

## Abschlussbericht

zum Teilvorhaben „Supraleitende Qubits für ADR-Kryostate“  
im Verbundprojekt „Plattform für Tieftemperatur Qubit Experimente (PtQUBE)“

Zuwendungsempfänger:	Prof. Dr. Ustinov, Karlsruher Institut für Technologie
Förderkennzeichen:	13N15016
Laufzeit des Vorhabens:	01.02.2020 – 31.01.2024
Berichtszeitraum:	01.02.2020 – 31.01.2024

## Übersicht

- I. Aufgabenstellung und Voraussetzungen
- II. Wissenschaftlich-Technische Ergebnisse
- III. Kooperationsübersicht des Verbundes

### I. Aufgabenstellung und Voraussetzungen

Ziel des beantragten Vorhabens ist es eine universelle Tieftemperatur-Qubit-Plattform für Adiabatische Entmagnetisierungs-Kryostate (ADR) zu entwickeln, die für den Betrieb von supraleitenden Qubits geeignet ist. Ermöglicht wird diese Entwicklung durch die enormen Fortschritte, die in der Entwicklung von künstlichen zwei-Niveau Systemen (Qubits) auf der Basis von supraleitenden oder halbleitenden Schaltkreisen in den vergangenen zwei Dekaden erzielt wurden. Unter anderem haben diese zu einer Erhöhung der Lebenszeit über mehrere Größenordnungen geführt.

In diesem Teilvorhaben wurde ein besonderes Augenmerk auf die magnetische Isolierung der supraleitenden Qubits gelegt, da die Kaltstufe des ADR-Kryostaten Magnetfelder benötigt, die weit oberhalb der kritischen Magnetfelder aktueller supraleitender Qubits sind. Es wurden sowohl supraleitende als auch magnetische Abschirmtechniken auf ihr Potenzial untersucht. Im Hinblick auf das Fernziel, eines leicht einsetzbaren, supraleitenden oder halbleitenden Quanten-Computers, ist es mit der vorgeschlagenen Plattform möglich, dem Anwender eine einfache, Kryoflüssigkeiten-freie, kryogene Qubit-Plattform bereitzustellen.

## II. Wissenschaftlich Technische Ergebnisse

### Übersicht über den Projektverlauf am PHI-KIT:

#### AP1 Definition und Entwicklung der Komponenten

- AP1.1 Herstellung und Charakterisierung der Referenz Qubits
- AP1.2 Definition und Entwicklung der DAQ Komponenten (mit IPE-KIT)
- AP1.3 Auslegung & Entwicklung der Kryostatplattform (mit Entropy und TransMIT)

#### AP2 Integration und Test der Baugruppen

- AP2.1 Integration Mikrowellenkomponenten in ADR Kryostat (mit Entropy)
- AP2.2 Integration der DAQ und Messungen am Qubit (mit IPE-KIT)
- AP2.4 Optimierung der Design- und Fabrikationsmethoden für Qubits (PHI-KIT)

#### AP3 Demonstration Basisplattform, Erweiterungen und Optimierungen

- AP3.1 Erweiterungen Qkit um Kryostatkontrollmechanismen (mit Entropy)
- AP3.2 Demonstration des Qubit-Readout (mit IPE-KIT)
- AP3.3 Optimierungen (alle Projektpartner)

#### AP 1 Definition und Entwicklung der Komponenten

##### *Herstellung und Charakterisierung der Referenz Qubits*

Im AP1.1/AP1.2 wurden verschiedene supraleitende Qubits auf der Basis sogenannter Transmon-Qubits im Reinraum des NSL//KIT hergestellt, bei Raumtemperatur vorcharakterisiert und Messungen bei tiefen Temperaturen in einem Entmischungskryostaten durchgeführt.

In Abbildung (1, links) ist ein einzelnes supraleitendes Qubit dargestellt. Es besteht aus einer Finger-Kapazität (gefärbt in rot) die parallel mit einem Josephson-Kontakt verbunden ist. Der Qubit-Zustand wird durch einen supraleitenden Resonator in koplanarer Geometrie (blau) über sog. ‚dispersives‘ Auslesen bestimmt. Bei dieser projektiven Messung wird der Qubit-Zustand durch die Messung der Resonanzfrequenz des Ausleseresonators bestimmt. Vier Qubits des gleichen Typs sind auf einem 5x5 mm<sup>2</sup> großen Saphir Chip beheimatet, wobei die Resonatoren zur Unterscheidung unterschiedliche Frequenzen haben und über einen gemeinsamen koplanaren Wellenleiter verbunden sind. Dieser Wellenleiter transportiert zudem die Manipulationssignale an die jeweiligen Qubits.

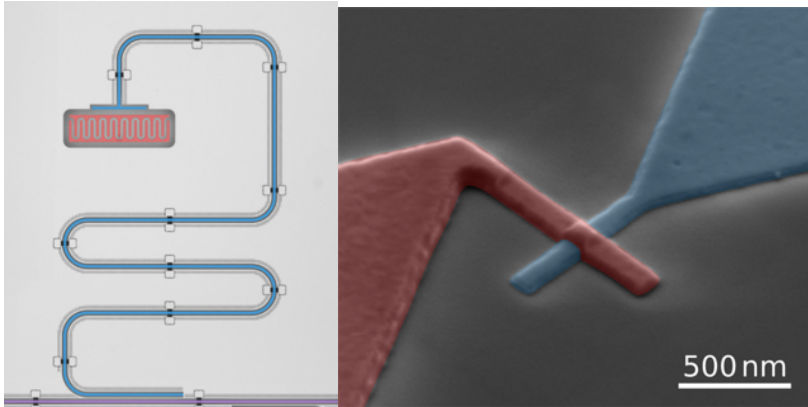


Abb. (1) Supraleitendes Qubit (links) und Josephson-Kontakt in Cross-Junction Geometrie (rechts).

Abbildung (1, rechts) zeigt den Josephson-Kontakt des Qubits. Der Kontakt wurde in der sog. Cross-Junction Technik hergestellt, bei der zuerst die (blaue) Aluminium Lage aufgedampft und strukturiert wird und dann in einem zweiten Schritt die Oxid-Barriere und die zweite Lage (rot) aufgedampft und strukturiert wurde. Dieses spezielle Verfahren ist weitestgehend CMOS kompatibel und erlaubt eine größere Flexibilität bei der Wahl der Materialien und auch der Wafergrößen. Als Alternative zu der ansonsten gebräuchlichen Methode der in-situ Schattenbedampfung zeigt auch diese Technologie ebenfalls gute Resultate bei der Herstellung von Josephson-Kontakten.

Die Vorcharakterisierung der Referenz-Qubits wurde in einem konventionellen Entmischungskryostaten vorgenommen. Für die Messungen bei tiefen Temperaturen, wie in AP1.1 gefordert, wurde der Kryostat mit zusätzlichen Messleitungen und Filtern ausgestattet. Es wurden sowohl spektroskopische (mit dem beschafften Keysight Netzwerkanalysator E5080B) als auch zeitaufgelöste Messungen mit der in AP1.2 durch das IPE-KIT entwickelten FPGA Elektronik durchgeführt. Spektroskopische Messungen sind zur Vorcharakterisierung von neu entwickelten Qubits nötig, da durch Fabrikationstoleranzen, sowohl die Resonanzfrequenz der Resonatoren als auch die Qubit-Übergangsfrequenz stark (mehrere GHz) schwanken kann. Die für diese Aufgabe verfügbaren kommerziellen Netzwerkanalysatoren erfüllen die Anforderungen sowohl in Bezug auf die Bandbreite als auch die Frequenzauflösung.

Für gepulste Messungen, wie sie für Quantum-Gates durchgeführt werden, waren bei Projektstart nur wenige kommerzielle Lösungen verfügbar. Hier sind Verbesserungen bei Kosten pro Qubit-Kanal, der (zeitlichen) Puls-Latenz, d.h. die Zeit zwischen dem Manipulationspuls und der Auslese und ggf. weiteren Pulsen nötig. Die vom IPE-KIT entwickelte Lösung erlaubt im aktuellen Entwicklungsstand grundlegende Qubit-Operationen durchzuführen, wie sie z.B. für Lebenszeit- und Kohärenzmessung der Qubits notwendig sind. Diese Messungen wurden mit den Referenzqubits bei einer Temperatur von etwa 10 mK durchgeführt und ergaben  $T_1$  Zeiten von etwa 10  $\mu$ s und  $T_2$  Zeiten von etwa 5  $\mu$ s.

In Abbildung (2) sind zeitaufgelöste Messungen gezeigt. Hierbei wurde der Qubit  $|0\rangle \leftrightarrow |1\rangle$ -Übergang mit einem Mikrowellenpuls variierender Länge (Y-Achse) und variierender Frequenz (X-Achse) getrieben. Die Farbkodierung (Z-Achse) entspricht dem gemessenen ‚dispersiven shift‘, also der Frequenzverschiebung des Ausleseresonators. Wird der Qubit-Übergang auf Resonanz getrieben (Detuning = 0) sind sehr deutliche Rabi-Oszillationen zu erkennen, d.h. der Zustand des Qubits oszilliert zwischen dem  $|0\rangle$  und  $|1\rangle$  Zustand. Diese Kontrolle des Qubit-Zustands ist die Grundlage für Qubit-Gate-Operationen und demonstriert die Funktion der FPGA-Elektronik und des Qubits.

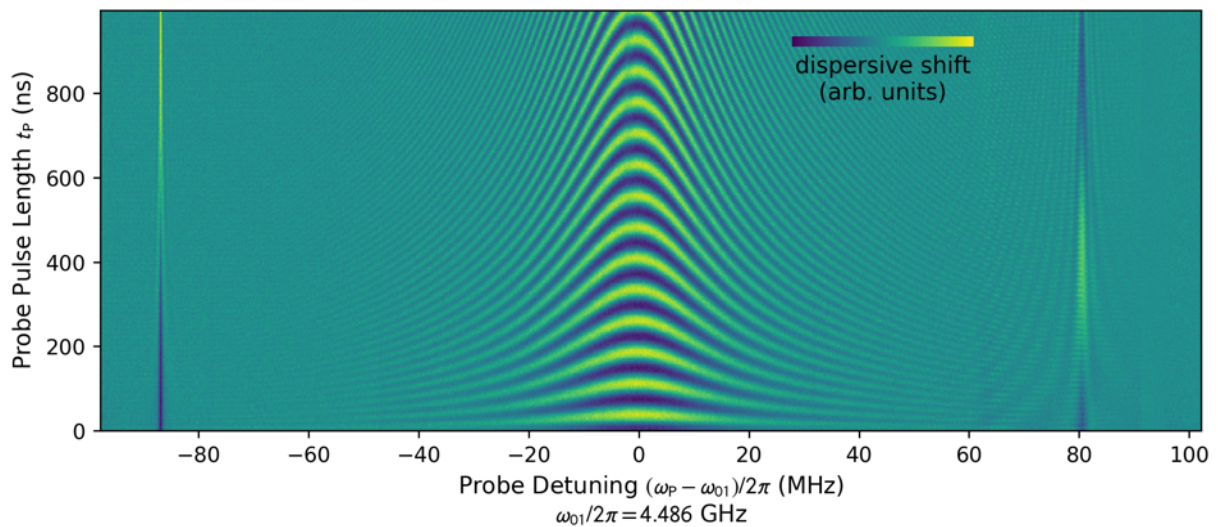


Abb. (2) Rabi-Oszillationen des Referenz-Qubits in Abhängigkeit der Mikrowellenfrequenz.

Zusätzlich zu dieser dominanten Oszillation ist bei einer Verstimmung von -88 MHz der  $\frac{1}{2} |0\rangle \leftrightarrow |2\rangle$  Übergang des Qubits zu erkennen, sowie bei 80 MHz die Seitenbandfrequenz der Mischelektronik. Der  $\frac{1}{2} |0\rangle \leftrightarrow |2\rangle$  Übergang benötigt für einen Rabi-Zyklus zwei Photonen, also eine größere Puls-Amplitude, und führt deshalb zu einer langsameren Rabi-Oszillationsfrequenz, was in Abbildung (2) deutlich zu erkennen ist. Das (zusätzliche) Auftreten der Seitenbandfrequenz stellt zwar kein prinzipielles Problem für die aktuellen Messungen dar, kann aber bei komplexeren Qubit-Schaltkreisen durch sog. Frequency-Crowding zu störenden Nebeneffekten führen. In weiteren Revisionen des Analog-Frontends der IPE-KIT Elektronik wurde diesem Effekt Rechnung getragen und die Mischfrequenzen in einen unkritischen Bereich verschoben.

In dem Arbeitspaket wurden zudem weitere Qubits mit der beschriebenen Technologie entworfen und hergestellt. Neben Transmon-Qubits wurden auch Fluss-basierte supraleitende Qubits studiert. Als Charakterisierungsmethode wurden die Proben bei niedrigen Frequenzen mit der beschafften Raumtemperatur-Elektronik (Stanford Research) untersucht. Hierfür wurde die Filterkette des Entmischungskryostaten erweitert und verbessert. Arbeiten zu alternativen Materialien zu den traditionell Aluminium basierten supraleitenden Qubits wurden aufgenommen. Hierbei wurden u.a. auch ‚klassische‘ Supraleiter wie Niob evaluiert.

#### Auslegung & Entwicklung der Kryostatplattform

Die Entwicklung der Magnetfeldabschirmung und die Definition der Mikrowellenkomponenten für den ADR-Kryostaten waren Teil des AP 1.3.

Mit Entropy und TransMIT wurden in mehreren Meetings die Spezifikationen hierfür erarbeitet. Zur Abschirmung diverser Störeinflüsse auf die Qubits wurde eine Multilageng-Messbox entworfen, die sowohl im ADR-Kryostaten als auch in einem Entmischungskryostaten eingesetzt werden kann. In Abbildung (3, links) ist die Messbox dargestellt, die am PHI hergestellt wurde. Sie besteht aus mehreren ineinander geschachtelten Dosen, die unterschiedliche Aufgaben erfüllen. Die innerste Dose ist aus Kupfer gefertigt und gewährleistet eine möglichst strahlungsarme, lichtdichte Umgebung für

die Qubit-Probe. Das mittlere Schild (Aluminium) reduziert magnetische Einflüsse für Magnetfelder unterhalb von 5 mT. Für das äußere Schild gibt es zwei Varianten, eines hergestellt aus Cryoperm 10 (PHI/Sekels GmbH) für die Abschirmung von größeren Magnetfeldern in konventionellen Kryostaten. Da sich dieses Material durch die hohe spezifische Wärme nicht für die Anwendung auf der kältesten Stufe eines ADR-Kryostaten eignet, wurde eine zweite Variante hergestellt, dargestellt in Abbildung (3, rechts). Hierbei handelt es sich um einen supraleitenden Schild aus supraleitendem Niob, der für den Einsatz in den hohen Magnetfeldern des ADR geeignet ist. Das Schild wurde von der Firma WHS Sondermetalle GmbH geschnitten und gebogen und am MPI für Kernphysik, Heidelberg, durch ein Vakuum-Elektronenstrahl-Verfahren geschweißt.

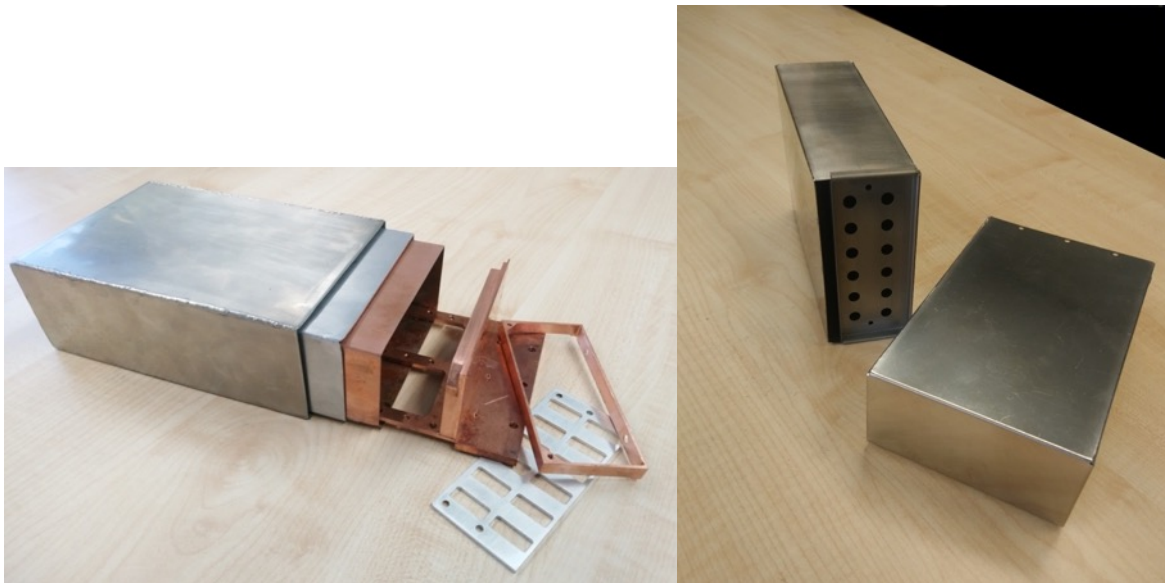


Abb. (3) Tieftemperatur Messbox für Qubit-Experimente (links) mit Niob-ADR-Schild (rechts).

Mit Entropy und TransMIT wurde die Spezifikation des ADR-Kryostaten und der kryogenen Mikrowellebauteile und -verkabelung erarbeitet. Es wurde festgelegt an welchen Stellen und wie die Signalleitungen thermalisiert werden. Der Platzbedarf für Verstärker und Isolatoren bei 4 Kelvin wurde spezifiziert. Da die typischerweise verwendeten halbstarren Mikrowellenleitungen durch thermische Kontraktion mechanische Belastung auf die ADR-Aufhängungen ausüben, können sie nicht durchgehend eingesetzt werden. In PtQUBE wird deshalb eine Kombination aus flexiblen und halbstarren Signalleitungen verwendet.

## **AP 2 Integration und Test der Baugruppen**

*AP 2.1 Integration der Mikrowellenkomponenten im ADR-Kryostat und AP 2.2 Integration der DAQ mit Messungen am Qubit*

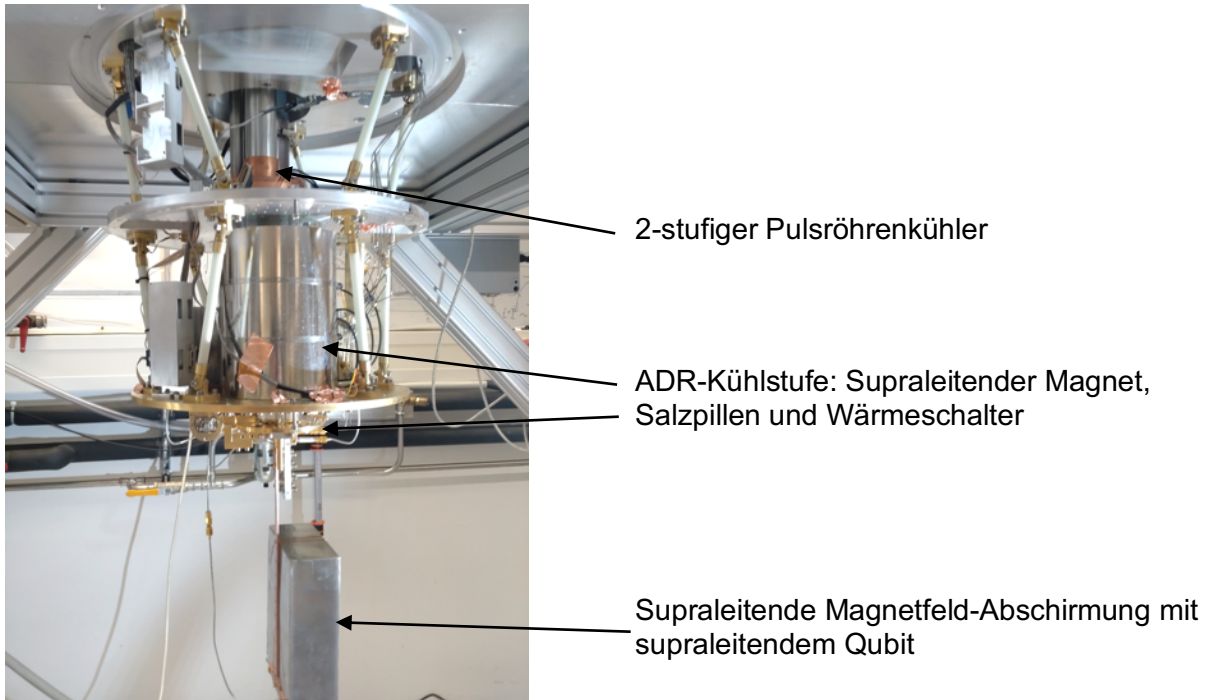


Abb. (4): ADR-Kryostat mit Qubit Abschirmung aus Niob.

Der entwickelte ADR-Kryostat (Abb. (4)) wurde mit den erforderlichen DC- und Mikrowellenleitungen, HEMT-Verstärker, Dämpfungsglieder und Filter zur Kontrolle der supraleitenden Qubits ausgestattet. Es wurden verschiedene Aufhängungen für die supraleitende Niob-Abschirmung entwickelt, installiert und getestet, wobei sich die Niob-Abschirmung, die in AP 1.3 entwickelt wurde, bewährt hat.

#### AP 2.4 Optimierung supraleitender Qubits

Im Arbeitspaket 2.4 wurden verschiedene supraleitende Qubits auf der Basis sogenannter Transmon-Qubits im Reinraum des NSL/KIT hergestellt, bei Raumtemperatur vorcharakterisiert und Messungen bei tiefen Temperaturen in einem Entmischungskryostaten durchgeführt. Für die Messungen bei tiefen Temperaturen, wie in AP1.1 gefordert, wurde der Kryostat mit zusätzlichen Messleitungen und Filtern ausgestattet. Es wurden sowohl spektroskopische als auch zeitaufgelöste Messungen mit der in AP1.2 durch das IPE-KIT entwickelten FPGA-Elektronik durchgeführt. Hierbei spielt, neben der Skalierbarkeit insbesondere die zeitlichen Latenz, d.h. die Zeit zwischen Manipulationspuls, Auslese- und weiteren Pulsen, sowie die Regelungslatenz zwischen Messung, Auswertung und Korrekturpuls für die Nutzbarkeit der Messplattform eine große Rolle. Die entwickelte Lösung erlaubt es schon im aktuellen Entwicklungsstand grundlegende Qubit-Operationen durchzuführen, wie sie z.B. für Lebenszeit- und Kohärenzmessung der Qubits notwendig sind.

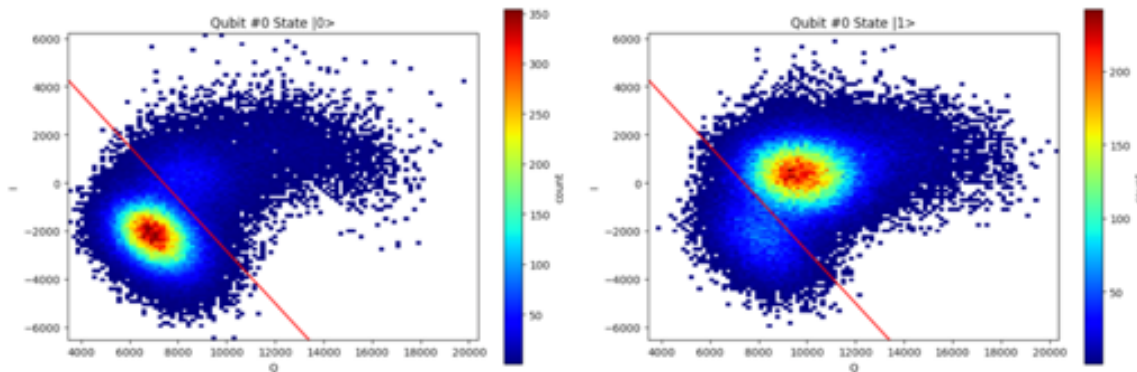


Abb. (5): Single-Shot readout des Qubit Zustands.

In Abbildung (5) ist eine Messung zur Bestimmung des Qubit-Zustands mit einer sog. ‚single shot‘ Methode dargestellt. Hierbei wird eine Anregung des Ausleseresonators von nur wenigen Mikrowellenphotonen eingesetzt, um Grund- und angeregten Zustand des Qubits zu unterscheiden. Die Farbskala in der Darstellung gibt jeweils die Wahrscheinlichkeit an, in welchem Zustand sich ein Qubit befindet, und wird vor der eigentlichen ‚single shot‘ Messung durch eine Vielzahl von Messungen -also statistisch- kalibriert. Die rote Linie wird als (einfaches) Kriterium benutzt, um die jeweilige dispersive Verschiebung des Resonators (in der I-Q Ebene) den Qubit-Zustand zuzuordnen. Diese Messungen mit wenigen Photonen benötigen eine optimierte Messkette mit zusätzlichen parametrischen Verstärkern, um ein ausreichendes Signal-zu-Rauschen Verhältnis zu erhalten. Da diese Messungen auch mit Pulsen im Nano-Sekunden Bereich durchgeführt werden, wird hierfür die von IPE-KIT entwickelte FPGA-Elektronik eingesetzt. Ein Vorteil dieser Plattform ist, dass sie in Echtzeit die Daten analysieren und anhand einfacher Kriterien, wie der in Abbildung (5) dargestellten roten Linie, zwischen den Qubit Zuständen unterscheiden kann, und damit nur einen Strom an Zuständen ( $|0\rangle$  oder  $|1\rangle$ ) an den Benutzer zurückliefert. Insgesamt ermöglicht die ‚single shot‘ readout Methode eine Vielzahl von neuen Möglichkeiten für Messungen und Experimente und kann unter anderem zum aktiven Reset des Qubit-Zustands und damit zum aktiven Kühlen der effektiven Qubit-Temperatur eingesetzt werden.

Am IPE-KIT wurde zu der FPGA-Elektronik ein ‚Analog-Frontend‘ entwickelt das am PHI-KIT an supraleitenden Qubits getestet wurde. Ziel des Frontends ist es, durch einen kompakteren, platinenbasierten Aufbau die Kosten und den Platzbedarf pro Kanal zu reduzieren, sowie erweiterte Möglichkeiten der Signalkonditionierung einzusetzen. Der komplexe Mikrowellen-Schaltungsaufbau wurde in mehreren Iterationen am PHI-KIT getestet, um eine vergleichbare Qualität mit diskreten Aufbauten zu erzielen. Hierfür wurden am PHI-KIT auch dazu mehrere kryogene Messkampagnen durchgeführt.

Am PHI-KIT wurde ein zweiter Messaufbau entwickelt, der zur Vorcharakterisierung von supraleitenden Qubits bei etwa 2,4 Kelvin benötigt wird. Hierfür wurde ein zweistufiger TransMIT ‚PtQUBE‘ Pulsröhrenkühler am PHI-KIT in eine spezielle Vakuumkammer integriert. Die Messungen in dem Kryostat sind vor allem zur Charakterisierung von Josephson-Kontakten mit einer höheren Phasenübergangstemperatur, wie z.B. aus Niob, wichtig. Der Aufbau ist in Abbildung (6, links) gezeigt. Neben dem Kühler enthält der Kryostat Schilde, Thermometrie und Messleitungen.

Im Reinraum des NSL-KIT wurden Josephson-Kontakte auf Basis einer angepassten Niob-Aluminiumoxid-Niob Technologie entwickelt, die in supraleitende Qubits integriert wurden (Abb. 6, rechts unten). Die Strom-Spannungs Kennlinie zeigt das erwartete Verhalten (Abb. 6, rechts oben): Bei  $V = 0$  entwickelt sich ein Suprastrom bis zu einem kritischen Wert ( $I_c$ ), an dem der Kontakt in ein dissipatives Verhalten bei einer Spannung von etwa 2,3 V über geht.

Bei der Reduzierung des Stromes zeigt sich ein ausgeprägtes hysteretisches Verhalten als Maß für den niedrigen inneren dissipativen Verlust des Kontakts (blaue Kurve). Weitere Charakterisierungen wurden in dem PtQUBE ADR-Kryostaten vorgenommen.

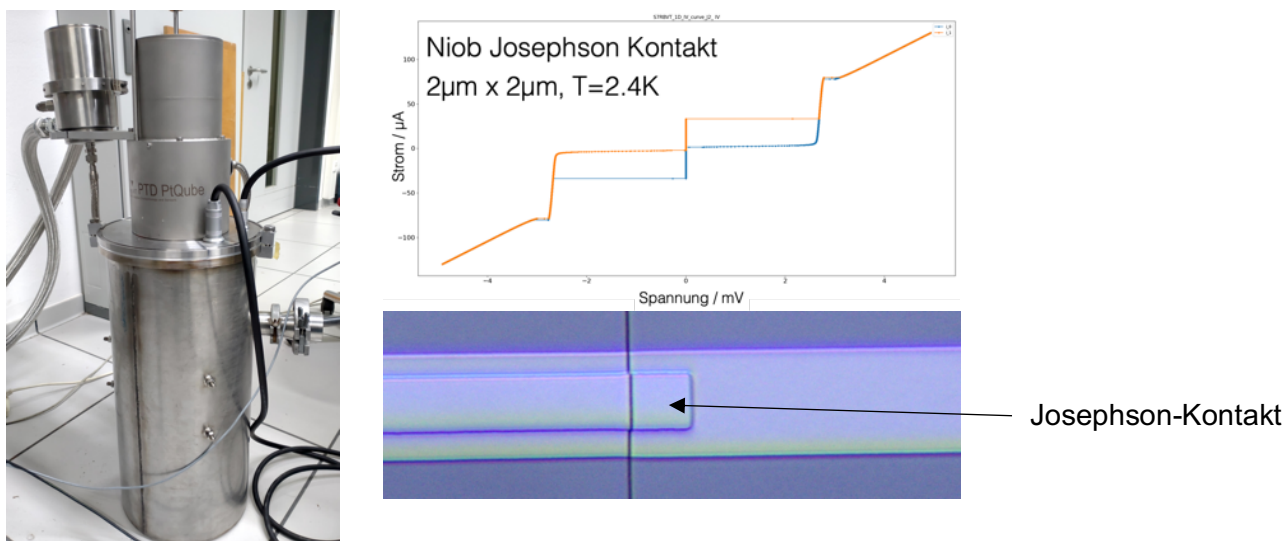


Abb (6) PtQUBE Pulsetube-Kryostat zur Vorcharakterisierung von Josephson Kontakten bei etwa 2,4 Kelvin.

### AP 3 Demonstration der Basisplattform, Erweiterungen und Optimierungen

#### AP3.1 Erweiterung der Software QKIT um Kryostat-Kontrollmechanismen

Die Messsoftware QKIT (Abb. (7)) wurde um eine Kryostat-Kontrollsoftware erweitert. Hierbei handelt es sich im eigentlichen nicht um eine Erweiterung, sondern um ein separates Programm (,TIP', Temperature-Information-Program), das durch QKIT gesteuert werden kann. TIP wird in einer separaten Instanz ausgeführt und kann somit zeitkritische Aufgaben, wie z.B. die Steuerung der Kryostatentemperatur, unabhängig von der Ausführung von Gate-Operationen an Qubits vornehmen. TIP ist darauf ausgelegt, in einem vollständig nebenläufigem Programmierparadigma Druck, Temperatur, Drehzahl, etc. in separaten Zyklen periodisch auszulesen und durch eine PID Logik anhand von Kontrollparametern zu stabilisieren. Die Kommunikation mit TIP erfolgt ,threadsafe' und ist skalierbar über TCP/IP und der offen verfügbaren Programmbibliothek ZMQ. TIP enthält ein webbasiertes Konfigurationsinterface, mit dem Parameter im laufenden Betrieb geändert werden können, und Treiber für die beschaffte Elektronik von Stanford Instruments.

Zur grafischen Darstellung der Messwerte wurde ein Web-Frontend entwickelt, das die erhobenen Messwerte dynamisch in Graphen darstellt. Als Alternative steht hier auch eine Integration in die offen verfügbare kommerzielle Timetracing-Software Grafana zur Verfügung, siehe Abbildung (8a).

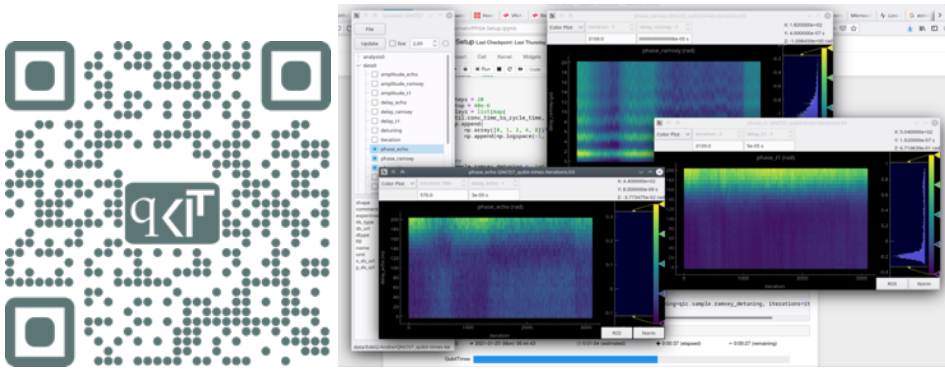


Abb (7) QKIT Software zur Kontrolle komplexer Quantenexperimente.

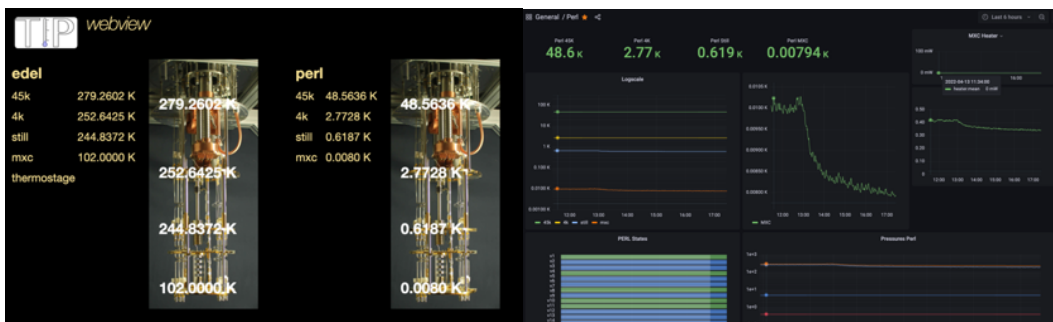


Abb. (8a) TIP Software zur Kontrolle von tieftemperatur Kryostaten. Dargestellt sind die Web-Schnittstellen TIPwebview und Grafana.

Zur Ausführung von Quantenalgorithmen durch QKIT wurde eine Schnittstelle zur Software QiCode erweitert, die es erlaubt, komplexe Quantenalgorithmen in einer Python-artigen Beschreibungssprache abzubilden. Diese werden von der am IPE-KIT entwickelten FPGA-basierten Elektronik abgespielt und so die Mikrowellenpulsfolgen zur Manipulation, bzw. der Ermittlung des Qubitzustandes erzeugt, siehe in Abb. (8b).

```
[148]: with QiJob() as multi_ramsey:
    q = QiCells(len(sample))
    results = [QiResult("result") for _ in q]
    length = QiTimeVariable()
    with ForRange(length, 0, t_max, t_step):
        for cell, result in zip(q, results):
            ql.jobs.PiHalfPulse(cell, detuning=detuning)
            Wait(cell, length)
            ql.jobs.PiHalfPulse(cell, detuning=detuning)
            ql.jobs.Readout(cell, save_to=result)
            ql.jobs.Thermalize(cell)

exp = multi_ramsey.create_experiment(qic, sample, averages=averages)
m = Measure_td(qic.sample, exp.readout)
```

Abb. (8b): QiCode: Einfache und intuitive Beschreibung der Experimente

Die Entwicklung von QiCode ist Teil der Kooperation von PtQUBE und wurde maßgeblich am IPE-KIT für die Integration in QKIT und ggf. anderen Qubit-Steuerssoftwares entworfen.

### AP 3.2/3.3 Demonstration des Qubit Readout

Zur Demonstration der Kryostaten-Plattform und Elektronik wurde ein Qubit-Chip (siehe AP1) in dem ADR-Kryostat eingebaut und auf etwa 40 mK abgekühlt. Durch Mikrowellenspektroskopie wurden die Zustände des Qubits mithilfe des beschafften Netzwerkanalysators bestimmt (Abb. (9, links)). Diese stimmen mit den vorcharakterisierten Werten aus Messungen in einem Entmischungskryostaten überein. D.h. die hohen Magnetfelder (mehrere Tesla) des ADR konnten auf eine zufriedenstellende Schwelle (unterhalb einer oberen Grenze von etwa 100  $\mu$ T) abgeschirmt werden.

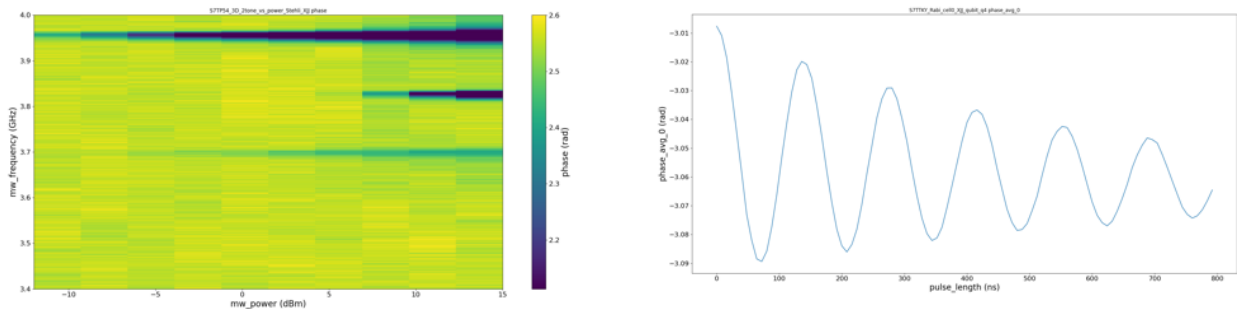


Abb. (9): (a) 2-Tone Spektroskopie eines Transmon Qubits in dem PtQUBE ADR Kryostat. Die oberste Linie entspricht der Übergangsfrequenz für  $|0\rangle$  nach  $|1\rangle$ . (b) Rabi-Oszillationen gemessen bei etwa 40mK im ADR Kryostat.

Zeitaufgelöste Messungen wurden mithilfe der Elektronik des IPE-KIT durchgeführt und sind in Abbildung (9, rechts) gezeigt. Hierbei wurde analog zum Arbeitspaket AP1.2 Rabi-Oszillationen durch Anlegen von Mikrowellenpulsen beobachtet. Die Energierelaxationszeit  $T_1$  und die Kohärenzzeit  $T_2$  wurden mit etwa 1  $\mu$ s gemessen. Dies ist signifikant kleiner als im Entmischungskryostaten. Wahrscheinliche Ursachen sind hier eine unzureichende Filterung und Thermalisierung der Qubit-Signalleitung bei der ADR-Temperaturstufe.

Insgesamt sind die Messungen ein Erfolg, da sie das Hauptprojektziel erreichen und bestätigen, dass aus Aluminium hergestellte supraleitende Qubits mit einem ADR-Kryostaten gemessen werden können.

#### Wissenschaftliche Publikationen, die durch das Teilprojekt ermöglicht wurden:

- **Giant Two-Level Systems in a Granular Superconductor**  
Kristen, M.; Voss, J. N.; Wildermuth, M.; Bilmes, A.; Lisenfeld, J.; Rotzinger, H.; Ustinov, A. V. (2024) Physical Review Letters, 132 (21), 217002.
- **Quantum emulation of the transient dynamics in the multistate Landau-Zener model**  
A. Stehli, J. Brehm, T. Wolz, A. Schneider, H. Rotzinger, M. Weides & A.V. Ustinov (2023) npj Quantum Information vol. 9, 61.
- **Random telegraph fluctuations in granular microwave resonators**  
Kristen, M.; Voss, J. N.; Wildermuth, M.; Rotzinger, H.; Ustinov, A. V. (2023) Applied Physics Letters, 122 (20), 202602.

- **Eliminating Quantum Phase Slips in Superconducting Nanowires** Voss, J. N.; Schön, Y.; Wildermuth, M.; Dorer, D.; Cole, J. H.; Rotzinger, H.; Ustinov, A. V. (2021) ACS nano, 15 (3), 4108–4114.
- **Coherent superconducting qubits from a subtractive junction fabrication process** Stehli, A.; Brehm, J. D.; Wolz, T.; Baity, P.; Danilin, S.; Seferai, V.; Rotzinger, H.; Ustinov, A. V.; Weides, M. (2020) Applied physics letters, 117 (12), 124005.

### III. Kooperationsübersicht des Verbundes

Koordinator: Dr. Hannes Rotzinger, Physikalisches Institut, Karlsruher Institut für Technologie, Karlsruhe

#### Verbundpartner

- Karlsruher Institut für Technologie, Physikalisches Institut (PHI-KIT), Prof. A.V. Ustinov (Projektleiter), Karlsruhe
- Karlsruher Institut für Technologie, Institut für Prozessdatenverarbeitung und Elektronik (IPE-KIT), Prof. Dr. Marc Weber, Karlsruhe
- TransMIT GmbH, Center for Adaptive Cryotechnology and Sensors, Prof. Dr. Andre Schirmeisen Gießen

#### Unterauftragnehmer

- Entropy GmbH, Doreen Wernicke, München

#### Übersicht

Das Projekt PtQUBE vereinigt vorhandenes Know-How im Bereich der supraleitenden Qubits (PHI-KIT) mit Technologien im Bereich der Elektronik (IPE-KIT) sowie Kryotechnik (TransMIT GmbH). Das Gesamtsystem PtQUBE vereinigt vier Hauptkomponenten: Den Kryostaten mit Pulsröhrenkühler (I) und ADR-Kühlstufe (II), eine schnelle FPGA-basierte Elektronik zur Qubit-Manipulation und Auslese (III) sowie supraleitende Qubits und eine Messumgebung, um diese bei milli-Kelvin Temperaturen zu betreiben (IV).

Während der Laufzeit des Vorhabens ist es der TransMIT GmbH erfolgreich gelungen, einen neuen Pulsröhrenkühler für die Kryostatenplattform zu simulieren, designen und herzustellen. Der neue Kühler zeichnet sich durch eine gesteigerte Kühlleistung bei 4 Kelvin aus und wurde sowohl für zeitoptimierte Abkühlvorgänge als auch im Hinblick auf eine variable Leistungsaufnahme des Gesamtsystems entwickelt. Die Kryoflüssigkeiten-freie Vorkühlstufe für die im Verbund entwickelte Qubit-Plattform ist eine der zentralen Komponenten des Gesamtsystems.

Die zweite elementare Komponente des Kryostates ist die Adiabatische Entmagnetisierungsstufe, die durch die Firma Entropy GmbH/München als Unterauftragnehmer entwickelt wurde. Bei dieser Kühltechnik werden magnetische Felder benutzt um auf Temperaturen unterhalb von 50 milli-Kelvin zu gelangen, und ist somit ebenso frei von kryogenen Flüssigkeiten. Da die magnetischen Felder für die Qubit-Operation starke Störungen darstellen, wurde in Zusammenarbeit des PHI-KIT Abschirmungen entwickelt die effektiv die supraleitenden Qubits schützen und kompatibel mit der Kühltechnik sind.

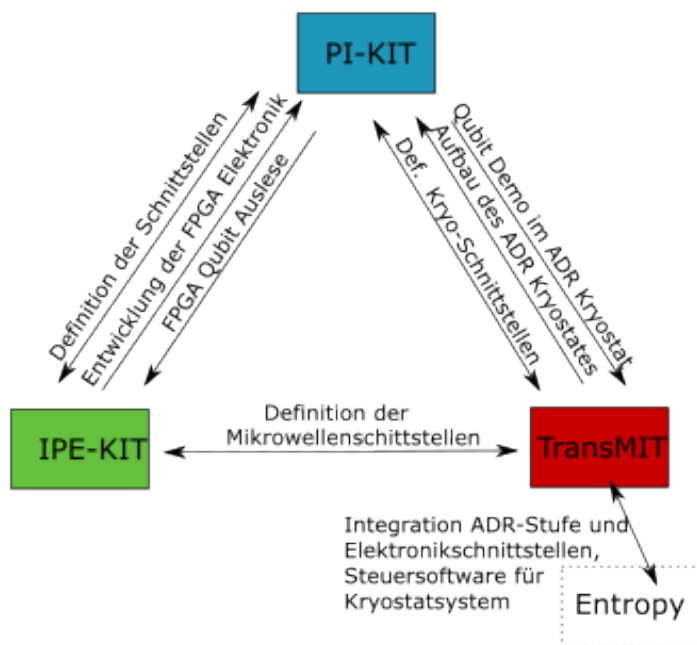
Der Aufbau des Kryostaten erfolgte in Zusammenarbeit zwischen TransMIT und Entropy und wurde für die weitere Entwicklung am PHI-KIT aufgestellt.

Die schnelle FPGA-basierte Elektronik wurde am IPE-KIT in Zusammenarbeit mit dem PHI-KIT entwickelt und getestet. Kernelement der Entwicklung ist neben einer präzisen Synchronisation mehrerer Kanäle, kleiner Puls-Latenz und flexiblem digitalen Aufbau auch die Entwicklung eines Analogboards für die notwendige hochfrequente Signalkonditionierung. Alle Komponenten wurden ausgiebig bei Raumtemperatur getestet und optimiert. In mehreren Messkampagnen wurden zudem supraleitende Qubits mit der Elektronik manipuliert und ausgelesen.

Aufgabe des PHI-KIT im Gesamtverbund war neben der Zusammenführung der Entwicklungen aller Projektpartner, die Durchführung der Qubit-spezifischen Teilaufgaben. Dies umfasst u.a. die Entwicklung der supraleitenden Qubits und der kryogenen Messumgebung sowie die Durchführung der Messungen am Demonstrator.

In enger Zusammenarbeit mit den Projektpartnern wurden mehrere Softwarepakete zur Steuerung der Kryostatenplattform sowie zur Durchführung der Experimente mit supraleitenden Qubits entworfen und implementiert.

## Verbundstruktur



## Fazit

Die Bearbeitung des übergeordneten Themas des Forschungsverbundes führte zu einer engen Zusammenarbeit sowie zu einem intensiven Austausch der Verbundpartner. Jährlich fand ein gemeinsames Treffen aller Kooperationspartner statt, das während der Corona Pandemie online durchgeführt wurde. Im Vordergrund stand hierbei neben dem Stand der Arbeiten an den einzelnen Teilprojekten, auch der Austausch technischer Details und die Ergebnisse wissenschaftlicher Experimente. Gemeinsame Teilprojekte wurden zudem in direktem Austausch der einzelner Kooperationspartner besprochen.

## Kurzbericht

zum Teilvorhaben „Supraleitende Qubits für ADR-Kryostate“  
im Verbundprojekt „Plattform für Tieftemperatur Qubit Experimente (PtQUBE)“

**Zuwendungsempfänger:** Prof. Dr. Ustinov, Karlsruher Institut für  
Technologie  
**Förderkennzeichen:** 13N15016  
**Laufzeit des Vorhabens:** 01.02.2020 – 31.01.2024  
**Berichtszeitraum:** 01.02.2020 – 31.01.2024

### Aufgabenstellung:

Ziel des beantragten Teilvorhabens ist es, eine universelle Tieftemperatur-Qubit Plattform für Adiabatische Entmagnetisierungs-Kryostate (ADR) zu entwickeln, die für den Betrieb von supraleitenden Qubits geeignet ist.

Ermöglicht wird diese Entwicklung durch die enormen Fortschritte, die in der Entwicklung von künstlichen zwei-Niveau Systemen (Qubits) auf der Basis von supraleitenden oder halbleitenden Schaltkreisen in den vergangenen zwei Dekaden erzielt wurden und unter anderem die Lebenszeiten um mehrere Größenordnungen verlängert haben. Bei diesem Teilvorhaben wurde ein besonderes Augenmerk auf die magnetische Isolierung der supraleitenden Qubits gelegt, da die Kaltstufe des ADR-Kryostaten Magnetfelder benötigt, die weit oberhalb der kritischen Magnetfelder aktueller supraleitender Qubits sind. Es wurden sowohl supraleitende als auch magnetische Abschirmtechniken auf ihr Potenzial untersucht. Im Hinblick auf das Fernziel, eines leicht einsetzbaren, supraleitenden oder halbleitenden Quanten-Computers, ist es mit der vorgeschlagenen Plattform möglich, dem Anwender eine einfache, Kryoflüssigkeiten-freie, kryogene Qubit-Plattform bereitzustellen.

### Ablauf:

Das Projekt gliedert sich in drei Arbeitspakete. Im ersten Arbeitspaket wurden supraleitende Qubit-Schaltkreise entworfen und im Reinraum des KIT hergestellt. Diese wurden mithilfe eines konventionellen Kryostaten bei milli-Kelvin Temperaturen charakterisiert und iterativ verbessert. Parallel dazu wurde in dem Arbeitspaket in Zusammenarbeit mit dem IPE-KIT die Anforderungen an eine schnelle Elektronik definiert, die durch die Eigenschaften supraleitender Qubits gegeben sind. In Zusammenarbeit mit der Entropy GmbH und der TransMIT GmbH wurde ein Kryostat Basis der Adiabatischen Entmagnetisierungstechnologie (ADR) entworfen. Zur Abschirmung der Qubits vor den entstehenden großen Magnetfeldern des ADR wurden sowohl eine magnetische, als auch eine supraleitende Abschirmdose entwickelt und hergestellt.

Durch die Corona-Pandemie kam es bei der Fertigung des Kryostaten zu Verzögerungen auf Seite der Hersteller, weshalb Teile der Arbeitspakete 2 und 3 vorgezogen wurden. So wurden im Verlauf des Projekts die Design- und Fabrikationsmethoden der Qubits verbessert wie auch erweiterte Kontrollmechanismen für ADR und andere Kryostaten entwickelt und implementiert.

Mit dem Eintreffen des ADR-Kryostaten am PHI-KIT in der dritten Phase des Projekts wurden kryogene Mikrowellenkomponenten wie z.B. Koaxialleitungen, Dämpfer und Verstärker in den Kryostaten integriert und Testmessungen vorgenommen.

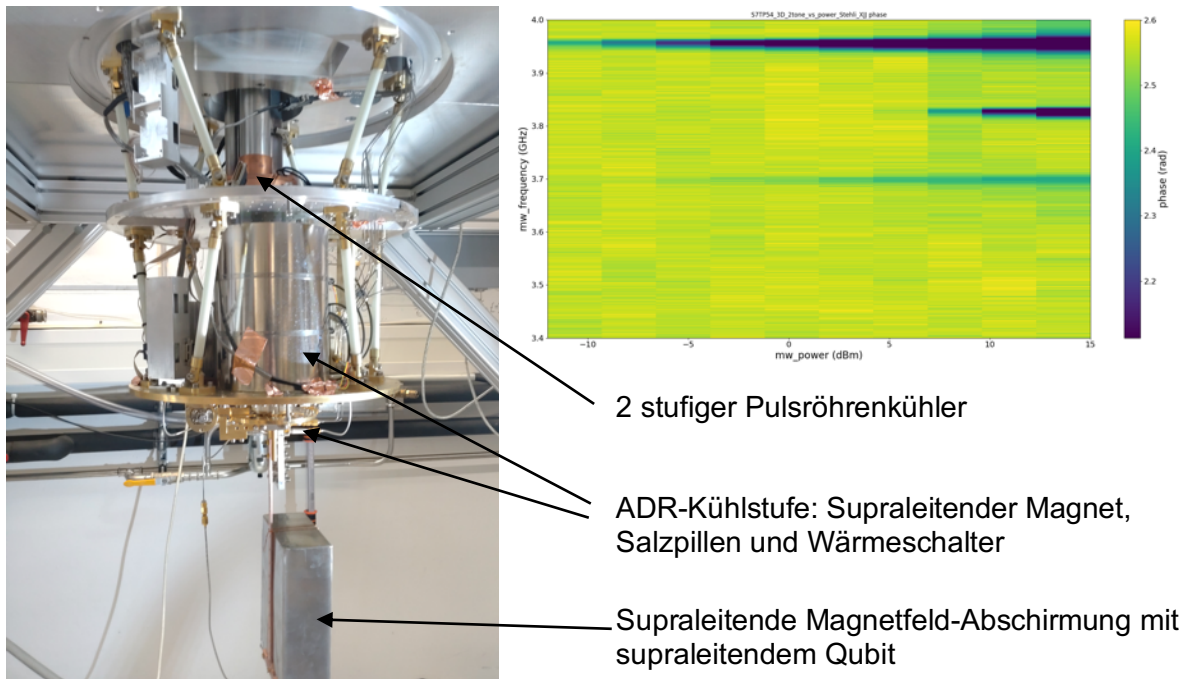


Abb. (1) Entwickler ADR-Kryostat mit supraleitender Abschirmbox (links) und Leistungsspektroskopie des supraleitenden Qubits (rechts oben). Zu sehen sind die diskreten Qubit-Übergänge, von oben nach unten:  $|0\rangle \rightarrow |1\rangle$ ;  $1/2 (|0\rangle \rightarrow |2\rangle)$  und  $1/3 (|0\rangle \rightarrow |3\rangle)$ .

## Ergebnisse:

Das Projektziel, die Entwicklung eines einfach zu bedienenden, Kryoflüssigkeiten-freien Kryostaten, der sich zum Betrieb von supraleitenden Qubits eignet, wurde in allen Hauptpunkten erreicht.

Unter den erschwerten Bedingungen der Corona Pandemie konnte der Kryostat mit dem Verbundpartner TransMIT aufgebaut und in Karlsruhe in Betrieb genommen werden. In Zusammenarbeit mit dem Unterauftragnehmer Entropy wurde am PHI-KIT eine effektive Magnetfeldabschirmung für die magnetische ADR-Stufe entwickelt und bei milli-Kelvin Temperaturen erfolgreich getestet.

In Zusammenarbeit mit dem IPE-KIT wurde eine für supraleitende Qubits angepasste schnelle Pulselektronik entwickelt und mit zuverlässig guten Ergebnissen an verschiedenen supraleitenden Qubits getestet. Drei mächtige Softwarepakete zur Durchführung von Qubit-Operationen („QKIT“, „QiCode“ (mit IPE-KIT)) und zur Steuerung und Stabilisierung von Kryostaten („TIP“) wurden entwickelt und implementiert. Aufbauend auf diesen Entwicklungen wurden Methoden zur ‚single shot‘ Auslese supraleitender Qubits entwickelt und eingesetzt.

Der erfolgreiche Abschluss des Projekts wurde durch die Integration und Charakterisierung supraleitender Qubits in den ADR-Kryostaten und der Messung von Rabi-Oszillationen belegt.