

Technischen Informationsbibliothek (TIB)

Welfengarten 1 B

30167 Hannover

Haar, 15. Dezember 2025

Sachbericht zum Teilvorhaben "Kompaktes Kühlsystem" im Rahmen des Verbundprojekts RECONNAITRE (QuNET+)

ZE: attocube systems GmbH	Förderkennzeichen: 16KISQ060
Vorhabenbezeichnung: QuNET + RECONNAITRE: Kompaktes Kühlsystem	
Laufzeit des Vorhabens: 01.01.2022 – 30.06.2025	

Teil 1 Kurzbericht

1. Ausgangslage und Motivation

Für die Quantenkommunikation, insbesondere Quantum-Key-Distribution (QKD), sind supraleitende Nanodraht-Single-Photon-Detektoren (SNSPDs) unverzichtbar. Der Betrieb dieser Detektoren erfordert Temperaturen unter 2,5 K. Bisherige Kühlsysteme sind groß, komplex und teuer, was ihre industrielle Nutzung und den Aufbau großflächiger QKD-Netze erheblich erschwert. Zudem benötigen sie separate Räume für Kompressoren und sind wartungsintensiv. Ziel des Teilvorhabens war die Entwicklung eines kompakten, komplexitätsreduzierten und vollautomatisierten Kühlsystems, das in ein 19"-Rack integriert werden kann und für industrielle Anwendungen geeignet ist.

2. Projektziele

Ziel des Teilvorhabens war die Entwicklung eines kompakten, komplexitätsreduzierten und vollautomatisierten Kühlsystems, das in ein 19"-Rack integriert werden kann und für industrielle Anwendungen geeignet ist. Dabei sollten Kaltkopf, Kompressor, Vakuumtechnik und Steuerung in einem kompakten 19"-Rack integriert werden, um die einfache Nutzung außerhalb von Laborinfrastruktur zu ermöglichen. Ein weiterer Schwerpunkt lag auf der vollautomatischen Inbetriebnahme sowie der Vorbereitung für eine CE- und UL-Zertifizierung. Um Wartungsaufwand und Kosten zu reduzieren, wurde die Komplexität des Kompressors durch ein Redesign und alternative Fertigungsmethoden deutlich verringert. Ein zentrales Anliegen war die Sicherstellung der nationalen technologischen Souveränität durch eine Fertigung in Deutschland.

Der Erfolg des Projekts wurde schließlich durch die Systemintegration und Validierung gezeigt, einschließlich des Aufbaus des kompletten Receiversystems und Tests in QKD-Demonstrationen.

Damit wurde eine gute Basis für die Kryostaten-Hardware im QuNet-Projekt geschaffen. Die Entwicklung wurde so

weit durchgeführt, dass sowohl im anstehenden Schlüsselexperiment 4 als auch in folgenden Projektschritten das attocube-Kühlsystem auch in höheren Stückzahlen verwendet werden kann.

3. Durchführung und Ablauf

Das Projekt wurde in mehreren Arbeitspaketen umgesetzt:

- Anforderungsanalyse und Schnittstellendefinition (AP2)
- Entwicklung des Kühlsystems (AP3): Aufbau von drei Prototypen mit steigendem Integrationsgrad
- Systemintegration und Validierung (AP10, AP11): Aufbau des kompletten Receiversystems und Tests

Als zentrale Anforderung für das Kühlsystem wurde eine Zieltemperatur $< 2,8$ K definiert. Im Laufe des Projektes erreichten die Kühlsysteme eine Basistemperatur ohne Verkabelung von 2,1K, womit ausreichend Kühlleistung für die Integration zur Verfügung stand und bereits im ersten Aufbau die Detektortemperatur unter dem geforderten Schwellenwert blieb. Diese Temperatur erwies sich als stabil und ohne negative Auswirkungen auf „Dark Counts“, welche teilweise erst im gemessenen Rahmen bei deutlich tieferen Temperaturen oder mit 4K-Schild erzielt werden. Das System zeigte sich damit sehr geeignet für die Nutzung mit SNSPD Detektoren.

Es wurden drei Kühlsysteme mit steigendem Integrationsgrad entwickelt. Mit den ersten beiden Kühlsystemen wurden umfangreiche Vortests für die Rack-Integration gemacht, wodurch das kompakteste existierende Kühlsystem mit einer Basistemperatur unter 10K geschaffen wurde. Es konnten alle nötigen Bauteile in das Rack mit nur 10 HE integriert werden. Der Balgkompressor erwies sich zudem als effizienter als marktübliche Scrollkompressoren. Das finale Kühlsystem implementierte die vollständige Automatisierung, inklusive neuer Steuerungsarchitektur und optimierter Hydraulik. Da kommerzielle Lösungen für Temperatur- und Vakuumkontrolle fehlten, wurde eine eigene Kryostaten-Kontrolle entwickelt, was technologische Souveränität stärkt und Kosten um Faktor 10 bei der dafür verwendeten Hardware senkt.

Bereits im März 2023 wurde mit Kühlsystem 2 ein vollständiges Testsystem mit einem SNSPD-Sensor von Pixel Photonics und einem TimeTagger von Swabian Instruments auf zwei führenden Fachmessen für Messsysteme in der physikalischen Grundlagenforschung präsentiert: auf dem APS March Meeting in Minneapolis und der DPG-Tagung in Berlin. Damit wurde für Kühlsystem 2 ein wichtiger Meilenstein in der Integration mit den Partnern erreicht und ein deutlicher Fortschritt bei der Komplexitätsreduzierung demonstriert. Besonders der einfache Aufbau eines funktionsfähigen Systems auf zwei Messen, auf zwei Kontinenten innerhalb von zwei Wochen, zeigte den neuen Standard für kommerzielle Systeme hinsichtlich Robustheit und einfacher Bereitstellung.

Der Projekterfolg wurde schließlich durch die Systemintegration und Validierung bestätigt, einschließlich des Aufbaus des kompletten Receiversystems und Tests in QKD-Demonstrationen. Damit wurde eine solide Basis für die Kryostaten-Hardware im QuNet-Projekt geschaffen. Die Entwicklung ist so weit fortgeschritten, dass das attocube-Kühlsystem sowohl im anstehenden Schlüsselexperiment 4 als auch in zukünftigen Projektschritten in höheren Stückzahlen eingesetzt werden kann.

Teil 2 Eingehende Darstellung

1. Ausgangslage, Motivation und Ziele

Für die Quantenkommunikation, insbesondere die Quantum-Key-Distribution (QKD), sind supraleitende Nanodraht-Single-Photon-Detektoren (SNSPDs) unverzichtbar. Ihr Betrieb erfordert Temperaturen unter 2,5 K. Bisherige Kühlsysteme sind jedoch groß, komplex und kostenintensiv, was ihre industrielle Nutzung sowie den Aufbau großflächiger QKD-Netze erheblich erschwert. Hinzu kommt, dass sie separate Räume für Kompressoren benötigen und einen hohen Wartungsaufwand verursachen. Ziel des Teilvorhabens war die Entwicklung eines kompakten, komplexitätsreduzierten und vollautomatisierten Kühlsystems, das in ein 19"-Rack integriert werden kann und für industrielle Anwendungen geeignet ist.

Die vor Projektbeginn verfügbaren Kühlsysteme für Single-Photon-Detektoren folgten dem veralteten „Kronleuchter-Prinzip“: Sie sind sperrig, unhandlich und in der Verkabelung stark eingeschränkt. Durch die Trennung von Kühlsystem und Kompressor erfordern sie separate Räume und sind für moderne Rack-Aufbauten ungeeignet. Dies behindert den Aufbau großflächiger QKD-Netze sowie die Integration in Quantencomputer, die zunehmend in Rechenzentren statt ausschließlich in Universitäten betrieben werden.

Der bisherige, auf akademische Nutzung ausgelegte Aufbau ist zudem komplex und arbeitsintensiv. Ein Betrieb ohne Fachkenntnisse und Servicepersonal ist nicht möglich – im universitären Umfeld übernehmen häufig Studierende oder Laboranten die Pflege der Vakuumisolierung und die Systemkontrolle. Für den industriellen Einsatz hingegen sind eine vollständige Automatisierung sowie integrierte Diagnosefunktionen erforderlich, die einen Fernzugriff auf alle relevanten Parameter des Kühlsystems ermöglichen.

Dabei sollten Kaltkopf, Kompressor, Vakuumtechnik und Steuerung in einem kompakten 19"-Rack integriert werden, um die einfache Nutzung außerhalb von Laborinfrastruktur zu ermöglichen. Ein weiterer Schwerpunkt lag auf der vollautomatischen Inbetriebnahme sowie der Vorbereitung für eine CE- und UL-Zertifizierung. Um Wartungsaufwand und Kosten zu reduzieren, wurde die Komplexität des Kompressors durch ein Redesign und alternative Fertigungsmethoden deutlich verringert. Ein zentrales Anliegen war die Sicherstellung der nationalen technologischen Souveränität durch eine Fertigung in Deutschland.

Der Erfolg des Projekts wurde schließlich durch die Systemintegration und Validierung bestätigt, einschließlich des Aufbaus des kompletten Receiversystems und Tests in QKD-Demonstrationen. Damit wurde eine solide Basis für die Kryostaten-Hardware im QuNet-Projekt geschaffen. Die Entwicklung ist so weit fortgeschritten, dass sowohl im anstehenden Schlüsselexperiment 4 als auch in folgenden Projektschritten das attocube-Kühlsystem in höheren Stückzahlen eingesetzt werden kann.

2. Durchführung, und Ergebnisse

Das Projekt wurde in mehreren Arbeitspaketen umgesetzt:

- Anforderungsanalyse und Schnittstellendefinition (AP2)
- Entwicklung des Kühlsystems (AP3): Aufbau von drei Prototypen mit steigendem Integrationsgrad
- Systemintegration und Validierung (AP10, AP11): Aufbau des kompletten Receiversystems und Tests

AP2:

Zusammen mit den Projektpartnern wurden in mehreren Meetings die Anforderungen definiert: Zieltemperatur, Platzbedarf, Wärmelast durch die Verkabelung sowie die Integration der Anschlüsse am Detektorboard. Als zentrale Anforderung für das Kühlsystem wurde eine Zieltemperatur $< 2,8$ K der finalen Detektoren definiert. Da übliche SMA-Stecker nicht in das finale Konzept passten, wurde eine kompakte Lösung für elektrische und optische Schnittstellen beschlossen. Für die Glasfaserdurchführungen und Biegeradien wurden der Durchmesser des 40 K-Schildes sowie die Schnittstellenbeschaffenheit festgelegt.

Da zunächst unklar war, ob ein 4 K-Schild um die Detektoren erforderlich ist, wurde dessen Einbau im Design

berücksichtigt. Im Laufe des Projektes erreichten die Kühlsysteme eine Basistemperatur ohne Verkabelung von 2.1K, womit ausreichend Kühlleistung für die Integration zur Verfügung stand und bereits im ersten Aufbau die Detektortemperatur unter dem geforderten Schwellenwert blieb. Diese Temperatur erwies sich als stabil und ohne negative Auswirkungen auf „Dark Counts“, welche teilweise erst im gemessenen Rahmen bei deutlich tieferen Temperaturen und mit 4K Schild erzielt werden. Das System zeigte sich damit sehr geeignet für die Nutzung mit SNSPD Detektoren.

Über die Abstimmungsarbeit und gemeinsame Planung in AP2 konnten wichtige Grundlagen für zukünftige Entwicklungen rund um gekühlte Sensoriken und Elektronik sowie deren Integration in Kryo Systeme geschaffen werden.

AP3:

Es wurden drei Kühlsysteme mit steigendem Integrationsgrad entwickelt. Mit den ersten beiden Kühlsystemen wurden umfangreiche Vortests für die Rack Integration gemacht, wodurch mit Kühlsystem 2 das kompakteste existierende Kühlsystem mit einer Basistemperatur unter 10K geschaffen wurde. Es konnten alle nötigen Bauteile in das Rack mit nur 10 Höheneinheiten integriert werden. Das finale Kühlsystem implementierte die vollständige Automatisierung, inklusive neuer Steuerungsarchitektur und optimierter Hydraulik. Da kommerzielle Lösungen für Temperatur- und Vakuumkontrolle fehlten, wurde eine eigene Kryostaten-Kontrolle entwickelt, was technologische Souveränität stärkt und Kosten für diese Kontrollhardware um Faktor 10 bei der dafür verwendeten Hardware senkt.

Zentrales Augenmerk in der Spezifikation des Kühlsystems war der Platzbedarf des Gesamtsystems. Um zu vermeiden, dass Leistungsmerkmale verfehlt werden, wurde im ersten Aufbau von Kühlsystem 1 ein Test der Lageabhängigkeit als zentraler Testpunkt aufgenommen. Dazu wurde Kühlsystem 1 zunächst mit einer offenen Struktur für den Kryostaten geplant, um diesen beliebig drehen zu können.

In Montagetests wurde die Möglichkeit des Service der Verschleißteile (Bälge und Kaltkopfdichtungen) untersucht. Es ergibt sich die Notwendigkeit Kompressor und Kaltkopf in getrennten Gehäusen zu verbauen, um eine gute Servicebarkeit herzustellen. Dies reduzierte auch die Test und Aufbauzeit. Die Gesamtgröße des Systems ändert sich nur unerheblich, die Höhe wird auf 10HE erhöht, wobei die Länge um ca. 15cm kürzer gehalten werden kann, was die Nutzbarkeit von deutlich mehr kommerziellen Racksystemen ermöglicht. Zudem ermöglicht die Trennung der Bauteile die einzelnen Systemteile auf ein Gewicht einzuschränken, welches von zwei Personen gehoben werden kann. Dies ist grundsätzlich für den Verbau im Rack und für die spätere CE-Zertifizierung essenziell. Für eine klare Qualifikation der Leistungsdaten wurde zu Beginn eine Marktanalyse mit gängigen Scrollverdichtern durchgeführt. Als Referenz diente ein attoDRY800-Kryostat mit identischem Kaltkopf. Dieser aufwändige Vergleich war nötig, um die statistischen Schwankungen unter den Kaltköpfen und mögliche Unterschiede in den Betriebsparametern zu eliminieren. Damit konnte eine für die weitere Entwicklung nötige Datenbasis geschaffen werden. Die Effizienzanalysen zeigten, dass der im Projekt verwendete Balgkompressor bereits in der ersten Version eine höhere Effizienz als Standard-Scrollkompressoren bieten konnte.

Effizienzvergleich

In Vorbereitung für die weitere Entwicklung und Spezifizierung der Kühlsysteme wurden in AP 3.1 umfangreiche Vortests durchgeführt. Dafür wurde ein bestehender Kryostat (attocube attoDRY800) mit unterschiedlichen Kompressoren betrieben und hinsichtlich der Leistungsdaten vermessen.

Ergebnis:

[vertraulich]

Kühlsystem 1:

Für das erste Kühlsystem wurde ein kompakter Vakuumzylinder mit Breadboard-Stand entwickelt, um Leistungsdaten in beliebiger Ausrichtung des Kaltkopfes aufnehmen zu können. Der Aufbau wurde bewusst schlank gehalten: minimale Verkabelung und ein möglichst kleiner Vakuumbereich, um kurze Pumpzeiten und schnelles Arbeiten zu ermöglichen. Die Durchführungen basierten auf bewährten Lösungen, um Risiken zu minimieren. Der Kompressor ist nah am Demonstrator geblieben und über eine 6 m lange Flexline angebunden. Im Kompressor wurde bereits die für den geänderten Kaltkopf mit 3 Phasen Antrieb nötige Motorsteuerung verbaut, sowie die Verkabelung im ersten Schritt auf Industriestandard gehoben.

Ziel war es, ein klares Bild der Leistungsdaten des Kaltkopfes ohne zusätzliche Wärmelecks oder externe Einflüsse zu erhalten. Die Tests sollten die Basis für spätere Integrationschritte liefern und die Lageunabhängigkeit des Systems prüfen.

Ergebnis:

[vertraulich]

Kühlsystem 2:

Mit Kühlsystem 2 wurde die in der Spezifikation geplante Aufbau in zwei übereinander platzierten Rack Einschüben realisiert. Dafür wurde ein Gehäuse für den Aufbau des Kryostaten definiert und die Vakuumkammer inkl.

Durchführungen in das Gehäuse eingepasst.

Ein zentrales Feature in der Entwicklung war die Verschiebbarkeit des gesamten Kaltkopf/Vakuumaufbaus im Rack, sowie die Zugänglichkeit von der Frontseite aus. Durch die Verschiebbarkeit kann man auch im in einem Rack montierten Zustand von vorne auf integrierte Chips und die Verkabelung zugreifen und muss nicht den Kryostaten aus dem Rack ausbauen. Zudem ist der ganze Kaltkopf Aufbau für den Service entnehmbar und austauschbar.

Im Anschluss an die Montage von Kühlsystem 2 wurde eine detaillierte Analyse der Leistungsdaten durchgeführt. Dabei wurden unterschiedliche statische Drücke, Puffervolumen und Flexline-Längen untersucht, da diese Parameter maßgeblich das Verhalten des Systems bestimmen. Der Fokus lag auf Cooldown-Zeiten, Kühlleistung und Effizienz (Coefficient of Performance, COP).

Es wurden zudem Lösungen erarbeitet, um die Schildgröße um die 4K Stufe bei Beibehaltung eines kleinen Durchmessers am Schaft zu vergrößern. Dies ist essenziell für die weitere Skalierung der Detektorenzahl.

Bereits im März 2023 wurde mit Kühlsystem 2 ein vollständiges Testsystem mit einem SNSPD-Sensor von Pixel Photonics und einem TimeTagger von Swabian Instruments auf den beiden führenden Fachmessen für Messsysteme in der physikalischen Grundlagenforschung präsentiert: dem APS March Meeting in Minneapolis und der DPG-Tagung in Berlin. Damit wurde für Kühlsystem 2 ein wichtiger Meilenstein in der Integration mit den Partnern erreicht und ein deutlicher Fortschritt bei der Komplexitätsreduzierung demonstriert. Besonders der einfache Aufbau eines funktionsfähigen Systems auf zwei Messen, auf zwei Kontinenten innerhalb von zwei Wochen, zeigte den neuen Standard für kommerzielle Systeme hinsichtlich Robustheit und einfacher Bereitstellung.

Ergebnis:

[vertraulich]

Kühlsystem 3 (finales Kühlsystem):

Die zentralen Entwicklungspunkte für Kühlsystem 3 waren die Weiterentwicklung der Hydraulikeinheit und die Entwicklung der Automatisierung mit Pumpensystem und Kryostaten Kontroll Elektronik.

Für die Nutzbarkeit und Resilienz des Kryostaten ist eine dedizierte Steuerung mit automatischer Überwachung von Druck und Temperatur notwendig. Zudem muss die Steuerung resilient gegen Stromausfälle sein, sprich die Steuerung muss nach Aktivierung prüfen, ob das System aus einem aktiven Zustand ausgefallen ist und selbständig anhand der Temperatur und Druck Daten sowie mit einer Pumpe die nötigen Startbedingungen herstellen. Ursprünglich war die Temperatursteuerung über kommerzielle Lösungen vorgesehen, jedoch gab es kommerziell aktuell keine passende, fertige Lösung, um die Kontrolle des Vakuums einfach und skalierbar darzustellen. Ebenso ist nach einer Insolvenz im Bereich der Kryo Messelektronik ein ungünstiges Monopol auf dem Markt entstanden, welches kostengünstige Kontrolllösungen unmöglich macht. Es ergab sich also nicht nur die Notwendigkeit einen eigenen Kryostaten Controller zu entwickeln, sondern es musste auch die Temperatureauslese auf eine neue Lösung gestellt werden.

Die Hydraulikentwicklung fußte auf drei Kernzielen:

- Reduktion der Materialkosten für die Verdichtereinheit
- Vereinfachung der Serienfertigung
- Verbesserte Aerodynamik, um die Luftkühlung effizienter zu machen

Diese zielen direkt auf das Projektziel der Reduktion der Kosten und der Industrialisierung der Lösung ab. Nur durch moderne Fertigungsmethoden lassen sich die Bedarfe in den Quantentechnologien langfristig decken. Im Rahmen des Redesigns der Balgtöpfe und Endplatten wurde eine intensive Untersuchung der Auswirkungen der Todvolumina auf die Leistung des Systems durchgeführt. Mit Hilfe der Berechnungen wurde ein Optimierungstool erstellt, welche die Simulation der Volumina und der daraus folgenden Verdichtung am Balgkompressor erlaubt.

Um die Stabilität der Gehäuse gegen Kratzer zu verbessern und die Aufbauzeit zu reduzieren wurde ein neues Gehäuse mit pulverbeschichteten Platten und einem PCB basierten Schalterblock entwickelt.

Ergebnis:

[vertraulich]

AP10 und 11:

Das finale Kühlsystem wurde zusammen mit Pixel Photonics für den Einsatz in den QKD Teststrecken vorbereitet. Bei der Vorbereitung in AP10 zeigte sich der Vorteil des modularen Aufbaus in zwei Gehäusen: effizienter Transport zwischen Einsatzorten, schneller Aufbau und schnelle Integration.

Besonders sinnvoll zeigten sich die kommerziellen, wiederverwendbaren Kunststoff Boxen mit hermetischer Dichtung, welche das System nicht nur mechanisch, sondern auch vor Witterungseinflüssen im Transport schützen. Diese Verpackung ist voll wiederverwendbar, um das System dauerhaft mobil zu halten.

Eine Herausforderung bleibt das geringe Heliumvolumen, das beim Anschluss besondere Vorsicht verlangt, da Verluste den Betriebsdruck stärker beeinflussen als bei großvolumigen Systemen. Besonders beim Montieren und Demontieren der Helium Flexlines erhält man sowohl immer einen leichten Heliumverlust sowie einen Eintrag von Restluft in das System. Im Rahmen von AP10 wurde daher ein Spül- und Füllset entwickelt, welches in Zukunft Kunden zur Verfügung gestellt werden kann, um sicher und vor allem kostengünstig Kryostatensysteme zu „reinigen“. Die war bisher in dieser Form nicht auf dem Markt erhältlich, Spüllösungen mussten entweder selbst gebaut werden oder konnten durch Spezialfirmen teuer in Handarbeit gebaut werden. Das entwickelte Spülsystem verwendet nur Gleichteile aus dem Kompressor und kann daher einfach als Serviceartikel mit aufgebaut werden.

Im Arbeitspaket 11 wurde die Validierung und der Funktionstest des Systems in Zusammenarbeit mit den Partnern durchgeführt. Hierbei kamen bestehende QKD-Teststrecken zum Einsatz. Die Systemfunktionen und

Spezifikationen wurden im Dauerbetrieb getestet. Es wurde die Demonstration durch Überwachung und Justierung der Kühlparameter sowie durch softwareseitige Anpassungen am Kühlsystem unterstützt.

3. Wichtige Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

[vertraulich]

4. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Der Projekterfolg wurde durch die erfolgreiche Systemintegration und Validierung bestätigt. Dazu gehörten der Aufbau des vollständigen Receiversystems sowie umfangreiche Tests im Rahmen von QKD-Demonstrationen. Damit konnte eine solide Grundlage für die Kryostaten-Hardware im QuNet-Projekt geschaffen werden. Die Entwicklung ist inzwischen so weit fortgeschritten, dass das attocube-Kühlsystem sowohl im bevorstehenden Schlüsselexperiment 4 als auch in zukünftigen Projektphasen in höheren Stückzahlen eingesetzt werden kann. Dies stellt einen erheblichen Fortschritt gegenüber der Ausgangssituation dar. [vertraulich]

Mit dem erfolgreichen Abschluss der Arbeitspakete wurde eine tragfähige Basis für den zukünftigen Markterfolg gelegt. Das entwickelte Kühlsystem ermöglicht zudem die technologische Souveränität Europas im Bereich der Kühlsysteme für Quantentechnologien.

5. Verwertbarkeit der Ergebnisse

[vertraulich]
