Abschlussbericht – Teil I Kurzbericht

Zuwendungsempfänger: Prof. Wolfgang Wernsdorfer	Förderkennzeichen: 16KISQ004
Vorhabensbezeichnung: Quantenrepeater.Link - QR.X - mit dem Vorhaben TP-KIT Photonische und kryogene Repeaterknoten Hardware Wer: Entwicklung designierter Kryostate	
Laufzeit des Vorhabens: 01.08.2021 bis 31.12.2024	
Berichtszeitraum: 01.08.2021 bis 31.12.2024	

Der Abschluss-Kurzbericht betrifft **AP V Entwicklung modularisierter Komponenten,** Teilarbeitspaket **KIT_Wer_AP V-2** und **KIT_Wer_AP V-4**. Hier wurde zuerst ein feldtaugliche, modulare, kompakte, automatisierte und einfach bedienbare kryogene 4K-Umgebung für den QR-D entwickelt. Im zweiten Schritt wurde auch ein 1K und 100 mK Modul entwickelt. Ferner war geplant den kompakter mK Kryostate mit Optik, Radio-Frequenz (RF) Zuleitungen und 3-Achsen Vektormagnetfeldspulen auszustatten, um SiV und NV Quantenemitterauslesen zu können. Die Messungen sind im Abschlussbericht **KIT_Hunger** dargestellt. Die Teilarbeitspakete **KIT_Wer_AP V-2 und KIT_Wer_AP V-2** wurden wie geplant bearbeitet. Es gabt einen leichten Verzug bezüglich der Lieferung nach Stuttgart und Ulm, da Randbedingungen der Installation sich geändert haben. Aber die Installierung wurde im Sommer 2023 erfolgreich geschlossen.

Die Entwicklungen sind für die KIT Spin-off Firma **Qinu** direkt relevant und wird dort wirtschaftlich verwertet. Qinu hat durch den engen Kontakt mit QRX an den Entwicklungen teilgenommen und wird neue Produkte auf dem Markt bringen, welche die Ergebnisse dieses Teilprojekts verwerten kann.

Im Folgendem werden die wesentlichen Entwicklungen der Teilarbeitspakete kurz beschrieben, die insbesondere für Quantentechnologien aber auch für Grundlagenforschung großes Potenzial darstellen.

KIT_Wer_AP V-2.1: Externe Kühlmaschine für den feldtauglichen NV-Knoten

- **Kühlsystem:** Eine Gifford-McMahon (GM) Kühler wurde ausgewählt, um eine hohe Kühlleistung bei niedrigem Stromverbrauch zu gewährleisten. Dies ermöglicht den Betrieb mit einem Standardstecker (220 Volt) ohne Wasserkühlung, was die Feldtauglichkeit unterstützt.
- **Vibrationsminimierung:** Das Kühlsystem wurde auf einer schwingungsdämpfenden Plattform montiert, um die Übertragung von Vibrationen auf die Umgebung zu minimieren.

KIT_Wer_AP V-2.2: He-Verflüssigung über die Kühlmaschine

- **Wärmetauscher:** Es wurden hocheffiziente und skalierbare Gegenstromwärmetauscher entwickelt. Diese ermöglichen es, das Helium-Gas effektiv vorzukühlen, bevor es zur Kühlung der 4 K-Stufe verwendet wird.
- **Kühlleistung:** Der Kühler kann Helium-Gas bei verschiedenen Durchflussraten und Temperaturen abkühlen, einschließlich 30 l/min bei 30 K und 10 l/min bei 4 K.

KIT_Wer_AP V-2.3: Transferlinie zwischen Kühlmaschine und Kryostat

- **Verlustarmer Transport:** Eine spezielle Transferleitung wurde entwickelt, um den verlustarmen Transport von flüssigem Helium zur Cold Plate des Kryostaten zu gewährleisten. Die Leitung minimiert den Wärmeeintrag und sorgt für eine stabile mechanische Verbindung zwischen der vibrierenden Kältemaschine und dem Kryostaten.

KIT_Wer_AP V-2.4: Entwicklung Gas-Handling-System (GHS)

- **Automatisierung:** Nach einem anfänglichen Automatisierungsversuch mit Revolution-Pi wurde ein eigenes System auf Basis von Arduino und Raspberry Pi entwickelt. Dieses ermöglicht die Automatisierung von Kühl- und Aufwärmprozessen sowie die Überwachung von Temperaturen und Drücken.
- **Komponenten:** Das GHS umfasst Ölfreie Pumpen, Ventile, einen Mixturtank und einen Geräteschrank für die Steuereinheiten. Es kann sowohl manuell als auch computergestützt betrieben werden und ist so konzipiert, dass es im Fall eines Stromausfalls sicher bleibt.

KIT_Wer_AP V-2.5: Installierter 4K-Kühlkreislauf

- **Gaskreis:** Der Gaskreis innerhalb des GHS wurde mit Pumpen, Kompressoren, Ventilen und Sicherheitseinrichtungen ausgestattet. Er ermöglicht eine effiziente Kühlung auf 4 K und trägt zur Stabilität des Systems bei.

KIT_Wer_AP V-2.8: Installierte Kühlfallen und Filter

- **Verunreinigungen:** Kühlfallen wurden integriert, um kleine Verunreinigungen im Kryo-Flüssigkeitskreislauf zu filtern. Diese sind mit Sorptionsmaterial ausgestattet, das Gasverunreinigungen einfängt und bei Erwärmung regeneriert werden kann.
- **Wasserstofffilter:** Ein zusätzlicher Filter wurde installiert, um Wasserstoffverunreinigungen zu vermeiden, die zu Verstopfungen führen können.

KIT_Wer_AP V-2.9: Entwicklung des feldtauglichen Kryostaten

- **Modularer Kryostat:** Der Kryostat wurde so konzipiert, dass er sowohl für 1K- als auch 100mK-Module geeignet ist und wird nun für Quantenemitter-Messungen am KIT eingesetzt.

KIT_Wer_AP V-4: Kompakter mK Kryostat

- **Ausstattung:** Der mK Kryostat wurde mit Optik, RF-Zuleitungen und 3-Achsen Vektormagnetfeldspulen ausgestattet, um die Auslesung von SiV und NV Quantenemittern zu ermöglichen.
- **Tests:** Vorabtests wurden durchgeführt, um die Integration von Mikrowellen und Vektorfeldern zu überprüfen. Die Installationen an den Partnerinstitutionen (Universität Stuttgart und Universität Ulm) wurden erfolgreich abgeschlossen.

KIT_Wer_AP V-4.2 bis V-4.5: RF-Verkabelung und supraleitende Magneten

- **RF-Verkabelung:** Für die Durchführung von Quantenoperationen wurde die RF-Verkabelung entwickelt und installiert.
- **Supraleitende Magneten:** Supraleitende 3D Vektormagneten wurden entwickelt, um die erforderlichen Magnetfelder für NV und SiV Quantenemitter bereitzustellen. Diese wurden so konzipiert, dass sie kompakt und effizient sind.

KIT_Wer_AP V-4.5: Integration eines konfokalen Mikroskops

- **Mikroskopinstallation:** Ein kommerzielles konfokales Mikroskop wurde im mK-Kryostat installiert, um präzise Messungen an den Quantenemittern durchzuführen.

Abschlussbericht – Teil II

Zuwendungsempfänger: Prof. Wolfgang Wernsdorfer	Förderkennzeichen: 16KISQ004
Vorhabensbezeichnung: Quantenrepeater.Link - QR.X - mit dem Vorhaben TP-KIT Photonische und kryogene Repeaterknoten Hardware Wer: Entwicklung designierter Kryostate	
Laufzeit des Vorhabens: 01.08.2021 bis 31.12.2024	
Berichtszeitraum: 01.08.2021 bis 31.12.2024	

1. Aufzählung der wichtigsten wissenschaftlich-technischen Ergebnisse und anderer wesentlicher Ereignisse bezüglich AP V Entwicklung modularisierter Komponenten

Der Abschlussbericht betrifft das Teilarbeitspaket **KIT_Wer_AP V-2** und **KIT_Wer_AP V-4**. Hier wurde zuerst ein feldtaugliche, modulare, kompakte, automatisierte und einfach bedienbare kryogene 4K-Umgebung für den QR-D entwickelt. Im zweiten Schritt wurde auch ein 1K und 100 mK Modul entwickelt. Ferner war geplant den kompakter mK Kryostate mit Optik, Radio-Frequenz (RF) Zuleitungen und 3-Achsen Vektormagnetfeldspulen auszustatten, um SiV und NV Quantenemitterauslesen zu können. Die Messungen sind im Abschlussbericht **KIT_Hunger** dargestellt.

Wie geplant haben wir die folgenden Teilaspekte erfolgreich bearbeitet:

KIT_Wer_AP V-2.1 Externe Kühlmaschine für den feldtauglichen NV-Knoten

Zum Kühlen und Kondensieren des He im Kreislauf haben wir uns für eine Gifford-McMahon (GM) Kühler entschieden und bei der Firma Pride Cryogenics bestellt. Wichtig bei der Wahl war eine hohe Kühlleistung mit einem geringen Stromverbrauch und Steckdosen Anschluss (220 Volt). Für die Feldtauglichkeit soll auch keine Wasserkühlung nötig sein. Nach unseren Rechnungen sollte die 4 K cold-plate genügend Kühlleistung zur Verfügung haben. Um die Auswirkung der Schwingungsausbreitung von der Kältemaschine auf die Umgebung zu minimieren, sollte das gesamte System auf einer schwingungsgedämpfte und Schwingungen adsorbierenden Plattform gelagert und montiert werden. Nach Erstellen der technischen Zeichnungen wurde die Kühlmaschine gebaut (siehe **KIT_Wer_AP V-2.2)**.

KIT_Wer_AP V-2.2 He Verflüssigung über die Kühlmaschine

Das aus dem GHS zur Verfügung gestellt He Gas wird über Wärmetauscher an der 1. Und 2. Stufe der Kältemaschine vorgekühlt und schlussendlich zur Kühlung des 4 K Stufe über die Transferline (**KIT_AP V-2.3**) zur Verfügung gestellt. Wir haben hocheffektiven und skalierbaren Gegenstromwärmtauscher entwickelt, die für das Gesamtkonzept der Kühlung perfekt funktionieren. Das zurückfließende Helium Gas des Kryostaten ist kalt genug und kann effektiv zur Vorkühlung des bei Raumtemperatur bereitgestellten Gases verwendet werden. Die Auslegung der Wärmetauscher wurde so konzipiert, dass der Wärmeübertag aus dem Gas zur Mantelfläche des Wärmetauschers angepasst ist und von

dort zur Kühlmaschine transportiert werden kann. Die entwickelte Kühlmaschine kann Helium Gas abkühlen mit den folgenden Temperaturen :

30 l/min Helium Gas mit 30 K und 2 bar
10 l/min Helium Gas mit 4 K und 1 bar
5 l/min Helium Gas mit 3.5 K und 0.5 bar

Das AP ist erfolgreich abgeschlossen. Die Kühlmaschine wurde (**KIT_AP V-2.3**) zur Verfügung gestellt.

KIT_Wer_AP V-2.3 Transferlinie zwischen Kühlmaschine und Kryostat

Eine spezielle Transferleitung zum verlustarmen Transport von LHe zur cold plate wurde entwickelt. Um die Effektivität der Transferline zu maximieren wurde der Wärmeeintrag auf die innere das Kryogen führende Leitung minimiert. Gleichzieht stellt die Leitung die mechanische Verbindung zwischen der stark vibrierenden Kältemaschine und der cold plate des Kryostaten dar. Die Ausführung der Leitung und der Isolation wurde so erfolgt, dass die Spezifikationen bzgl. der Vibration eingehalten werden. Die Minimierung der Vibrationen war das primäre Ziel. Das AP ist erfolgreich abgeschlossen (siehe Abb.).

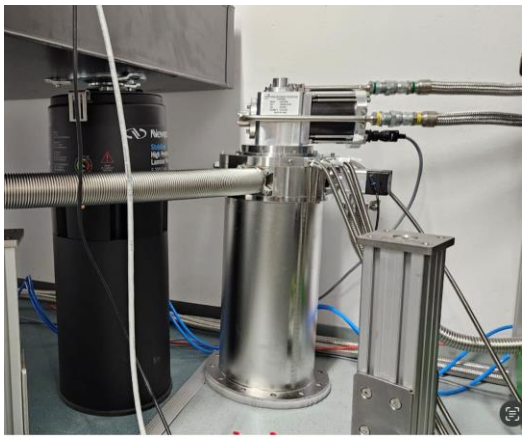

Abb.: Kühlmaschine und Transferlinie

KIT_Wer_AP V-2.4 Entwicklung Gas-Handling-System

Hier haben wir ein Gas-Handling-System (GHS) entwickelt, welches die Überwachung und Steuerung aller Temperaturen, Drücke, und Durchflüsse der kryogenen Gase und Flüssigkeiten übernimmt. Nach einer Automatisierungsentwicklung mit Revolution-Pi, die nicht so zufriedenstellend endete, habe wir uns für eine home-made Lösung entschieden, die auf ein Arduino und ein raspberry pi bassiert. Dieses System kann jetzt vordefinierte automatische Abläufe für das Abkühlen und Aufwärmen sowie Zwischenzustände steuern. Das GHS bestehend aus:

- Öl-freier Pumpenkombination ggf. kombiniert mit einem ebenfalls Öl-freien Kompressor für Kondensation und Zirkulation der Mixtur
- Hauptventil (saugseitig) und nicht-starre Verrohrung zum Anschluss der Pumpenkombination an den 3He/4He-Mischungskryostaten
- alle erforderlichen Steuerventile, pneumatisch oder elektropneumatisch geschaltet
- Mixturtank
- Geräteschrank zur Aufnahme der Komponenten des GHS

Das GHS kann für den manuellen und automatisierten Betrieb benutzt werden. Es hat zwei Gaskreisläufe, die in den folgenden Abbildungen beschrieben sind.

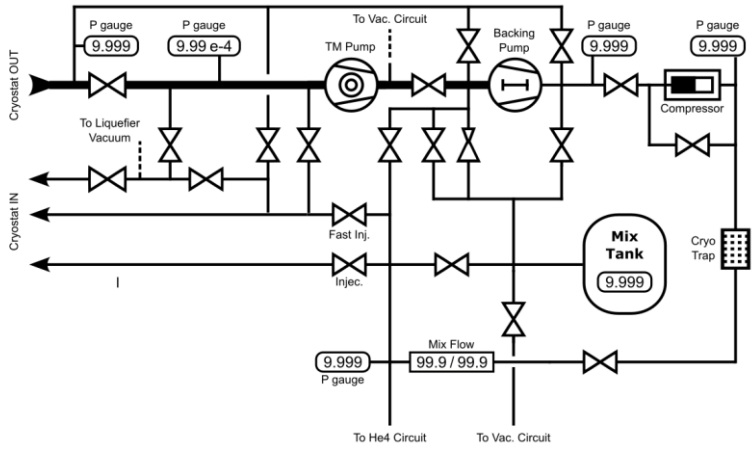

Abb.: He3/He4 Gaskreislauf mit Drucksensoren, Massenflussregeler, Kompressor und Pumpen

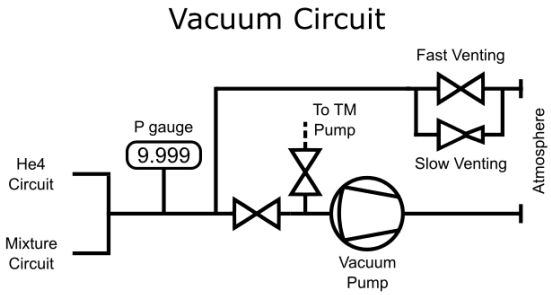

Abb.: Vakuumkreislauf mit Drucksensoren, Massenflussregeler und Pumpen

Neben der manuellen Bedienung kann eine Computerbedienung des GHS über einen Standard-PC (Desktop oder Notebook) erfolgen. Die Software zur Bedienung kann auch eine Visualisierung des Betriebszustands des GHS, ein Datenlogging und die Darstellung von Log-Dateien. Standardprozeduren wie Abkühlen bis 4K, Abkühlen bis mK, Aufwärmen, Vakuum pumpen, Trap säubern etc. wurden programmiert und sind einfach anpassbar an neue Anforderungen. Das GHS und das gesamte System ist so ausgelegt, dass es sich nach einem Stromausfall und/oder einem PC-/Netzwerkausfall in einem sicheren Zustand befindet. Es kann insbesondere gewährleisten, dass das Helium-Gemisch im Falle eines Überdrucks oder plötzlichen Erwärmens des Kryostaten nicht aus der Anlage entweicht. Es sind Vorsichtmaßnahmen zur Verhinderung des Verlustes von He3 Gas vorhanden. Die grafische Benutzeroberfläche der Steuerungssoftware ist als Webanwendung implementiert und kann von jedem Browser auf Computern oder Tablets angezeigt werden. Das AP ist erfolgreich abgeschlossen.

KIT_Wer_AP V-2.5 Installierter 4 K-Kühlkreislauf

Für den 4 K Kühlkreis wurde innerhalb des GHS ein Gaskreis bestehend aus Pumpe, Kompressor, Vorratstank, Ventilen, Reglern, Druckmesszellen sowie Sicherheitseinrichtungen aufgebaut. Der Gaskreislauf ist in der folgenden Abbildung beschrieben. Das AB ist erfolgreich abgeschlossen.

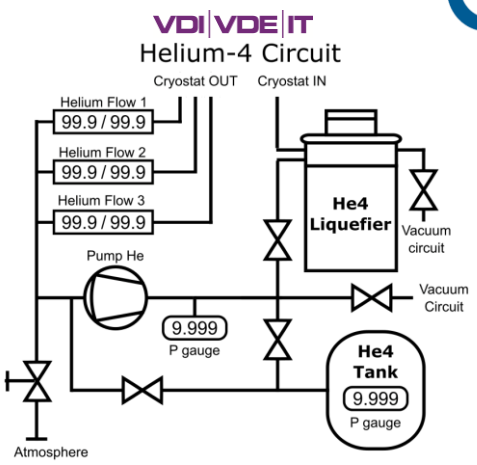

Abb.: He4 Gaskreislauf mit Drucksensoren, Massenflussregeler und Pumpe

KIT_Wer_AP V-2.8 Installierte Kühlfallen und Filter

Kleine Verunreinigungen im Kryo-Flüssigkeitskreislauf können zu Verstopfungen der Kapillaren und Durchflussbegrenzer führen. Sie wurden mit Hilfe einer Kühlfalle gefiltert. Die Kühlfalle ist mit einem Sorptionsmaterial ausgestattet, das die Gasverunreinigungen einfangen kann, wenn es unter eine bestimmte Temperatur abgekühlt wird. Die Kühlfalle gibt bei Erwärmung zur Regeneration der Falle das Gas wieder frei. Eine weitere mögliche Quelle für Verstopfungen ist die Ansammlung von Wasserstoff. Dieser ist oft als Verunreinigung im He-Gas enthalten, kann aber auch von metallischen Oberflächen und Lötstellen freigesetzt werden. Ein zusätzlicher Filter für Wasserstoff wurde ebenfalls in das System integriert. Für die Feldtauglichkeit soll keine flüssiges Stickstoff nötig sein. Deshalb wurde die Kühlfalle in die Kühlmaschine integriert. Das AB ist erfolgreich abgeschlossen. Die Kühlfallen und Filter wurden für **KIT_Wer_AP V-2.9** benutzt.

Abb.: Kühlfalle mit Wärmetauscher

KIT_Wer_AP V-2.9 Entwicklung des feldtauglicher Kryostat

Die Entwicklung des feldtaugliche, modulare, und kompakte Kryostat ist abgeschlossen und wird am KIT für Quantenemitter Messungen eingesetzt. Der Kryostat wurde so ausgelegt, dass er eine Integration des 1K und 100 mK Moduls erlaubte.

KIT_Wer_AP V-4.1 Einrichten eines kompakten mK Kryostate für Quantenemitter Messungen

Hier war geplant den kompakter mK Kryostate mit Optik, Radio-Frequenz (RF) Zuleitungen und 3-Achsen Vektormagnetfeldspulen auszustatten, um SiV und NV Quantenemitterauslesen zu können. Zuerst wurde das Design des Qlibri Systems auf Mikrowelle und Magnetfeld ausgelegt und die verwendeten Kabel & Antennen bestimmt. Dann haben wir die ersten Vorabtests gestartet, um im mK Kryostaten Mikrowelle und Vektorfeld mit den bereits vorhandenen und alternativen Cavityaufbauten kombinieren zu können. Das finale Qlibri-System wurde dann am KIT mit allen Komponenten getestet. Parallel zu diesen Schritten wurden die kompakten mK Kryostate von UST und UUL mit Optik, RF und Vektormagnetfeldspulen ausgestattet. Die Installationen an der UST und UUL sind abgeschlossen (siehe Abbildungen unten). Sie stehen für Studien in der UST und UUL bereit (siehe deren Abschlussberichte). Bezüglich Benutzung und Verbesserungen steht das KIT Team zur Unterstützung auch im Folgenden bereit.

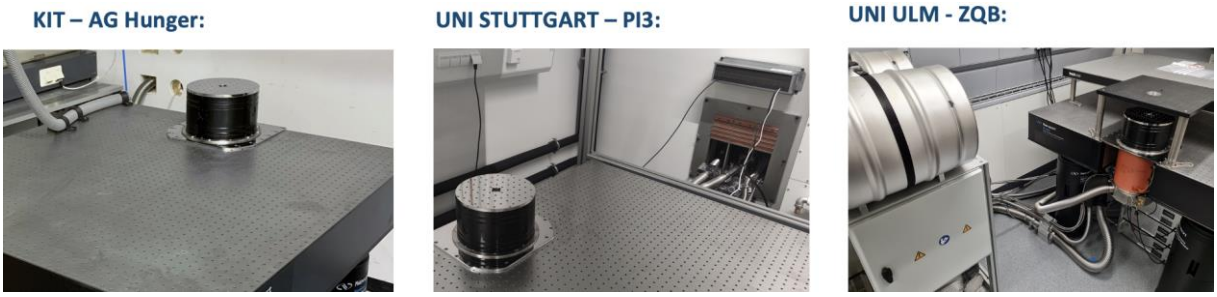

Abb.: Aufbau bei Partner KIT & Uni Stuttgart & UNI Ulm

KIT_Wer_AP V-4.2 RF-Verkabelung des mK Kryostaten

Die RF-Verkabelung für den mK Kryostaten wurde entwickelt und installiert (siehe Abbildungen unten). Die RF-Verkabelung erlaubt die nötigen Quantenoperation an NV und SiV Quantenemittern durchzuführen. Das AP ist erfolgreich abgeschlossen

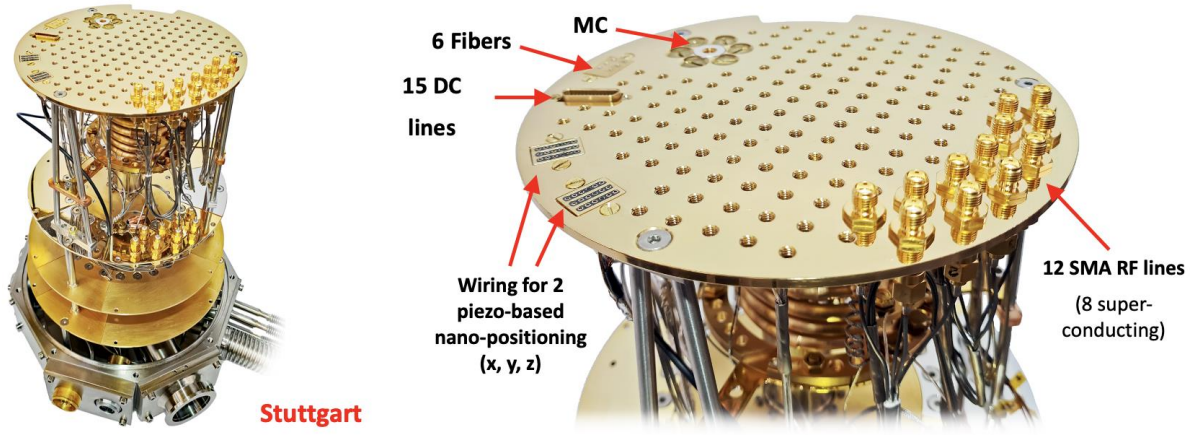

Abb.: Optik, RF- und Vektormagnetfeldspulen-Verkabelung in Uni Stuttgart

KIT_Wer_AP V-4.3 Stromzuführungen für supraleidende 3D Vektormagneten

Die Stromzuführungen für supraleidende 3D Vektormagneten wurden entwickelt und installiert. Dazu wurden Hochtemperatursupraleiter benutzt. Um den die nötige Kühlleistung gering zu halten, wurde optimierte Thermalisierungen entwickelt. Das AP ist erfolgreich abgeschlossen

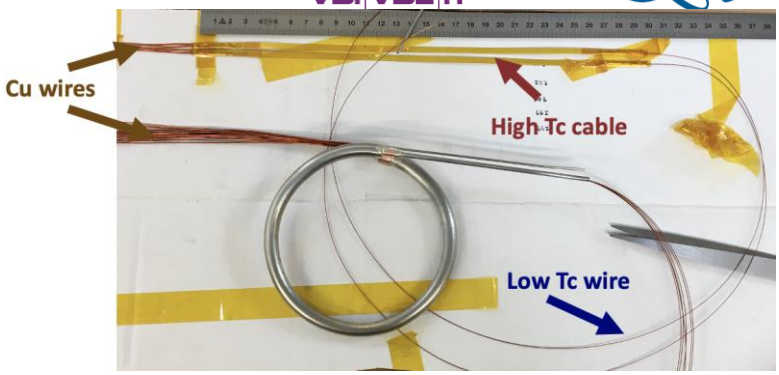

Abb.: Kompakte und aktive He-gekühlte Stromzuführungen für supraleidende 3D Vektormagneten

KIT_Wer_AP V-4.4 Supraleidende 3D Vektormagnete

Die supraleidende 3D Vektormagneten wurde entwickelt und installiert, welche für NV und SiV Quantenemittern benötigt werden. NbTi wurde als Supraleiter benutzt. Es war darauf zu achten, dass der Vektormagnet kompakt, zuverlässig und stromeffizient ist. Das AP ist erfolgreich abgeschlossen.

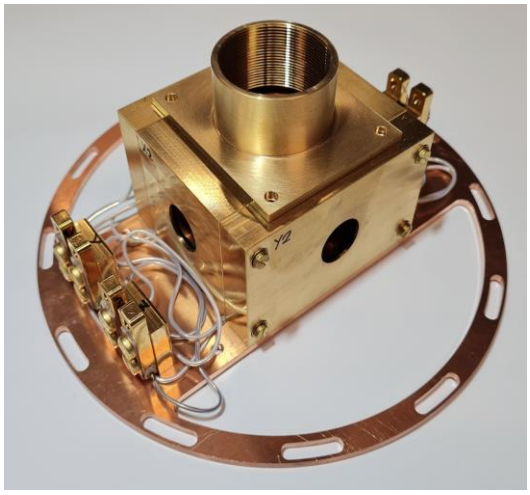

Abb.: Supraleidende 3D Vektormagnete: Bx > 0.5 T, Bx > 0.5 T, Bz > 1 T, für 10 A

KIT_Wer_AP V-4.5 Integration eines konfokalen Mikroskops

Ein kommerzielles konfokales Mikroskop wurde im mK-Kryostat installiert. Es kann für Messungen benutzt werden. Das AP ist erfolgreich abgeschlossen

2. Vergleich des Stands des Vorhabens mit der ursprünglichen (bzw. mit Zustimmung des ZG geänderten) Arbeits-, Zeit- und Kostenplanung“

Die Teilarbeitspakete **KIT_Wer_AP V-2 und KIT_Wer_AP V-2** wurden wie geplant bearbeitet. Es gabt einen leichten Verzug bezüglich der Lieferung nach Stuttgart und Ulm, da Randbedingungen der Installation sich geändert haben. Aber die Installierung wurde im Sommer 2023 erfolgreich geschlossen.

3. Verwertungsplans.

Im Teilprojekt KIT_Wer wurde ein kompakter Entmischungskryostat entwickelt der insbesondere für Quantentechnologien aber auch für Grundlagenforschung großes Potenzial birgt. Die Entwicklung ist für die KIT Spin-off Firma **Qinu** direkt relevant und wird dort wirtschaftlich verwertet. Qinu hat durch den engen Kontakt mit QRX an den Entwicklungen teilgenommen und wird neue Produkte auf dem Markt bringen, welche die Ergebnisse dieses Teilprojekts verwerten kann.

Document Control Sheet

1. ISBN or ISSN	2. type of document (e.g. report, publication) Publication
3. Fabrication of High-Quality Thin Single-Crystal Diamond Membranes with Low Surface Roughness	
4. author(s) (family name, first name(s)) J. Körber, M. Pallmann, J. Heupel, R. Stöhr, E. Vasilenko, T. Hümmer, L. Kohler, C. Popov, D. Hunger	5. end of project 31.12.2024
	6. publication date 20.6.2023
	7. form of publication Paper
8. performing organization(s) (name, address) Institute of Nanostructure Technologies and Analytics; Universität Kassel, Heinrich-Plett-Str 40, 34132 Kassel Physikalisches Institut, KIT, Wolfgang Gaede Str. 1, 76131 Karlsruhe IQMT, KIT, Herrmann von Helmholtz Platz 1, 76344 Eggenstein-Leopoldshafen 3rd Institute of Physics, University of Stuttgart, Pfaffenwaldring 57, 70569 Stuttgart Faculty of Physics, Ludwig-Maximilians-University, Schellingstr. 4, 80799 München	9. originator's report no. 064057
	10. reference no. DOI: 10.1103/PhysRevApplied.19.064057
	11. no. of pages 11
12. sponsoring agency (name, address) Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) 53170 Bonn	13. no. of references 51
	14. no. of tables 0
	15. no. of figures 6
16. supplementary notes	
17. presented at (title, place, date)	
18. abstract Efficient optical interfacing of spin-bearing quantum emitters is a crucial ingredient for quantum networks. A promising route therefore is to incorporate host materials as minimally processed membranes into open-access microcavities: it enables significant emission enhancement and efficient photon collection, minimizes deteriorating influence on the quantum emitter, and allows for full spatial and spectral tunability. Here, we study the properties of a high-finesse fiber Fabry-Perot microcavity with integrated single-crystal diamond membranes by scanning cavity microscopy. We observe the spatially resolvedeffects of the diamond-air interface on the cavity-mode structure: a strong correlation of the cavity finesse and mode structure with the diamond thickness and surface topography, prevalent transverse-mode mixing under diamondlike conditions, and mode-character-dependent polarization-mode splitting. Our results reveal the influence of the diamond surface on the achievable Purcell enhancement, which helps to clarify the route towards optimized spin-photon interfaces.	
19. keywords Atomic and Molecular Physics, Quantum Physics, Quantum information	
20. publisher Physical Review Applied 19, 064057 (2023)	21. price

Document Control Sheet

1. ISBN or ISSN	2. type of document (e.g. report, publication) Publication
3. Laser written mirror profiles for open-access fiber Fabry-Perot microcavities	
4. author(s) (family name, first name(s)) J. Hessenauer, K. Weber, J. Benedikter, T. Gissibl, J. Höfer, H. Giessen, D. Hunger	5. end of project 31.12.2024
	6. publication date 22.05.2023
	7. form of publication Paper
8. performing organization(s) (name, address) Physikalisches Institut, KIT, Wolfgang Gaede Str. 1, 76131 Karlsruhe University of Stuttgart, Pfaffenwaldring 57, 70569 Stuttgart IQMT, KIT, Herrmann von Helmholtz Platz 1, 76344 Eggenstein-Leopoldshafen	9. originator's report no. 17380
	10. reference no. DOI: doi.org/10.1364/OE.481685
	11. no. of pages 9
12. sponsoring agency (name, address) Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) 53170 Bonn	13. no. of references 43
	14. no. of tables 0
	15. no. of figures 3
16. supplementary notes	
17. presented at (title, place, date)	

18. abstract

We demonstrate laser-written concave hemispherical structures produced on the endfacets of optical fibers that serve as mirror substrates for tunable open-access microcavities. We achieve finesse values of up to 200, and a mostly constant performance across the entire stability range. This enables cavity operation also close to the stability limit, where a peak quality factor of 1.5 × 10^4 is reached. Together with a small mode waist of 2.3 μm, the cavity achieves a Purcell factor of $C \sim 2.5$, which is useful for experiments that require good lateral optical access or otherwise large separation of the mirrors. Laser-written mirror profiles can be produced with a tremendous flexibility in shape and on various surfaces, opening new possibilities for microcavities.

19. keywords
Atomic and Molecular Physics, Quantum Physics, Quantum information

20. publisher Optics Express	21. price

Document Control Sheet

1. ISBN or ISSN	2. type of document (e.g. report, publication) Publication
3. Cavity enhancement of V2 centers in 4H-SiC with a fibe-based Fabry-Perot microcavity	
4. author(s) (family name, first name(s)) J. Hessenauer, J. Körber, M. Ghezellou, J. Ul-Hassan, G. V. Astakhov, W. Knolle, J. Wrachtrup, D. Hunger	5. end of project 31.12.2024
	6. publication date 28.03.2025
	7. form of publication Paper
8. performing organization(s) (name, address) Physikalisches Institut, KIT, Wolfgang Gaede Str. 1, 76131 Karlsruhe 3rd Institute of Physics, University of Stuttgart, Allmandring 13, 70569 Stuttgart IQMT, KIT, Herrmann von Helmholtz Platz 1, 76344 Eggenstein-Leopoldshafen Department o Physics, Chemistry and Biology, Linköping University, 581 83 Linköping, Sweden Institute of Ion Beam Physics and Materials Research, Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf, 01328 Dresden Leibniz-Institute of Surface Engineering, Permoserstr 15, 04318 Leipzig Max-Planck Institute for Solid state research, Heisenbergstr 1, 70569 Stuttgart	9. originator's report no. 175
	10. reference no. DOI: doi.org/10.1364/OPTICAQ.557206
	11. no. of pages 7
12. sponsoring agency (name, address) Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) 53170 Bonn	13. no. of references 61
	14. no. of tables 0
	15. no. of figures 4
16. supplementary notes	
17. presented at (title, place, date)	
18. abstract Silicon vacancy centers in 4H-silicon carbide (SiC) host a long-lived electronic spin with spin-resolved optical transitions. This makes them a great candidate for implementing a spin–photon interface, an important building block of quantum networks. However, the fraction of coherently scattered photons is intrinsically low, limiting the achievable communication rates. To address this problem, we integrate V2 centers within a SiC membrane into a fiber-based Fabry–Perot microcavity.We find that SiC is uniquely suited for this approach, offering extremely low losses as we evidence by a high cavity finesse $F \approx 40\,000$ and naturally available maximal cavity–emitter coupling due to the perfect alignment of polarization modes and the dipole orientation. We observe a 13.3-fold Purcell enhancement of the zero phonon line of a single emitter, constituting an efficient source of coherent photons for this novel material platform, and opening the path toward a deterministic spin–photon interface.	
19. keywords Atomic and Molecular Physics, Quantum Physics, Quantum information	
20. publisher Optica Quantum	21. price

Document Control Sheet

1. ISBN or ISSN	2. type of document (e.g. report, publication) Publication
3. Fabrication of High-Quality Thin Single-Crystal Diamond Membranes with Low Surface Roughness	
4. author(s) (family name, first name(s)) J. Heupel, M. Pallmann, J. Körber, D. Hunger, J. P. Reithmaier, C. Popov	5. end of project 31.12.2024
	6. publication date 2022
	7. form of publication Paper
8. performing organization(s) (name, address) Institute of Nanostructure Technologies and Analytics; Universität Kassel, Heinrich-Plett-Str 40, 34132 Kassel Physikalisches Institut, KIT, Wolfgang Gaede Str. 1, 76131 Karlsruhe IQMT, KIT, Herrmann von Helmholtz Platz 1, 76344 Eggenstein-Leopoldshafen	9. originator's report no. 2200465
	10. reference no. DOI: 10.1002/pssa.202200465
	11. no. of pages 8
12. sponsoring agency (name, address) Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) 53170 Bonn	13. no. of references 40
	14. no. of tables 0
	15. no. of figures 4
16. supplementary notes	
17. presented at (title, place, date)	
18. abstract Certain aspects before and during the fabrication of single-crystal diamond (SCD) membranes are highlighted, which are decisive to obtain high-quality membranes with low surface roughness values around 0.2 nm on a small area scale. In addition to the requirements for the starting material, including a high planarity and a moderate surface roughness, the importance of cleaning processes to minimize particles and impurities before and during the structuring is emphasized. With the help of a planarization procedure, consisting of a combination of different Ar/Cl_2 recipes with low etch rates, surface defects like grooves due to polishing are minimized and smooth surfaces are acquired. Severe micro-masking can be prevented by the application of a cyclic $Ar/Cl_2 + O_2$ recipe, allowing finally the fabrication of defect-minimized and planarized SCD membranes in the thickness range between a few microns and a few hundred nanometers. The high quality of the structured SCD membranes is evidenced with a morphological as well as optical characterization via fiber-based microcavity measurements.	
19. keywords Atomic and Molecular Physics, Quantum Physics, Quantum information	
20. publisher Physica Status Solidi	21. price

Document Control Sheet

1. ISBN or ISSN	2. type of document (e.g. report, publication) Publication
3. Supraleitende Mikrowellenkontrolle von Zinn-Fehlstellen	
4. author(s) (family name, first name(s)) I. Karapatzakis, D. Hunger	5. end of project 31.12.2024
	6. publication date 01/2025
	7. form of publication Paper
8. performing organization(s) (name, address) Physikalisches Institut, KIT, Wolfgang Gaede Str. 1, 76131 Karlsruhe IQMT, KIT, Herrmann von Helmholtz Platz 1, 76344 Eggenstein-Leopoldshafen	9. originator's report no. 56
	10. reference no. DOI:10.1002/piuz.202570104
	11. no. of pages 2
12. sponsoring agency (name, address) Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) 53170 Bonn	13. no. of references 2
	14. no. of tables 0
	15. no. of figures 2
16. supplementary notes	
17. presented at (title, place, date)	
18. abstract *Quantennetzwerke zur Verteilung verschränkter Zustände könnten künftig sichere Kommunikation, vernetzte Quantensensoren und die Verknüpfung von Quantencomputern ermöglichen. Dafür werden langlebige Quantenspeicher benötigt, die effizient mit Licht adressiert werden können. Unser Team konnte nun erstmals mit einem supraleitenden Mikrowellenleiter volle Quantenkontrolle und lange Quantenspeicherzeiten für ein einzelnes Zinn-Fehlstellenzentrum in Diamant demonstrieren.*	
19. keywords Atomic and Molecular Physics, Quantum Physics, Quantum information	
20. publisher Physik in unserer Zeit	21. price

Document Control Sheet

1. ISBN or ISSN	2. type of document (e.g. report, publication) Publication
3. Microwave control of the Tin-Vacancy Spin Qubit in Diamond with a Superconducting Waveguide	
4. author(s) (family name, first name(s)) I. Karapatzakis, J. Resch, M. Schrodin, P. Fuchs, M. Kieschnick, J. Heupel, L. Kussi, C. Sürgers, C. Popov, J. Mejer, Ch. Becher, W. Wernsdorfer, D. Hunger	5. end of project 31.12.2024
	6. publication date 27.08.2024
	7. form of publication Paper
8. performing organization(s) (name, address) Physikalisches Institut, KIT, Wolfgang Gaede Str. 1, 76131 Karlsruhe Department of Physics, Saarland University, Campus E2 6, 66123 Saarbrücken FBI, University of Leipzig, 04103 Leipzig University of Kassel, Heinrich-Plett Str. 40, 34132 Kassel	9. originator's report no. 031036
	10. reference no. DOI: 10.1103/PhysRevX.14.031036
	11. no. of pages 24
12. sponsoring agency (name, address) Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) 53170 Bonn	13. no. of references 47
	14. no. of tables 3
	15. no. of figures 18
16. supplementary notes	
17. presented at (title, place, date)	

18. abstract

Group-IV color centers in diamond are promising candidates for quantum networks due to their dominant zero-phonon line and symmetry-protected optical transitions that connect to coherent spin levels. The negatively charged tin-vacancy (SnV) center possesses long electron spin lifetimes due to its large spin-orbit splitting. However, the magnetic dipole transitions required for microwave spin control are suppressed, and strain is necessary to enable these transitions. Recent work has shown spin control of strained emitters using microwave lines that suffer from Ohmic losses, restricting coherence through heating. We utilize a superconducting coplanar waveguide to measure SnV centers subjected to strain, observing substantial improvement. A detailed analysis of the SnV center electron spin Hamiltonian based on the angle-dependent splitting of the ground and excited states is performed. We demonstrate coherent spin manipulation and obtain a Hahn echo coherence time of up to $T_2 = 430\ \mu s$. With dynamical decoupling, we can prolong coherence to $T_2 = 10$ ms, about a sixfold improvement compared to earlier works. We also observe a nearby coupling ^{13}C spin, which may serve as a quantum memory, thus substantiating the potential of SnV centers in diamond and demonstrates the benefit of superconducting microwave structures.

19. keywords
Atomic and Molecular Physics, Quantum Physics, Quantum information

20. publisher Physical Review X	21. price

Document Control Sheet

1. ISBN or ISSN	2. type of document (e.g. report, publication) Publication
3. A highly stable and fully tunable open microcavity platform at cryogenic temperatures	
4. author(s) (family name, first name(s)) M. Pallmann, T. Eichhorn, J. Benedikter, B. Casabone, T. Hümmer, D. Hunger	5. end of project 31.12.2024
	6. publication date 6.4.2023
	7. form of publication Paper
8. performing organization(s) (name, address) Physikalisches Institut, KIT, Wolfgang Gaede Str. 1, 76131 Karlsruhe IQMT, KIT, Herrmann von Helmholtz Platz 1, 76344 Eggenstein-Leopoldshafen ICFO-Institut de Ciencies Fotoniques, 08860 Castelldefels, Barcelona, Spanien Faculty of Physics, Ludwig-Maximilians-University, Schellingstr. 4, 80799 München Qlibri GmbH, Maistr. 67, 80337 München	9. originator's report no. 046107
	10. reference no. DOI: 10.1063/5.0139003
	11. no. of pages 9
12. sponsoring agency (name, address) Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) 53170 Bonn	13. no. of references 26
	14. no. of tables 1
	15. no. of figures 5
16. supplementary notes	
17. presented at (title, place, date)	

18. abstract

Open-access microcavities are a powerful tool to enhance light–matter interactions for solid-state quantum and nanosystems and are key to advance applications in quantum technologies. For this purpose, the cavities should simultaneously meet two conflicting requirements—full tunability to cope with spatial and spectral inhomogeneities of a material and highest stability under operation in a cryogenic environment to maintain resonance conditions. To tackle this challenge, we have developed a fully tunable, open-access, fiber-based Fabry–Perot microcavity platform that can be operated under increased noise levels in a closed-cycle cryostat. It comprises custom-designed monolithic micro- and nanopositioning elements with up to mm-scale travel range that achieve a passive cavity length stability at low temperature of only 15 pm rms in a closed-cycle cryostat and 5 pm in a more quiet flow cryostat. This can be further improved by active stabilization, and even higher stability is obtained under direct mechanical contact between the cavity mirrors, yielding 0.8 pm rms during the quiet phase of the closed-cycle cryocooler. The platform provides the operation of cryogenic cavities with high finesse and small mode volume for strong enhancement of light–matter interactions, opening up novel possibilities for experiments with a great variety of quantum and nanomaterials.

19. keywords
Atomic and Molecular Physics, Quantum Physics, Quantum information

20. publisher APL Photonics	21. price

Document Control Sheet

1. ISBN or ISSN	2. type of document (e.g. report, publication) Publication
3. Cavity-mediated collective emission from few emitters in a diamond membrane	
4. author(s) (family name, first name(s)) M. Pallmann, K. Köster, Y. Zhang, J. Heupel, T. Eichhorn, C. Popov, K. Molmer, D. Hunger	5. end of project 31.12.2024
	6. publication date 04.12.2024
	7. form of publication Paper
8. performing organization(s) (name, address) Physikalisches Institut, KIT, Wolfgang Gaede Str. 1, 76131 Karlsruhe School of Microelectronics, Zhengzhou University, Zhengzhou 450052, China Institute of Quantum Materials and Physics, Henan Academy of Sciences, Zhengzhou 450056, China University of Kassel, Heinrich-Plett Str. 40, 34132 Kassel Niels Bohr Institute, University of Copenhagen, 2100 Copenhagen, Denmark IQMT, KIT, Herrmann von Helmholtz Platz 1, 76344 Eggenstein-Leopoldshafen	9. originator's report no. 041055
	10. reference no. DOI: 10.1103/PhysRevX.14.041055
	11. no. of pages 14
12. sponsoring agency (name, address) Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) 53170 Bonn	13. no. of references 63
	14. no. of tables 0
	15. no. of figures 8
16. supplementary notes	
17. presented at (title, place, date)	

18. abstract

When an ensemble of quantum emitters couples to a common radiation field, their polarizations can synchronize and a collective emission termed superfluorescence can occur. Entering this regime in a freespace setting requires a large number of emitters with a high spatial density as well as coherent optical transitions with small inhomogeneity. Here, we show that, by coupling nitrogen-vacancy centers in a diamond membrane to a high-finesse microcavity, also few, incoherent, inhomogeneous, and spatially separated emitters—as are typical for solid state systems—can enter the regime of collective emission. We observe a superlinear power dependence of the emission rate as a hallmark of collective emission. Furthermore, we find simultaneous photon bunching and antibunching on different timescales in the secondorder
autocorrelation function, revealing cavity-induced interference in the quantized emission from about 15 emitters.We develop theoretical models for mesoscopic emitter numbers to analyze the behavior in the Dicke state basis and find that the population of collective states together with cavity enhancement and filtering can explain the observations. Such a system has prospects for the generation of multiphoton quantum states, the preparation of entanglement in few-emitter systems, and enhancement of signals in quantum sensing.

19. keywords
Atomic and Molecular Physics, Quantum Physics, Quantum information

20. publisher Physical Review X	21. price