 (2017)
- [V23] A. Auer and G. Burkard, [Entanglement purification with the exchange interaction](#), Phys. Rev. A **90**, 022320 (2014)
- [V24] A. Auer, R. Schwonnek, C. Schoder, L. Dammeier, R. F. Werner, and G. Burkard, [Entanglement distillation using the exchange interaction](#), Applied Physics B **122**, 51 (2016)
- [V25] C. Mühlherr, V. O. Shkolnikov, and G. Burkard, [Magnetic resonance in defect spins mediated by spin waves](#), Phys. Rev. B **99**, 195413 (2019)
- [V26] P. Udvarhelyi, V. O. Shkolnikov, A. Gali, G. Burkard, and A. Pályi, [Spin-strain interaction in nitrogen-vacancy centers in diamond](#), Phys. Rev. B **98**, 075201 (2018)
- [V27] B. Tissot and G. Burkard, [Spin structure and resonant driving of spin-1/2 defects in SiC](#), Phys. Rev. B **103**, 064106 (2021)
- [V28] B. Tissot and G. Burkard, [Hyperfine Structure of Transition Metal Defects in SiC](#), Phys. Rev. B **104**, 064102 (2021)

Außerdem haben wir u.a. folgende Fachliteratur verwendet (weitere verwendete Literatur s. Referenzen in eigenen Publikationen aus u. s. Publikationsliste):

- [Awschalom18] D. D. Awschalom, R. Hanson, J. Wrachtrup, and B. B. Zhou, *Quantum Technologies with Optically Interfaced Solid-State Spins*, *Nature Phot.* **12**, 516 (2018)
- [Childress06] L. Childress *et al.*, *Coherent Dynamics of Coupled Electron and Nuclear Spin Qubits in Diamond*, *Science* **314**, 281 (2006)
- [Doherty11] M. W. Doherty, N. B. Manson, P. Delaney, and L. C. L. Hollenberg, *The negatively charged nitrogen-vacancy centre in diamond: the electronic solution*, *New J. Phys.* **13**, 025019 (2011)
- [Doherty13] M. W. Doherty, N. B. Manson, P. Delaney, F. Jelezko, J. Wrachtrup, and L. C. L. Hollenberg, *The Nitrogen-Vacancy Colour Centre in Diamond*, *Phys. Reports* **528**, 1 (2013)
- [Dutt07] M. V. G. Dutt *et al.*, *Quantum register based on individual electronic and nuclear spin qubits in diamond*, *Science* **316**, 1312 (2007)
- [Englund10] D. Englund *et al.*, *Deterministic Coupling of a Single Nitrogen Vacancy Center to a Photonic Crystal Cavity*, *Nano Lett.* **10**, 3922 (2010)
- [Gali13] A. Gali and J. R. Maze, *Ab initio study of the split silicon-vacancy defect in diamond: Electronic structure and related properties*, *Phys. Rev. B* **88**, 235205 (2013)
- [Hanks20] M. Hanks, W. J. Munro, and K. Nemoto, *Optical manipulation of the negative silicon-vacancy center in diamond*, *Phys. Rev. A* **102**, 022616 (2020)
- [Li16] Y. Li and S. C. Benjamin, *Hierarchical surface code for network quantum computing with modules of arbitrary size*, *Phys. Rev. A* **94**, 042303 (2016)
- [Maze11] J. Maze *et al.*, *Properties of nitrogen-vacancy centers in diamond: the group theoretic approach*, *New J. Phys.* **13**, 025025 (2011)
- [Nemoto14] K. Nemoto *et al.*, *Photonic Architecture for Scalable Quantum Information Processing in Diamond*, *Phys Rev X* **4**, 031022 (2014)
- [Neu11] E. Neu *et al.*, *Single Photon Emission from Silicon-Vacancy Colour Centres in Chemical Vapour Deposition Nano-Diamonds on Iridium*, *New J. Phys.* **13**, 025012 (2011)
- [Pingault14] B. Pingault *et al.*, *All-Optical Formation of Coherent Dark States of Silicon-Vacancy Spins in Diamond*, *Phys. Rev. Lett.* **113**, 263601 (2014)
- [Rogers14] L. J. Rogers *et al.*, *All-Optical Initialization, Readout, and Coherent Preparation of Single Silicon-Vacancy Spins in Diamond*, *Phys. Rev. Lett.* **113**, 263602 (2014)
- [Sipahigil16] A. Sipahigil *et al.*, *An integrated diamond nanophotonics platform for quantum-optical networks*, *Science* **354**, 847 (2016)
- [Smeltzer11] B. Smeltzer, L. Childress, and A. Gali, *¹³C hyperfine interactions in the nitrogen-vacancy centre in diamond*, *New J. Phys.* **13**, 025021 (2011)
- [Sukachev17] D. D. Sukachev *et al.*, *Silicon-Vacancy Spin Qubit in Diamond: A Quantum Memory Exceeding 10 ms with Single-Shot State Readout*, *Phys. Rev. Lett.* **119**, 223602 (2017)

- [Taminiau12] T. H. Taminiau *et al.*, *Detection and Control of Individual Nuclear Spins Using a Weakly Coupled Electron Spin*, Phys. Rev. Lett. **109**, 137602 (2012)
- [Togan10] E. Togan *et al.*, *Quantum entanglement between an optical photon and a solid-state spin qubit*, Nature **466**, 730 (2010)
- [Wan20] N. H. Wan *et al.*, *Large-scale integration of artificial atoms in hybrid photonic circuits*, Nature **583**, 226 (2020)
- [Wrachtrup06] J. Wrachtrup and F. Jelezko, *Processing Quantum Information in Diamond*, J. Phys. Condens. Matter **18**, S807 (2006)
- [Zhao12] N. Zhao *et al.*, *Sensing single remote nuclear spins*, Nature Nanotechnol. **7**, 657 (2012)

5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Folgende Zusammenarbeiten mit anderen Stellen haben stattgefunden:

- Mit der Gruppe von Prof. A. Gali (Hungarian Academy of Sciences / Wigner Research Centre for Physics / BME Budapest), zur Übergangsmetalldefekten in verspanntem Siliziumkarbid [2].
- Mit der Gruppe von Prof. F. Marquardt (FAU Erlangen / MPL Erlangen), zu Reservoir-Engineering [3].
- Mit der Gruppe von Prof. J. Wrachtrup (U. Stuttgart), zur effizienten Kernspin-Photon Verschränkung [Javadzade *et al.*, Phys. Rev. Applied 24, 024059 (2025).]
- Mit der Gruppe von Prof. D. D. Awschalom (University of Chicago), zur Spinrelaxation in Vanadiumdefekten in Siliziumkarbid [5].

6. Erzieltes Ergebnis

Die in Konstanz erzielten theoretischen Ergebnisse gliedern sich in die in Abschnitt 1 definierten Bereiche.

6.1 Erweiterung der photonischen Architektur auf C-13 (UK1)

Das von [Nemoto14] vorgeschlagene Protokoll verwendet den intrinsischen Stickstoffkernspin des NV-Zentrums als Speicherqubit und ermöglicht langlebige Verschränkungsverbindungen zwischen entfernten Knoten, die für messungsbasierte Quantenberechnung erforderlich sind. Die Leistungsfähigkeit hängt dabei direkt von der Genauigkeit der erzeugten Clusterzustände ab. Eine Möglichkeit zur Verbesserung ist die Verschränkungsreinigung, die prinzipiell auch mit einem einzelnen Kernspin pro Knoten realisierbar ist, da Elektronenspins wiederholt verschränkt werden können. Dies wurde experimentell gezeigt [Kalb *et al.*, Science **356**, 928 (2017)]. Nichtlokale Gatter sind für den Nemoto-Ansatz nicht zwingend erforderlich; im Fokus steht hier die Genauigkeit der erzeugten Verschränkungszustände, die auch für weiterführende Fehlerkorrektur relevant sein können.

Die zentrale Herausforderung bei der Nutzung natürlicher C-13-Kernspins liegt in ihrer selektiven Adressierung ohne Beeinflussung anderer Spins. Etablierte Kontrollverfahren erfordern dynamische Entkopplung durch wiederholtes Umschalten des Elektronenspins. Die bisher erreichten Kontrollgenauigkeiten schwach gekoppelter ¹³C-Spins sind jedoch begrenzt und eine Integration in skalierbare photonische Architekturen wurde bislang nicht demonstriert. Dennoch haben wir das DDrf-Verfahren [Bradley *et al.*, Phys. Rev. X **9**, 031045 (2019)] gewählt, um die Erzeugung mehrerer Verschränkungsverbindungen zu modellieren. Es erlaubt dekohärenzgeschützte Elektron-Kern-Gatter durch verschachtelte Mikrowellen- und Radiofrequenz-Pulse und ist unter gängigen Näherungen gut theoretisch beschreibbar.

Photonendetektor zur angekündigten Verschränkungserzeugung detektiert. (b) Alternatives System mit Vorwärtsausbreitung und zwei Strahlteilern sowie Detektion an den unteren und oberen Ports.

6.3 Gruppe-IV Farbzentren (UK3)

Den in 6.2 beschriebenen Ansatz haben wir sowohl auf Stickstoff-Leerstellen- (NV) als auch auf Silizium-Leerstellen-Defekte (SiV) als Vertreter der Gruppe-IV Defekte in Diamant angewendet, die mit dem Meilenstein M2.4 (PM24) in Zusammenhang stehen. Die Ergebnisse dieser Untersuchung sind ebenfalls in [6] publiziert und in Abbildung 3 dargestellt. Weitere (unveröffentlichte) Untersuchungen umfassen die Optimierung von Parametern sowie die Kodierung und Details von Verschränkungserzeugungsprotokollen für weitere Gruppe-IV Defekte. Ein für Gruppe-IV Defekte besonders geeignetes Verfahren zur Anreicherung der lokalen Verschränkung wurde neu entwickelt [8], s. auch Abschnitt 6.4.

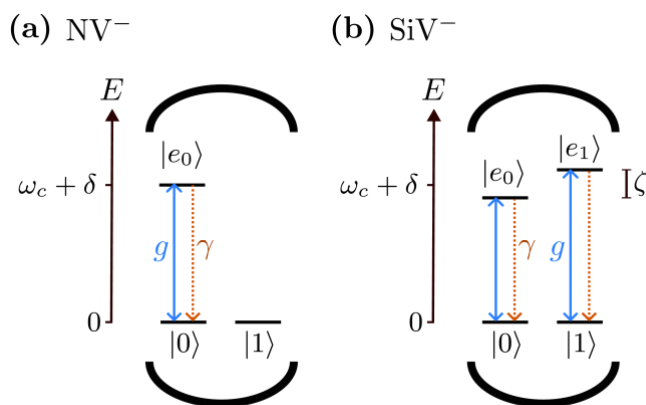


Abb. 3: Vergleich der Niveaustuktur zur Modellierung des NV-Zentrums (a) und des Silizium-Fehlstellen- (SiV) Zentrums (b) in Diamant als Cavity-System zur Implementierung des Verschränkungsprotokolls [6]. (a) Das NV-Zentrum wird als System mit den Niveaus 0, 1 und e_0 modelliert, wobei der Übergang von 0 nach e_0 mit der Stärke g an den Hohlraum koppelt. (b) Das SiV-Zentrum wird als Vier-Niveau-System mit den Niveaus 0, 1, e_0 und e_1 modelliert, wobei der Hohlraum an die Übergänge von 0 nach e_0 und von 1 nach e_1 koppelt. Der Hohlraum hat die Frequenz ω_c , und die beiden angeregten Zustände sind durch eine Energiedifferenz ζ aufgespalten.

ζ aufgespalten.

6.4 Protokoll zur Erzeugung massiv verschränkter Zustände (UK4)

Zur Erzeugung massiv verschränkter Zustände schlagen wir ein Schema zur Anreicherung von Verschränkung zwischen langlebigen Qudits vor, die durch zentrale Kernspins von Defektzentren bereitgestellt werden [8], s. Abbildung 4. Dazu werden Kernspins mit Kernspinquantenzahl größer $I=1/2$ verwendet, z.B. ^{14}N im NV-Zentrum in Diamant mit $I=1$, ^{73}Ge im GeV Zentrum in Diamant mit $I=9/2$, oder Vanadium ^{51}V in SiC mit $I=7/2$. In einem allgemeinen Szenario fungiert der Elektronenspin jedes Knotens als Kommunikationsqubit und kann mit anderen Knoten verschränkt werden, beispielsweise über eine Spin-Photon-Schnittstelle. Wir haben gezeigt, dass die allgemein verfügbare Ising-Komponente der Hyperfeinwechselwirkung die wiederholte Übertragung von Verschränkung auf Speicherqudits beliebiger Dimension $d \leq 2I + 1$ ermöglicht. Wenn d eine Zweierpotenz ist, kann maximale Verschränkung deterministisch und ohne intermittierende Anregung der Kernspins erzeugt werden.

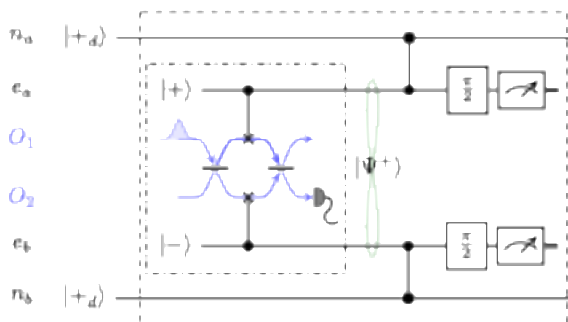


Abb. 4. Schema zur iterativen Verschränkung zweier hochdimensionaler Speicherqudits n_a und n_b [8]. Der strichpunktierte Kasten enthält den photonischen Aufbau mit optischen Armen O1 und O2 zur Verschränkung entfernter Elektronenspinqubits e_a und e_b , wodurch der Bell-Zustand $|\Psi^+\rangle$ erzeugt wird. Der gestrichelte Kasten entspricht einer Iteration des Verschränkungstransfers. Die $\pi/2$ -Gatter sind $Y^{1/2}$ -Drehungen.

6.5 Optimierung der Güte (UK5)

Zur Optimierung der Güte (Fidelity) haben wir eine Theorie zur Formung der verwendeten photonischen Qubit-Pulse entwickelt [1]. Dieses Ergebnis war im Hinblick auf Meilenstein M3.4 (PM36) von hoher Relevanz. Es stellt eine allgemeine Untersuchung des Zustandstrfers zwischen einem stationären und einem fliegenden Qubit mittels kavitätsverstärkter stimulierter Raman-Emission dar (siehe Abb. 5). Basierend auf unserer Analyse finden wir eine Grenze, die die Fidelity des Zustandstrfers in Abhängigkeit von den Systemparametern und der Pulsform begrenzt. In dieser Arbeit wurden beispielhaft Parameter verwendet, die Silizium-Leerstellen in Diamant beschreiben; daher besteht auch ein Bezug zu Meilenstein M2.4 (PM24). Wir zeigen, dass die Grenze als Optimierungsproblem für die Photonenform formuliert werden kann, sodass die Fidelity optimiert werden kann. Protokolle zur Erzeugung von Spin-Photon-Verschränkung zwischen einem Kernspin und einem Photon mittels eines elektronischen Raman-Emitters werden vorgestellt. Der Ansatz kann verwendet werden, um den Kernspin mit einer Fock-Zustandskodierung des fliegenden Qubits zu verschränken. Erweiterungen zur Qubit-Emission in Zeitfenstern und zur Verschränkungserzeugung werden eingeführt. Das grundlegende Prinzip des Protokolls ist in Abb. 2 dargestellt. Dieser Ansatz ermöglicht die Nutzung des optimierten Zustandstrfers zur Erzeugung von Verschränkung und ist auf eine Vielzahl von Systemen anwendbar, darunter verschiedene Farbzentren in Halbleitern. Das Ergebnis stellt einen vielversprechenden Ansatz für zukünftige Laborimplementierungen dar, mit Anwendungen für Zustandstrfer, Verschränkungserzeugung und (geformte) Einzelphotonenquellen.

Weitere für die Optimierung der Prozess-Fidelity relevante Ergebnisse sind die Abstimmung der Defekteigenschaften über die Verspannung des Kristalls [2] sowie der Verlängerung der Relaxationszeiten der verwendeten Defektspins [5].

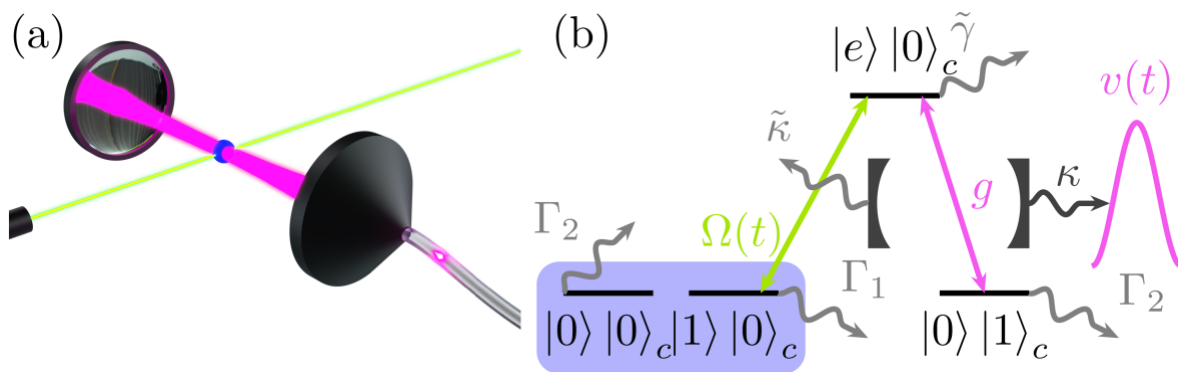


Abb. 5: (a) Resonatorverstärkter stimulierter Raman-Emitter, der einen Photonenpuls in einen Wellenleiter emittiert [1]. (b) Relevante Energieniveaustuktur eines (resonatorverstärkten) stimulierten Raman-Emitters. Hierbei befindet sich ein Materie-Drei-Niveau-System (erste Dirac-Kets), bestehend aus den Qubit-Zuständen 0, 1 und einem angeregten Zustand e, in einem Resonator (zweiter Dirac-Ket), sodass der Resonatorübergang an den Übergang von 0 nach e koppelt. Zusätzlich wird der Übergang von 1 nach e, z. B. durch einen Laser, angeregt. Schließlich ermöglicht eine gerichtete Auskopplung κ des Resonators die gerichtete Emission eines Photonenpulses. Das Materiesystem und der Resonator werden als offenes Quantensystem modelliert, das verschiedene Verluste (graue Pfeile) berücksichtigt.

6.6 Optimierung nicht-lokaler Quantengatter (UK6)

Optimierte *lokale* Quantengatter in einem einzelnen NV-Zentrum in Diamant haben wir in [7] theoretisch untersucht, wobei wir angenommen haben, dass die hyperfeingekoppelten Kernspin-Qubits mit Hochfrequenzimpulsen adressiert werden, die vom Zustand des zentralen Elektronenspins abhängen. Begrenzende Faktoren für die Gattergenauigkeit sind kohärente Fehler aufgrund nicht-resonanter Anregung benachbarter Übergänge im dichten, hyperfeinaufgespaltenen Energiespektrum des Defekts sowie nicht vernachlässigbare senkrechte Hyperfeintensor-Komponenten, die die Auswahl an Kernspin-Qubits einschränken. Wir begegnen diesen Problemen mit Protokollen, die auf Synchronisationseffekten basieren und eine vollständige Unterdrückung beider Fehlerquellen in modernen CNOT-Gatterschemata ermöglichen. Dies gelingt durch eine geeignete Wahl von Parametersätzen, die den Fehler in das Schema integrieren, anstatt ihn zu vermeiden (s. Abbildung

6). Aufbauend auf diese und die in 6.3 und 6.4 gefundenen Ergebnisse haben wir die Realisierung von *nicht-lokalen* Quantengattern und das Extrahieren der in Qudit-Zuständen akkumulierten Verschränkung versucht. Dabei kann eine Quantenteleportation für das ausführen der Gatter verwendet werden. Dafür liegen aber bisher keine definitiven Ergebnisse vor.

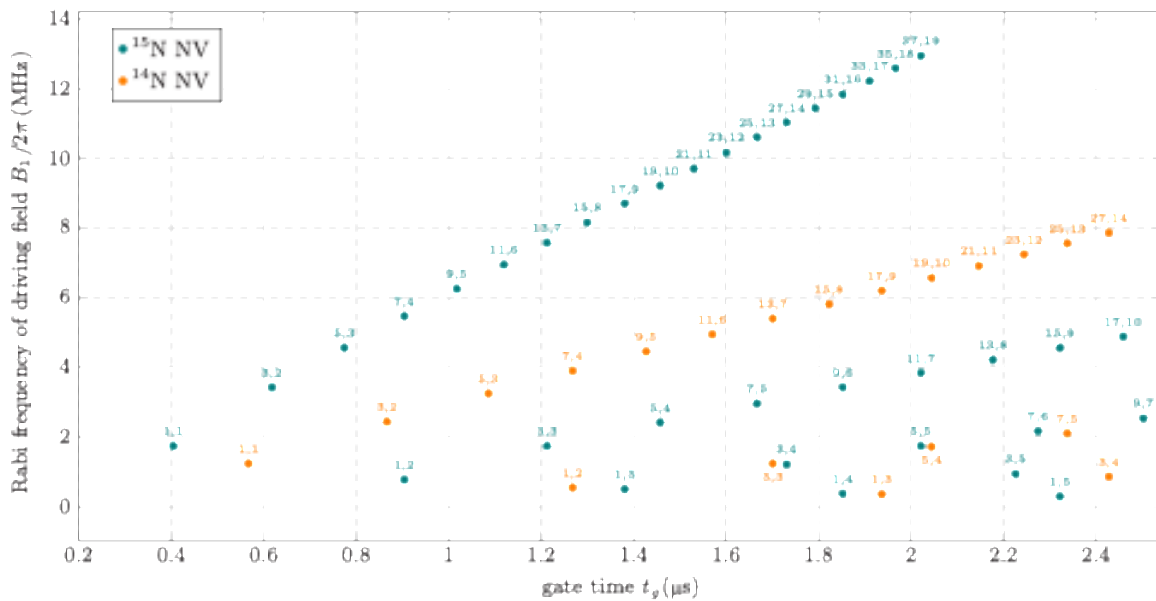


Abb. 6: Anregungsstärke B_1 als Funktion der Gatter-Zeit t_g für verschiedene Werte, bei denen der Gate-Fehler aufgrund der nicht-resonanten Anregung verschwindet und somit die Fidelity theoretisch den Wert 1 erreichen kann. Verschiedenfarbige Punkte entsprechen Kopplungen zwischen dem Elektronenspin des NV-Zentrums und den Kernspins verschiedener Stickstoffisotope. Jeder Punkt ist mit den jeweiligen Werten $2n+1$ und m gemäß Gl. (15) in [7] beschriftet.

7. Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit

Alle Ergebnisse wurden in wissenschaftlichen Zeitschriften veröffentlicht [1-7] oder sind zur Veröffentlichung eingereicht worden [8] (siehe Abschnitt 9) und können wissenschaftlich und anderweitig frei genützt werden.

8. Während der Durchführung des Vorhabens bekannt gewordener Fortschritt auf diesem Gebiet bei anderen Stellen

- L. Orphal-Kobin *et al.*, Phys. Rev. X **13**, 011042 (2023): Abschirmung von NV-Defekten gegenüber elektrischem Rauschen; Verschränkungsprotokoll
- E. Takou, E. Barnes, and S. E. Economou, Phys. Rev. X **13**, 011004 (2023): Kontrolle der Verschränkung in NV-Zentren mit mehreren gekoppelten Kernspins
- S. Lim and A. Ardavan, Phys. Rev. A **112**, 022418 (2025): Quantenfehlerkorrektur mit Qudit-Systemen

9. Erfolgte oder geplante Veröffentlichung des Ergebnisses

- [1] B. Tissot and G. Burkard, Phys. Rev. Res. **6**, 013150 (2024).
- [2] B. Tissot, P. Udvarhelyi, A. Gali, and G. Burkard, Phys. Rev. B **109**, 54111 (2024).
- [3] B. Tissot, H. Ribeiro, and F. Marquardt, Phys. Rev. Research **6**, 023015 (2024).
- [4] W.-R. Hannes, R. Finsterhoelzl, and G. Burkard, Phys. Rev. A **110**, 052436 (2024).
- [5] J. Ahn, C. Wicker, N. Bitner, M. T. Solomon, B. Tissot, G. Burkard, A. M. Dibos, J. Zhang, F. J. Heremans, and D. D. Awschalom, Phys. Rev. Applied **22**, 044078 (2024).
- [6] F. Omlor, B. Tissot, and G. Burkard, Phys. Rev. A **111**, 012612 (2025).
- [7] R. Finsterhoelzl and G. Burkard, Appl. Phys. Lett. **127**, 074002 (2025).
- [8] W.-R. Hannes and G. Burkard, eingereicht bei PRX Quantum, preprint <https://arxiv.org/abs/2601.189766> (2026).

Datum: 10.02.2026

TP-Leiter: Prof. Dr. Guido Burkard