

Teil 1 – Kurzbericht

Verbundprojekt (Akr.): **SPINNING**

Förderkennzeichen: **13N16218**

Förderzeitraum **01.01.2022** bis **31.12.2024**

Zuwendungsempfänger: **Qinu GmbH**

Thema des Vorhabens:

Diamond spin-photon-based quantum computer (SPINNING) – Teilvorhaben: Kryogene Kühlung

1. Ursprüngliche Aufgabenstellung und technischer Stand vor Vorhabensbeginn

Das Teilprojekt der Qinu GmbH - Kryogene Kühlung - betraf die Erforschung und den Aufbau einer kompakten, automatisierten und einfach bedienbaren kryogenen Umgebung. Dabei lag der Fokus nicht auf der Entwicklung eines überdimensionierten und ineffizienten Kühlsystems, sondern auf dem Design und Herstellung eines maßgeschneiderten Systems mit maximaler Effizienz. Wichtig hierbei war eine kompakte Größe, schnelle Abkühl- und Aufwärmzeiten, hohe Nutzerfreundlichkeit, minimale Vibrationen und finale End-Temperaturen von unter 100 mK. Besonders im Vordergrund standen zudem die Berücksichtigung sämtlicher experimenteller Anforderungen der Verbundpartner, welche führende Forschungsgruppen im Bereich optischer Quantensysteme sind. Das System sollte nicht nur die notwendigen Umgebungsbedingungen schaffen, sondern auch geeignete Ein-/und Ausgängen für die Austeerungen und das Auslesen der Experimente in Form von niederfrequenten, hochfrequenten, und optischen Signalen bieten. Weiterhin sollte es in gängige optische Labore integriert werden können, ohne aufwendigen Umbau von Räumlichkeiten und umfangreicher Bereitstellung zusätzlicher Infrastruktur.

Zu Beginn des Vorhabens gab es weltweit auf dem Markt kein Kühlsystem mit mK-Temperaturen, welches optimiert ist für Anwendungen mit Quantenemittern und opto-elektronischen Quantensystemen. Die weltweit führenden Hersteller von Ultra-Tieftemperatur-DRs (mK-Bereich) hatten zu Beginn des Vorhabens Produkte im Portfolio, die es WissenschaftlerInnen aus verschiedenen Bereichen ermöglichen, mühelos und zuverlässig Temperaturen nahe dem absoluten Nullpunkt zu erreichen. Ihre Systeme sind jedoch groß, langsam in den Abkühl- und Aufwärmzeiten und leiden unter einem hohen Overhead und Helium- und Energieverbrauch. Weiterhin gab es Tischlösung von Herstellern mit Endtemperaturen über 1K. Diese Systeme bieten die schlüsselfertige Funktionalität und automatische Steuerung in einem einfach zu bedienenden System mit variabler Temperatur an. Allerdings erreichen diese Kryosysteme nicht den Ultratieftemperaturbereich der DRs.

Qinu bietet seit Ende 2021 ein System an, welche die Schnittmenge aus beiden Bereichen bildet. Ein kompakter Tisch-Kryostat mit mK-Endtemperaturen und konstantem, dauerhaften Betrieb. Jedoch war dies zu diesem Zeitpunkt eine erste Version. Durch die Beteiligung am Forschungsvorhaben konnte Qinu direkt mit repräsentativen Endkunden UniStutt, UniUlm und KIT die eingangs beschriebener Optimierungen und Anpassungen für eine Integration in ein optisches Labor entwickeln, herstellen und testen.

2. Ablauf und wesentliche Ergebnisse

Der ursprüngliche Ablauf des Teilvorhabens sah innerhalb des Förderzeitraums vor, sukzessive Komponenten und Baugruppen für eine Kühlmaschine mit Endtemperaturen $<100\text{mK}$ herzustellen. Bei all diesen Schritten stand die Optimierung für optische/phonische Experimente und die einfache Integration in ein übliches Optik-Labor im Vordergrund. Im ersten Jahr des Fördervorhabens wurden der Fokus auf die Peripherie-Geräte gelegt, wie Gas-Handling-System (GHS), externer 4K-Vorkühler (CCU) und Transferline für kalten He4 Transport. Im zweiten Jahr des Fördervorhabens wurde mit dem Kryostaten selbst begonnen, und Schritt für Schritt, die 4K- Umgebung, und dann die 100mK-Umgebung aufgebaut. Dies erstreckte sich bis Anfang des dritten Jahres des Fördervorhabens. Danach wurde der Fokus auf Ausstattung gelegt, welche für einen effizienten und einfachen Betrieb von optischen/phonischen Experimenten bei mK-Temperaturen benötigt werden.

Zu den wesentlichen Ergebnissen in Zusammenarbeit mit den Verbundpartnern zählen:

In dem ersten und zweiten Arbeitspaket lag der Fokus zum einen auf dem 4K-Vorkühler (in der Vorhabensbeschreibung auch externe Kühlmaschine bezeichnet) und auf der He4-Transferline, welche 4K kaltes Helium von dem 4K-Vorkühler zu dem Kryostaten und zurückschickt. Im Rahmen des Fördervorhabens wurde der externe 4K-Vorkühler von dem GHS entkoppelt und dadurch frei positionierbar. Dies ermöglicht eine verbesserte Kryoperformance durch kürzere Leitungswege, sowie verringerte Vibrationsübertragung aufgrund von separater Vibrations-Isolierung. Weiterhin wurde eine Kühlfalle innerhalb des 4K-Kühlers neu entwickelt, die eine bessere Reinigung von Kontaminationen im Mischungsgas ermöglicht, sowie die Gefahr von Verstopfungen deutlich verringert. Die internen Veränderungen der He4-Transferline sorgten für eine bessere thermische Isolierung, größeren Durchfluss der kryogenen Gase, leichtere Fertigung, sowie einfachere Ankopplung an den Kryostaten. Durch die verbesserte Kryoperformance war es möglich, den 4K-Vorkühler in kleinerer Ausführung zu installieren. Gleichzeitig wurden Befestigungsmethoden zur Vibrationsminimierung gemeinsam mit UniStutt, UniUlm und KIT getestet. Weiterhin wurde die Transferline in einem weiteren Schritt dahingehend überarbeitet, eine komplette elektrische Entkopplung von GHS und CCU von dem Kryostaten zu ermöglichen.

Bei dem dritten Arbeitspaket wurde zu Beginn das GHS überarbeitet. Der Fokus lag auf einem kleineren Volumen, Erweiterung der integrierten Komponenten für eine umfangreichere Regelung- und Steuerung, sowie verringerte Übertragung der Vibrationen. Konkret wurde das GHS durch eine neue Bauweise im Volumen um 30% kleiner, was für einen verringerten Raumbedarf im Labor sorgt. Weiterhin wurden Vibrationsquellen wie Vakuum-pumpen mechanisch entkoppelt, um die Propagation von Vibrationen auf das Messsystem zu verringern. Der integrierte Steuerungs-PC (IPC) wurde in seinen digitalen und analogen Ein- und Ausgängen erweitert, sowie die Steuerungssoftware angepasst.

In den verbleibenden Arbeitspaketen vier bis sechs wurde der Kryostat angepasst und gefertigt, von 4K-Endtemperaturen bis zu 30 mK ($<100\text{ mK}$). Auf diesem Wege wurde die 4K-Vorkühleinheit im Kryostaten kleiner gebaut, um mehr Platz im Inneren für optische Installationen zu bieten. Zudem wurden einzelne Komponente angepasste, um mehr Kryoperformance zu bieten. Ein einfacheres experimentelles Handling für den Endkunden am optischen Tisch wurde durch eine Überarbeitung des Vakuumschildes und des Strahlenschildes ermöglicht. In Zusammenarbeit mit dem KIT wurden die Installation der Hochstromzuleitungen in dem Kryostaten verbessert, sowie die Kühlung dieser überarbeitet. Im Rahmen dieser Arbeitspakete wurde zusätzlich spezielle optische Ausstattung wie beispielsweise DC-Verkabelung für Piezo-Aktuatoren im mK-Bereich, optische Glasfaser und Freistrahlgang in die kryogenen Umgebung neu entwickelt, und gemeinsam mit UniStutt und UniUlm getestet.