1. Darstellung des Projektergebnisses

1.1. Ursprüngliche Aufgabenstellung des Vorhabens

Im Rahmen des Vorhabens wurden neue Schaltungskonzepte grundlegend erforscht und demonstriert, die einen großen Teil der bisher genutzten komplexen und zum großen Teil kommerziell verfügbaren Ansteuer- und Messinfrastruktur von Raumtemperatur auf niedrigere Temperaturstufen integrieren. Der Mehrwert zur etablierten aber sehr komplexen Verdrahtung liegt im wesentlich geringeren Aufwand des Systemaufbaus und einem geringeren Bedarf an kommerziellen Komponenten. Im Wesentlichen war geplant:

1. eine AQFP Zellbibliothek mit verifizieren Grundgattern zu entwickeln und zu testen,

2. simulierte und gemessene Zellcharakteristiken zu vergleichen und die Übereinstimmung im zeitlichen Verhalten und in den Signalamplituden zu überprüfen,

3. gemeinsamer Funktionstest aus Qubit und AQFP-Grundschaltungen, dabei darf sich die Performance des Qubits (T1- und T2-Zeit) nicht oder nur wenig verschlechtern.

1.2. ursprüngliche Aufgabenstellung sowie wissenschaftlicher und technischer Stand,

Heutige Quantencomputing-Demonstratoren besitzen einen Schaltkreis mit einigen Qubits. Dieser Schaltkreis wird gekühlt und alle elektrischen Verbindungen werden mittels einer sehr aufwendigen Verkabelung aus dem Kryostaten bis zur Raumtemperatur geführt. Eine gekühlte Ansteuerelektronik kommt bisher nicht zum Einsatz. Gekühlte Halbleiterschaltungen besitzen entweder ein schlechtes Signal-Rausch-Verhältnis oder eine zu große elektrische Verlustleistung. Die supraleitende Einzelflussquantenelektronik ist eine sehr ausgereifte Schaltungsfamilie für digitale Schaltungen bei 4 Kelvin. Allerdings ist auch hier die Verlustleistung noch zu hoch, um in unmittelbarer Umgebung zu einem supraleitenden Qubit zu arbeiten.

Ausschließlich AQFP Schaltungen besitzen das notwendige Potential bezüglich Geschwindigkeit und Energieverbrauch, um direkt zur Ansteuerung von Qubits eingesetzt zu werden. Alle alternativen Lösungsansätze basieren immer auf einer räumlichen Trennung der Ansteuerung vom eigentlichen Quantenprozessor. Aus diesem Grund sind sie nicht skalierbar und kommen für einen Quantencomputer mit sinnvoller Komplexität nicht in Frage.

2. Ablauf des Vorhabens

Es wurde eine neue Zellbibliothek entwickelt und gemeinsam mit der Technologie des IPHT Jena wurden ersten Schaltkreise entwickelt. Im Gegensatz zum Stand der Technik war das Ziel die Technologie und die Chipdesigns so auszulegen, dass ein Betrieb der Schaltungen in direkter Umgebung des Qubits möglich ist. Bisher wurden AQFP Schaltungen nur bei Temperaturen von 4K demonstriert. Im Rahmen des Projektes konnte erstmals der Nachweis erbracht werden, dass unsere neuen Schaltungen auch bei Temperaturen unterhalb 100 mK funktionstüchtig sind.

3. wesentliche Ergebnisse

Es gibt drei wesentliche Ergebnisse. Es konnte erstmals gezeigt werden, dass man mittels AQFP Schaltungen eine technische Möglichkeit hat, komplexe Elektronikschaltungen bei Temperaturen unterhalb von 100 mK zu betreiben. Weiterhin konnte nachgewiesen werden, dass der Betrieb der Schaltungen die Funktion des Qubits nicht beeinträchtigt. Und als drittes wesentliches Ergebnis konnte gezeigt werden, dass die Schaltfunktion auch bei Taktfrequenzen von 2 GHz noch stabil sichergestellt werden kann.

Zum Halbzeitmeilenstein wurde der Nachweis der Funktion bei 4K und mit Frequenzen von 100 kHz erbracht. Zum Projektende wurde eine minimale Temperatur von 80mK mit einer Frequenz von 2 GHz bei einer Fehlerrate BER<10^{-15} erreicht. Die entwickelten Schaltungen bieten ein einmalig gutes Energy-Delay-Product (EDP) von 2 aJ x ps (15 zJ x 125 ps). Dieser Wert ist etwa 10.000-fach kleiner als es moderne Halbleitertechnologien bieten.

Damit ist nachgewiesen, dass die hybride Multi-Chip-Integration, aber zukünftig auch die monolithische Integration von Qubit Prozessoren und AQFP-Ansteuerschaltungen technisch möglich ist. Damit wird erstmals ein deutlicher Fortschritt in der Skalierung der heutigen Quantencomputer möglich.

Anlage 2, Teil II

1. Zuwendung sowie erzielte Ergebnisse

1.1. Durchgeführte Arbeiten im Rahmen des Vorhabens

In SiDQuP wurden erstmalig energiearme supraleitende Digitalschaltungen und kryogene Halbleiterschaltungen miteinander kombiniert. Die Schaltungen wurden durch die Projektpartner gefertigt und das Potential bzgl. Skalierbarkeit und Integration anhand einer kryogenen, rauschfreien Energieniveaueinstellung bewertet. Die Schaltungen dienen zur Erzeugung von Pulsfolgen für Qubitoperationen sowie einer gepulsten, synchronisierten Multiplexauslese (MUX) für supraleitende Qubits. Die innovativen Technologien wurden in den anderen Teilprojekten erforscht und in diesem Teilvorhaben durch Design-Kits und Zellbibliotheken abgebildet und es wurden entsprechende Schaltungselemente entwickelt. Darüber hinaus kommen Testaufbauten und Versuche für neue Integrationsmethoden der Schaltungen mit der QPU und eine Modellierung der Schaltungsfunktion zum Einsatz. Im Gesamtvorhaben wurde ein automatisches kryogenes Messsystems aufgebaut und erfolgreich in Betrieb genommen. Auf dieser Basis wurden die Designs evaluiert und die Modellparameter angepasst. Nachfolgend wird eine Betrachtung der durchgeführten Arbeiten kategorisch und nicht zwingend entsprechend der Arbeitspakete gemacht.

Projektkoordination

Das CiS Forschungsinstitut hat einen wesentlichen Beitrag zu Gesamtvorhaben geleistet. Die Durchführung des Verbundprojekts wurde durch das Leibniz IPHT koordiniert. Das CiS Forschungsinstitut hat entsprechende Zuarbeiten zur Projektkoordination geleistet, die darauf ausgerichtet waren, die Kommunikation unter den Projektpartnern zu unterhalten und zu stärken. Das CiS Forschungsinstitut unterhielt regelmäßigen Kontakt zu den Projektpartnern und im notwendigen Maße auch zum Projektträger. Tabelle 1 zeigt eine Übersicht der Aktivitäten in diesem Zusammenhang.

Tabelle 1: Übersicht zu den Tätigkeiten des CiS in der Funktion als Verbundprojektkoordinator

Ziel	Umsetzung
• Kommunikation	• Enge Kommunikation zu den Projektpartnern, Abstimmungen zu Designregeln und zu technologischen Fragen • Teilnahme an Video- und Telefonkonferenzen und sowie Projekttreffen • Cloudlösung als zentrale Ablage für Daten geschaffen
• Outreach	• Erstellung und Pflege regelmäßiger News und Posts auf unserer Webseite • Informationen zu Projektinhalten veröffentlicht über Pressemitteilung und soziale Medien • Teilnahme an nationalen und internationalen Konferenzen und Präsentation der Ergebnisse
• Inhaltliche Ideengebung	• Diskussion der Anforderungen der relevanten Applikationen im Quantencomputing und Ableitung möglicher konkreter Systemkonzepte und Schaltungsvarianten • Begleitende Literaturrecherche

Design

Die bereits bestehenden Quantencomputing-Demonstratoren besitzen einen Schaltkreis mit einigen Qubits. Dieser Schaltkreis wird gekühlt und alle elektrischen Verbindungen werden mittels einer sehr aufwendigen Verkabelung aus dem Kryostaten bis zur Raumtemperatur geführt. Eine gekühlte Ansteuerelektronik kommt bisher nicht zum Einsatz. Gekühlte Halbleiterschaltungen besitzen entweder ein schlechtes Signal-Rausch-Verhältnis oder eine zu große elektrische Verlustleistung [1]. Die supraleitende Einzelflussquantenelektronik ist eine sehr ausgereifte Schaltungsfamilie für digitale Schaltungen bei 4 Kelvin. Allerdings ist auch hier die Verlustleistung noch zu hoch, um in unmittelbarer Umgebung zu einem supraleitenden Qubit zu arbeiten [2]. Ausschließlich Adiabatische Quantum Fluss Parametron (AQFP) Schaltungen besitzen das notwendige Potential bezüglich Geschwindigkeit und Energieverbrauch, um direkt zur Ansteuerung von Qubits eingesetzt zu werden. Alternative Lösungsansätze basieren immer auf einer räumlichen Trennung der Ansteuerung vom eigentlichen Quantenprozessor. Aus diesem Grund sind sie nicht skalierbar und kommen für einen Quantencomputer mit sinnvoller Komplexität nicht in Frage.

Das CiS Forschungsinstitut entwickelte im Rahmen des Projektes eine neue innovative Lösung unter Anwendung der AQFP Schaltungstechnik. Verschiedene Elektroniktechnologien aus vier unterschiedlichen Domänen müssen für einen funktionierenden Quantencomputer miteinander verbunden werden. Das Qubit besitzt dabei die geringste Schaltenergie. Auf der anderen Seite stellt die Qubit-Technologie genau die Zielplattform für Quantencomputing dar. Die Zieltechnologie für das Qubit ist die supraleitende Aluminium-Technologie mit Al-Al_2O_3-Al Josephson Kontakten in Schatten-Bedampfungstechnik. Diese Technologie wird im Rahmen des Projektes am IPHT Jena weiterentwickelt und für die Demonstratoren eingesetzt. Die elektrische Schnittstelle zum Qubit unterliegt ganz besonderen Herausforderungen. Das CiS Forschungsinstitut hat ein Top-Level Konzept entwickelt und in Simulationen umfangreich analysiert und bewertet. Dabei kommen einfache AQFP Schaltungen zum Einsatz. Gemeinsam mit den Partnern wurden die Randbedingungen für die Herstellungstechnologie am IPHT Jena abgestimmt. Wir haben ein Verilog A Verhaltensmodell definiert und mit ersten Annahmen über den Herstellungsprozess konfiguriert. Das entwickelte Konzept wird im Rahmen des Projektes durch Experimente evaluiert.

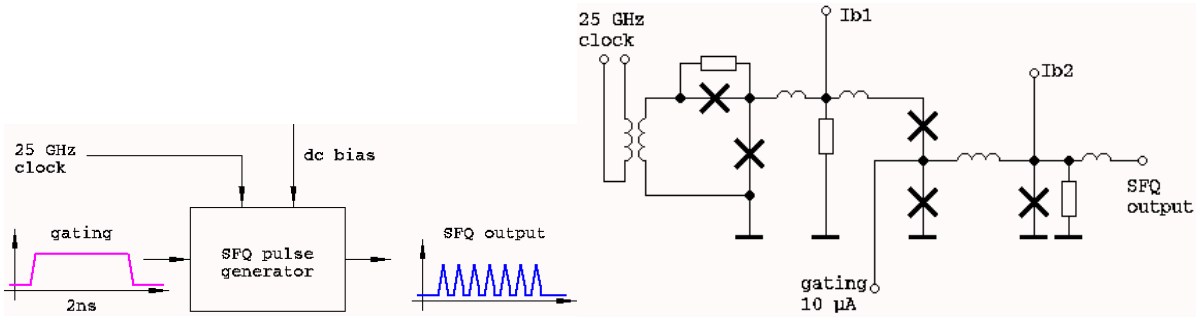


*Abbildung 1: **Grundprinzip für die Erzeugung synchroner Impulsfolgen. Ein externes Taktsignal gibt die Impulsfrequenz vor. Mit einem dc-Stromsignal am Eingang wird die Erzeugung der SFQ-Impulse am Ausgang gesteuert.***

In Abbildung 1 ist die Grundschaltung für die Erzeugung von synchronen Single Flux Quantum (SFQ) Impulsfolgen dargestellt. Die Schaltung benötigt 5 Josephson Kontakte und drei Widerstände zur Dämpfung. In der durchgeführten Simulation wurden kritische Ströme von 50 µA verwendet. Für die Schaltungen des ersten Test-Runs des IPHT wurden Josephson Kontakte mit kritischen Strömen von 10 µA und 20 µA verwenden.

Nach der grundsätzlichen Funktion der Einzelschaltungen muss auch die Skalierbarkeit für eine spätere Integration in einen Quantencomputer von sinnvoller Komplexität möglich sein. Im Gesamtkonzept wurden dabei die technologischen und die elektrischen Kenngrößen bewertet und eine Festlegung getroffen. Die Ansteuerung des Qubits mit Impulsfolgen erfolgt zunächst mit einem direkt gekoppelten externen Pattern Generator. Als zweite Variante wird die Impulsfolge indirekt durch einen externen Pattern Generator in eine AQFP Pufferschaltung kopiert und dann durch eine AQFP Schnittstelle an das Qubit weitergegeben. Solche Schaltungen erfordern eine höhere Komplexität und wurden im Rahmen dieses Projektes nicht untersucht. Für die erste Schaltung wurden nur 10 AQFP Zellen, mit einer maximalen Taktfrequenz 1 GHz, betrieben. Die Erzeugung der Taktsignale erforderte aufwendige externe Generatoren. Dafür wurde im Projekt die gekühlte Halbleiterschaltung entwickelt und getestet. Die AQFP Pufferschaltung kann zukünftig um eine Rückführung der Daten erweitert werden, um längere Impulsfolgen mit hoher Frequenz erzeugen zu können. Die AFQP-Schaltungen sind dafür ausgelegt, bis zu einer Taktfrequenz von 5 GHz korrekt zu funktionieren. Aufgrund der im Projekt vorhandenen Messtechnik war der experimentelle Nachweis nur bis 4 GHz möglich. Es ist aber davon auszugehen, dass die korrekte Funktion auch bei 5 GHz noch möglich ist.

Die Ansteuerung mit Impulsfolgen kann dabei nicht direkt durch eine AQFP Zelle erfolgen, da die Zelle nicht in der Lage ist Energieimpulse zu erzeugen. Dafür wird ein AQFP-to-SFQ Konverter verwendet. Beide Schnittstellenschaltungen sind in Abbildung 2 dargestellt.

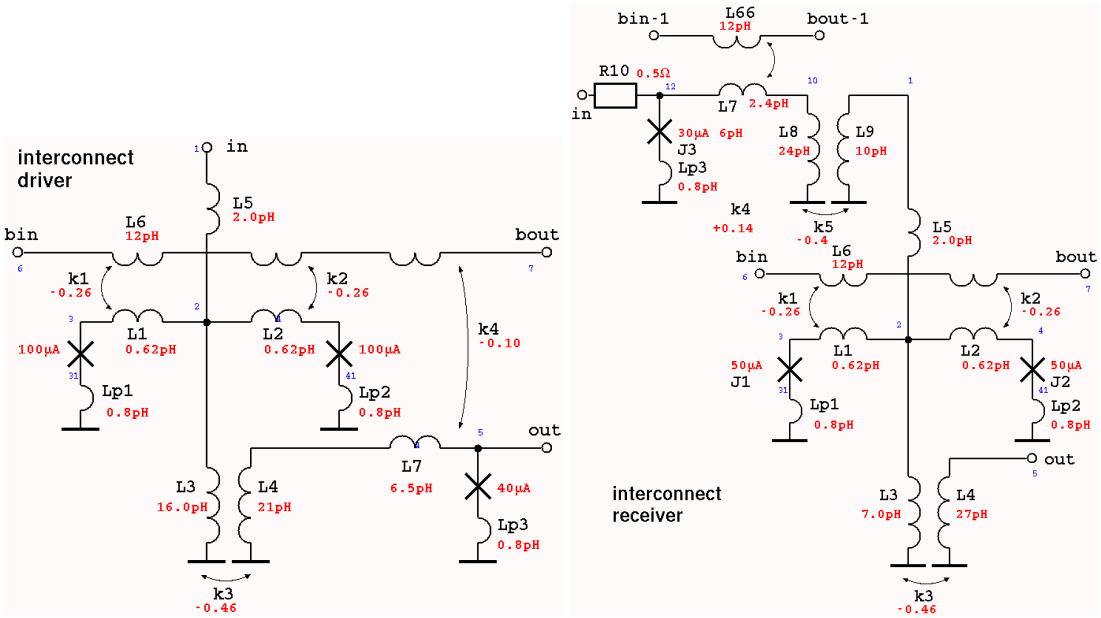


*Abbildung 2: **Schaltungen für die Schnittstellen von AQFP auf SFQ Logik und von SFQ auf AQFP Logik. Die Interfaceschaltungen besitzen jeweils eine kleine Schleife L7 mit einem Josephson Kontakt. Dieser Kontakt arbeitet nicht im adiabatischen Modus und erzeugt bzw. empfängt den SFQ Impuls.***

Die entscheidende Voraussetzung für die Operation bei sehr tiefen Temperaturen ist dabei die elektrische Verlustleistung. Eine Funktion bei 4 K ist dabei immer gegeben. Für eine Taktfrequenz von f_{clock}=25 GHz kann man abschätzen, dass eine statische Verlustleistung vom ca. 10 nW pro Kanal entsteht (I_c = 50µA).

Die hier abgeschätzte Verlustleistung erlaubt also auch den Betrieb bei Temperaturen deutlich unterhalb von 4 Kelvin. Die AQFP-Interfaceschaltungen zwischen Qubits und Raumtemperatur-Steuerelektronik können grundsätzlich auch bei sehr tiefen Temperaturen unter 100 mK betrieben werden.

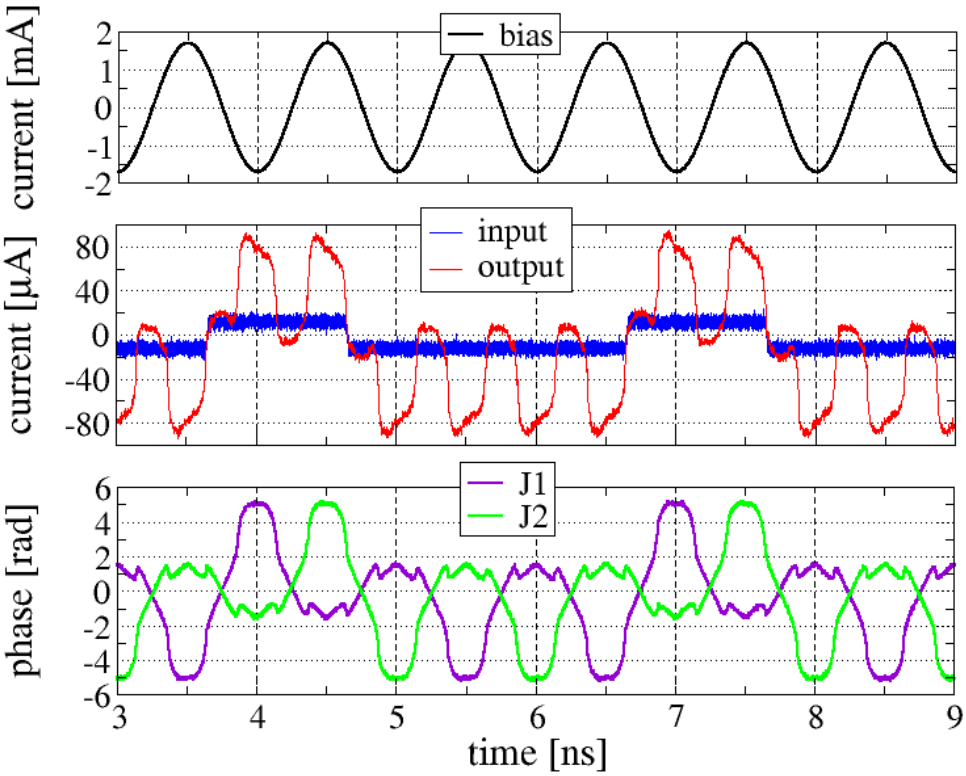


*Abbildung 3: **JSpice-Simulation eines AQFP Buffer Gates. Eines der vier Taktsignale ist oben in schwarz dargestellt. In der Mitte sind Eingangsstrom (blau) und Ausgangsstrom (rot) dargestellt. Diese Größen sind messtechnisch zugänglich. Unten sind die beiden quantenmechanischen Phasen der Josephson-Kontakte dargestellt. Die Simulation berücksichtigt zusätzlich thermisches Rauschen bei einer Temperatur von 4,2 Kelvin.***

Abbildung 3 zeigt exemplarisch eine numerische Simulation mit Rauschen. Als Schaltungssimulator wird JSPICE_noise verwendet. Die Modelle sind zu Beginn von AP2 mit dem IPHT und IQM abgestimmt wurden. Dazu wurden Parameter aus früheren Schaltkreisen extrahiert und für dieses Projekt angepasst.

Der entscheidende Vorteil von AQFP Schaltungen ist die extrem geringe Verlustleistung. Im Experiment ist dieser Wert in der Regel nicht zugänglich. Daher haben wir eine Erweiterung des Simulators programmiert, um die Schaltenergie transient extrahieren zu können. In Abbildung 4 ist ein solches Ergebnis dargestellt. Es zeigt die Bitenergie eines AQFP-Gates bei einer Taktfrequenz von 1 GHz. Es ist deutlich zu erkennen, wie die Verlustleistung mit steigender Amplitude der Anregung ansteigt. Im gleichen Maße erhöht sich die Schaltenergie auch bei höheren Taktfrequenzen.

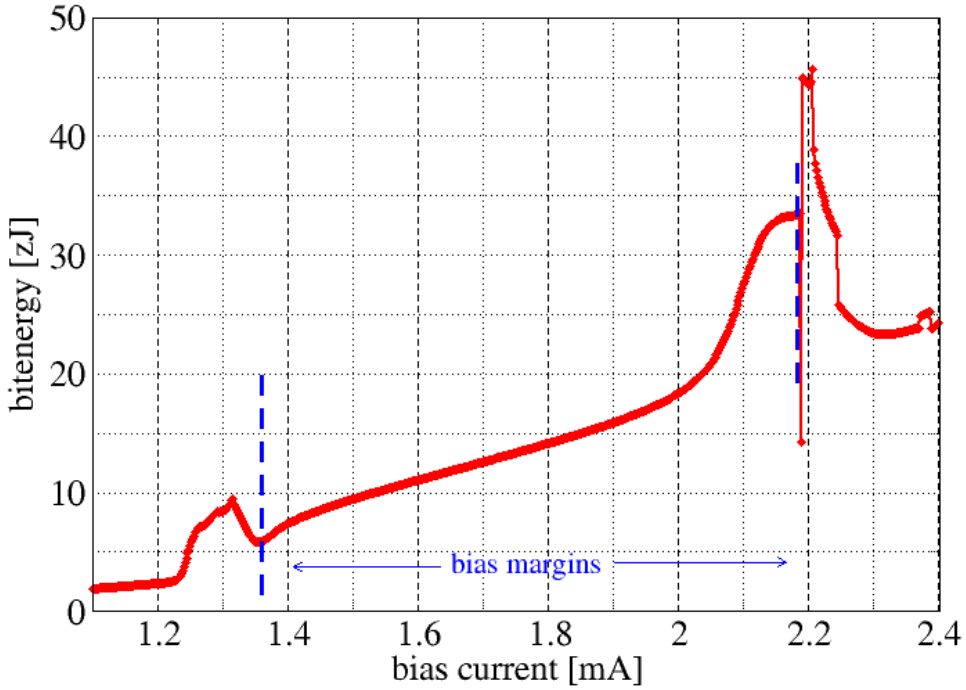


Abbildung 4: ***Simulation der Schaltenergie für ein AQFP Gate in Abhängigkeit des Biasstromes. Der Funktionsbereich ist durch die blau gestrichelten Linien dargestellt. Die Simulation basiert auf einer Taktfrequenz von 1GHz.***

Die Schaltungslayouts für die erste Testfabrikation sind darauf ausgelegt, das simulierte Verhalten zu bestätigen und weitere Parameter zu extrahieren. Neben den Eigenschaften der Josephson Kontakte wurden vor allem die magnetischen Eigenschaften von Koppelstrukturen untersucht, um die Auslegung der magnetischen Ankopplung an das Qubit zu ermitteln.

Für den Entwurf der Schaltkreise wurde in Abstimmung mit dem IPHT ein Designwert von Ic= 20 µA für die kritischen Ströme der Josephson Kontakte festgelegt. Das ergibt eine Kontaktfläche von 1.1 x 1.1 µm². Die kritische Stromdichte für die Technologie beträgt jc=1.7 kA/cm². Für diese Josephson-Kontakte ist in Abbildung 4 die ermittelte dynamische Schaltenergie dargestellt. Bei einem mittlernen Biasstrom von 1.8 mA ergibt sich pro AQFP eine Bitenergie von etwa 15 zJ pro Schaltvorgang. Bei der Taktfrequenz von 1 GHz resultiert das zu einer Verlustleistung von 15 pW pro AQFP Grundzelle. Damit ist nachgewiesen, dass diese Technologie in der Lage ist in direkter Umgebung zum Qubit zu arbeiten. Grundsätzlich wäre auch eine monolithische Integration mit dem Qubit möglich. Das ist für eine spätere Skalierung wichtig. Im Rahmen des Projektes wurde allerdings

eine hybride Flip-Chip-Montage der Schaltkreise eingesetzt. In enger Abstimmung mit den Projektpartnern wurden die Grundschaltungen simuliert, optimiert und im Ergebnis ist der Entwurf in Abbildung 5 entstanden.

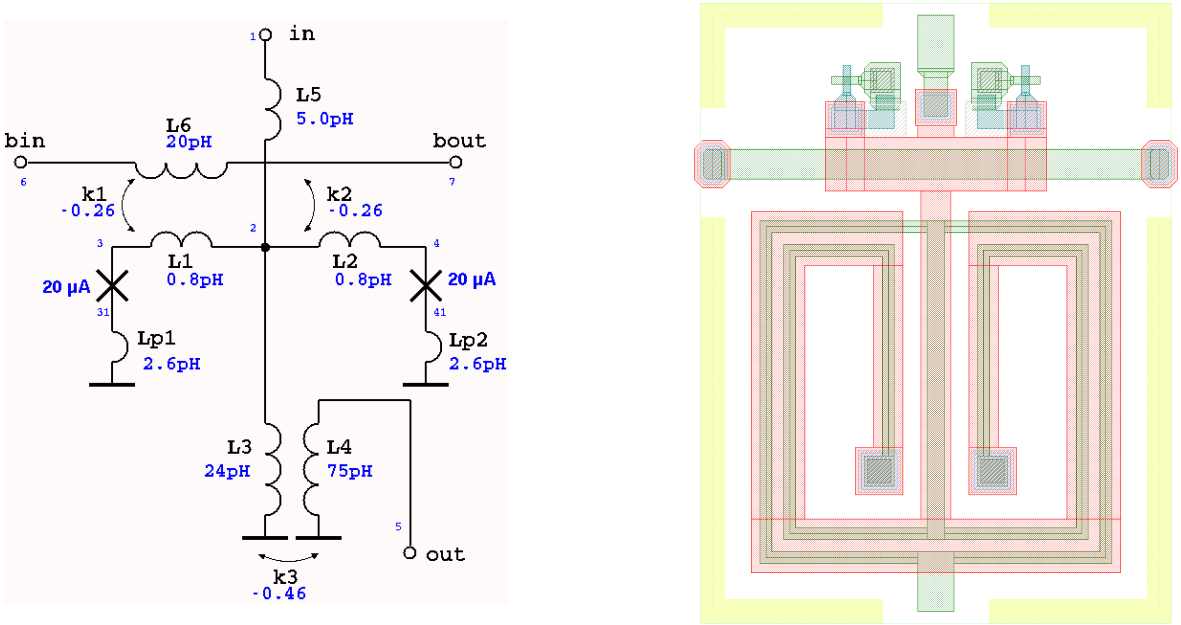


Abbildung 5: Schaltung und Layout für eine AQFP-Grundzelle

Für den Eingang der Schaltung wurde ein bipolarer Strom in Höhe von +/- 5 µA verwendet. Der minimale Anregungsstrom beträgt etwa 1,4 mA. Der Ausgang wird über einen Transformator an die nächste Grundzelle weitergeleitet. Für die praktische Charakterisierung wurde zunächst ein klassischer Probenstab mit flüssigem Helium bei ca. 4K verwendet. Der supraleitende Trägerchip mit den AQFP-Schaltungen ist 5 mm x 5 mm groß und wird mittels Drahtbonden aufgebaut. Dieser Aufbau ist für niedrige Taktfrequenzen völlig ausreichend. Abbildung 6 zeigt das Design des Chips. Die Grundzelle für das Adiabatische Quanten-Fluss-Parametron wurde in zwei Varianten entworfen. Dabei werden jeweils unterschiedlichen Ebenen der Niob-Schicht für die Erzeugung der magnetischen Anregung verwendet.

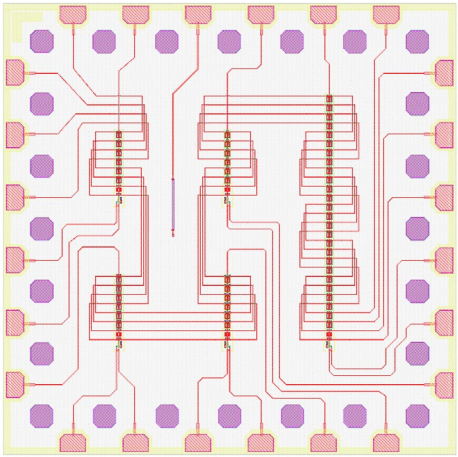
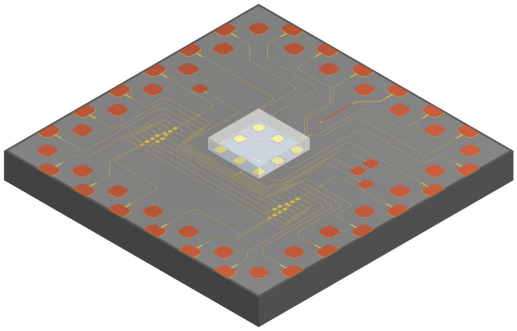
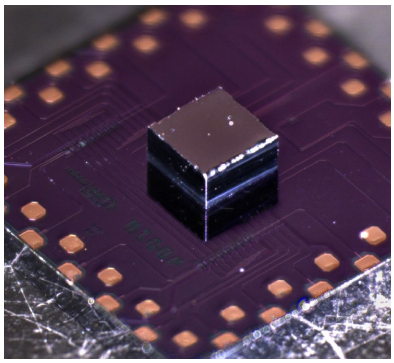


Abbildung 6 -Entwurf der AQFP Test-Schaltung für den Funktionsnachweis der Grundzellen.

Die Testschaltungen sind anschließend in einem Testchip zusammengefasst. Abbildung 6 zeigt das entsprechende Chiplayout. Dabei wird ein 4-Phasen Netzwerk für die Erzeugung der magnetischen Anregung verwendet. Bei diesem Vorgang werden in den Zuleitungen der Anregungsströme keine Widerstände verwendet, um die Schaltungen später auch bei tiefen Temperaturen einsetzen zu können. Gegenwärtig wurden alle Messungen bei 4,2 K in flüssigem Helium durchgeführt. Der konkrete Aufbau für den hybriden Chip-Stapel ist in Abbildung 7 gezeigt.



a)



b)

Abbildung 7: a) 3D-CAD Modell für den Flip-Chip Aufbau aus Trägerchip und b) Mikroskopaufnahme für den Musteraufbau für Messungen der direkten magnetischen Kopplung zwischen AQFP-Steuerschaltung und Qubit

Logic	Clock Freq. [GHz]	E_{bit} / I_cF_0	Typical I_c [mA]	EDP [aJ·ps]
CMOS	4	-	-	~10^5
AQFP [3]	5	0.0042	50	0.086

Die Tabelle zeigt den direkten Vergleich der zwischen einer modernen Halbleitertechnologie (CMOS) und der AQFP-Schaltungstechnik. Das Energie-Delay-Produkt einer AQFP-Schaltung ist etwa 1 Million-Mal kleiner als bei einer sehr energieeffizienten CMOS Schaltung. Es ist auf der anderen Seite immer noch 1000-Mal größer als das Quantum-Limit, Damit stellt diese Schaltungsfamilie die ideale Technologie zur Ansteuerung von Qubit-Systemen dar.

Alle im Projekt entwickelten Schaltungen können grundsätzlich bei 4K, aber auch bei Temperaturen unterhalb von 4 Kelvin betrieben werden. Dafür wurde eine Reihe von Testschaltungen mit AQFP-Logikgattern entwickelt. Die Skalierbarkeit aller Komponenten war eine entscheidende Randbedingung für das Projekt. Dafür wurden die Schaltungsblöcke in verschiedenen Größen ausgelegt und im Experiment unter dem Gesichtspunkten Funktionssicherheit, Signalqualität und Energieverbrauch bewertet. Die Designs vom CiS Forschungsinstitut wurden stets durch die experimentellen Arbeiten am IPHT und bei IQM evaluiert und die Messwerte sind in die Re-Designs eingeflossen.

Eine Detailaufnahme des Chips im Rasterelektronenmikroskop ist in Abbildung 8 zu sehen. Das AQFP besteht aus einem großen Transformator im unteren Bereich und der eigentlichen Schleife zu Flussquantisierung im oberen Bereich. Abbildung 9 zeigt den Bereich des Josephson-Kreuzkontaktes nochmal vergrößert. Die Leitbahnen zum Kontakt haben eine Breite von 1,1 µm.

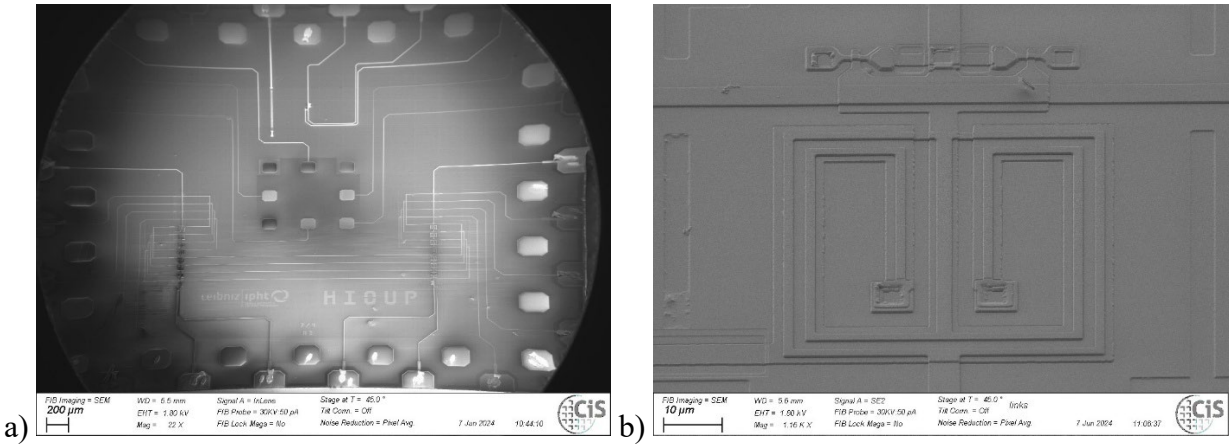


Abbildung 8: REM Aufnahmen des gesamten Testchips a) und einer AQFP Grundzelle b).

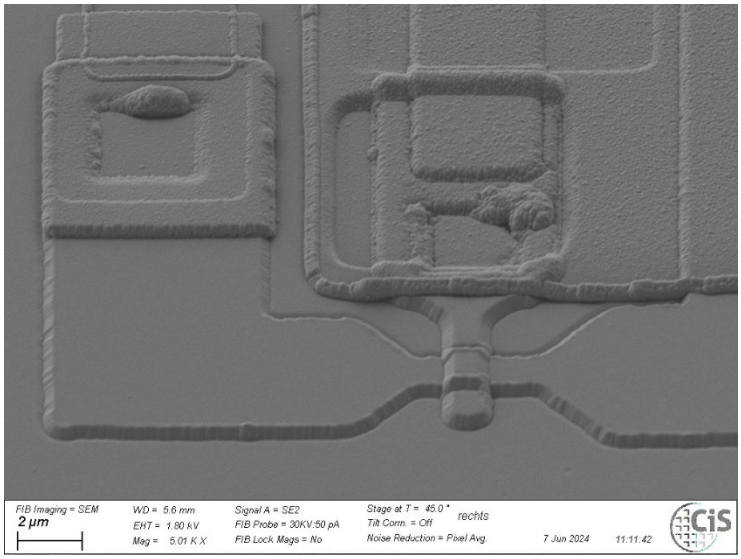


Abbildung 9: Detailaufnahme im REM eines Josephson-Kreuzkontaktes und der direkten Verbindungsstrukturen. Die Josephson-Kontakt auf eine effektive Kreuzungsfläche von 1,1 x 1x1 µm².

Die Impedanz der Speicherschleife ist dabei so gestaltet, dass die SFQ Impulse schnell in einen homogenen Gleichstrom zerfallen. Die Messung eines Monitorausgangs ist in Abbildung 9 dargestellt. Alle Schaltungskomponenten funktionieren.

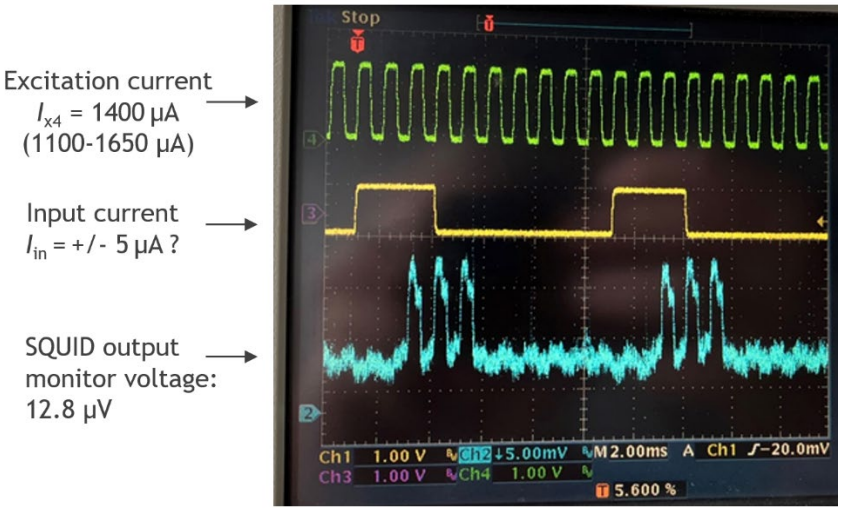


Abbildung 10 – Messung des Monitorausgangs für die digitale AQFP Schaltung zur Flussquantensteuerung

Zur experimentellen Bewertung wurden zunächst nur geringe Taktfrequenzen verwendet. Die Messung in Abbildung 10 zeigt den typischen Verlauf der Ausgangssignale bei korrekter Funktion.

[1] T. Van Duzer, L. Zheng, S. R. Whiteley, H. Kim, J. Kim, X. Meng, Th. Ortlepp, IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Band 23, Ausgabe 3, S. 1700504, 2012

[2] Th. Ortlepp, "Dynamische Analyse stochastischer Einflüsse in der supraleitenden Einzelflussquantenelektronik", Dissertation TU Ilmenau, Ilmenau Wissenschaftsverlag 2005

[3] N. Takeuchi et al., Superconductivity Science and Technology, Band 28, Seite 015003, 2015.

Magnetische Flusskontrolle

Die entwickelte Schaltung muss soweit entkoppelt sein, dass die Eigenschaften des Qubits nicht negativ beeinflusst werden. Weiterhin muss aber die Ankopplung des magnetischen Flusses so ausgelegt sein, dass eine gezielte und gute Beeinflussung des Qubits möglich ist. Dafür wurden 3D-Feldberechnung mit analytischen Abschätzungen kombiniert. Im Rahmen der magnetischen Flusskontrolle wurden zwei Durchläufe realisiert. Im ersten Entwurf handelte es sich zunächst um eine sehr schwache Ankopplung. Damit sollte vor allen bewertet werden, wie sich der gleichzeitige Betrieb von Qubit und AQFP Schaltungen gegenseitig auswirkt. Im zweiten Entwurf wurde das Modell auf der Basis der ersten Ergebnisse angepasst und die magnetische Ankopplung dann optimal ausgelegt. Die Ansteuerung der Flussspeicherschleife im zweiten Entwurf wird dann so ausgelegt, dass die spätere Skalierung nachgewiesen werden kann.

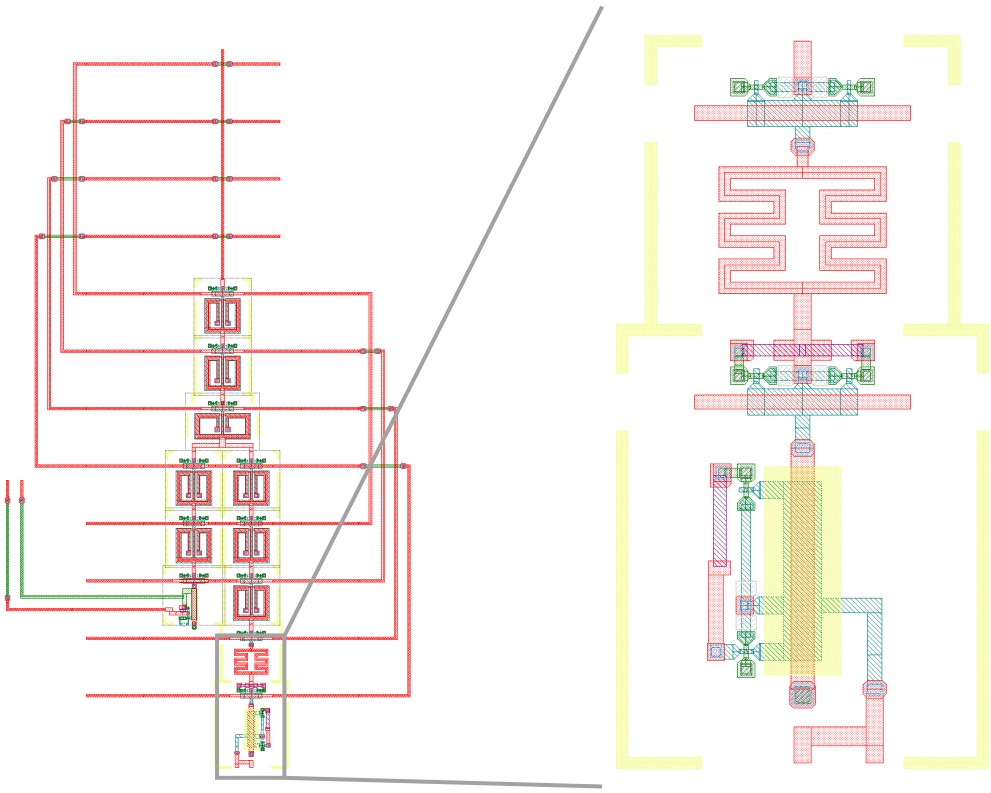


Abbildung 11 – Magnetische Flusssteuerung durch eine Einzelflussquanten-Pumpe

Für die Erzeugung der magnetischen Flusssignale wird eine einfache AQFP-Schaltung mit einem zusätzlichen Monitorausgang verwendet. Abbildung 11 zeigt das Layout der Schaltung. Nach einer Signalaufteilung gibt es zwei Ausgangspfade. Damit war es möglich zu bewerten, wie sich der gleichzeitige Betrieb von Qubit und AQFP Schaltungen realisieren lässt. Die Experimente haben gezeigt, dass die typischen Anregungsströmen im Bereich von 1-2 mA dabei die größte praktische Herausforderung darstellen. Im Entwurf des Chipträgers und bei der Leitungsführung muss man genau darauf achten, dass man keine ungewollte magnetische Kopplung zum Qubit herstellt. Bei richtiger Auslegung des gesamten Aufbaus war ein gemeinsamer Betrieb ohne gegenseitige Beeinträchtigung möglich.

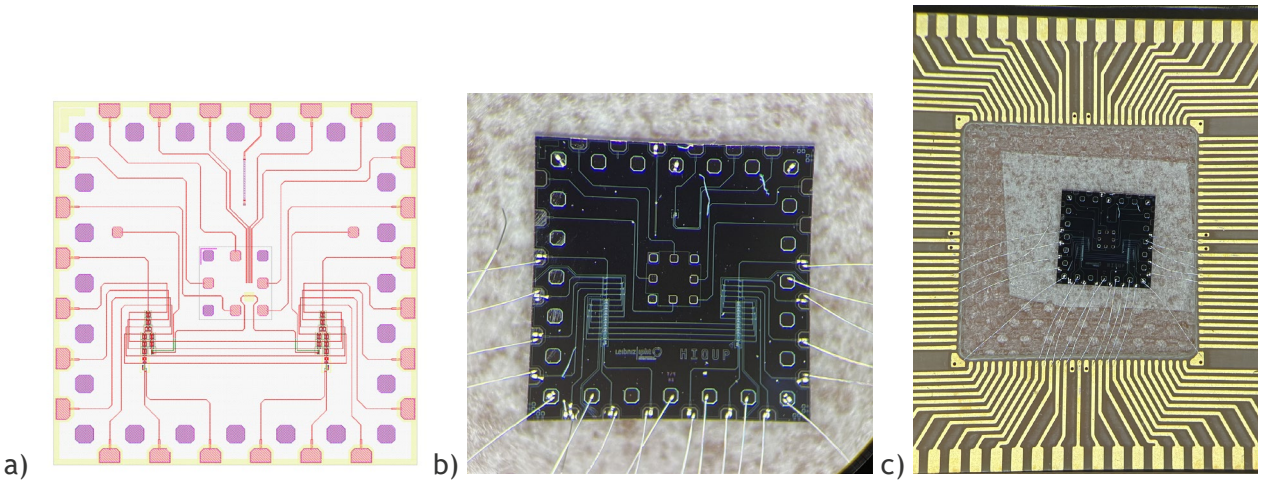


Abbildung 12: Aufbau des Trägerchips mit AQFP Generator und Monitor-Ausgängen für beide Steuerpfade. Chiplayout a) und Mikroskopaufnahme a) und Verbindung zum Carrier b). Der Aufbau erfolgte durch Drahtbonden. Die Messungen erfolgten am IPHT Jena bei 4K.

Abbildung 12 zeigt den Trägerchip mit zwei AQFP-Schaltungen. Sie dienen praktisch als Set- und Reset-Schaltung für magnetische Flussquanten in der Koppelschleife. Abbildung 13 zeigt den Montageplatz für die Flip-Chip-Montage der Chips. Die besondere Herausforderung ist die Einschränkung der maximalen Prozesstemperatur für den Bondvorgang. Nach einigen erfolglosen Versuchen mit höheren Temperaturen haben wir ein sicheres Fenster für die Prozessparameter gefunden. Dabei kommt eine maximale Temperatur von 120°C für etwa 60 Sekunden zu Einsatz.

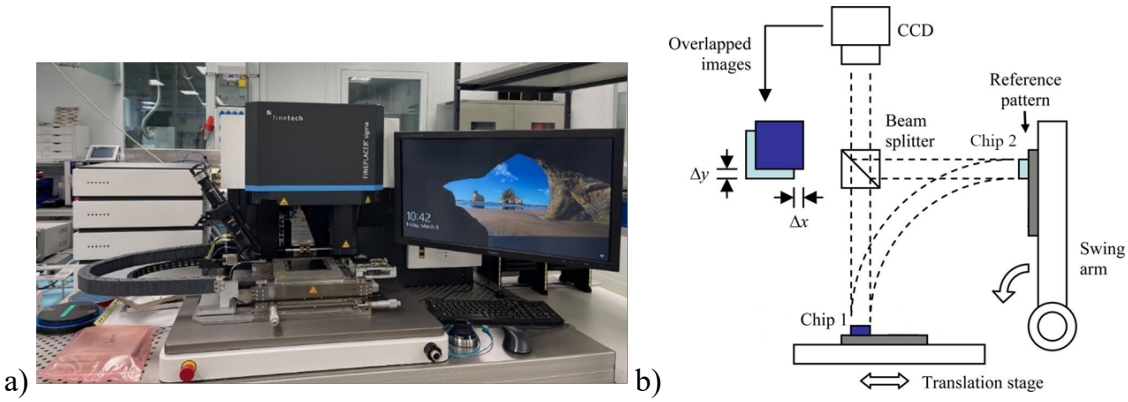


Abbildung 13: Aufnahme der Bondanlage a) und grundsätzliches Prinzip b) für den Flip-Chip Bondvorgang.

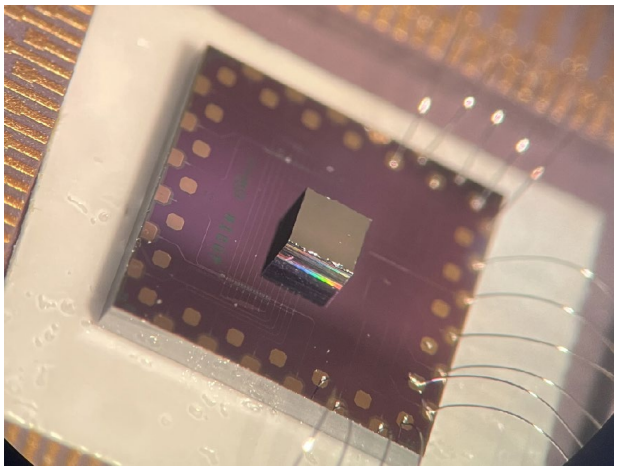


Abbildung 14 – Aufbau des finalen Demonstrators für das Projekt

Abbildung 14 zeigt den finalen Demonstrator für das Projekt. Das Qubit ist in der Mitte durch reine Al-zu-Al Bondkantakte verbunden. Der Abstand der Chips beträgt etwa 15 µm. Die finalen Tests der Schaltung erfolgten durch das IPHT Jena.

Impulserzeugung für Qubitrotationen

Die Impulserzeugung ist eine besonders anspruchsvolle Variante der Integration der Systemkomponenten entwickelt und getestet. Eine besondere Herausforderung für die Skalierung der Komplexität der Quantenschaltungen war die hybride Systemimplementierung. Aus der Geschichte der Halbleiterelektronik ist bekannt, welchen enormen Effizienzgewinn man durch die monolithische Integration der einzelnen Bauelemente auf einen Mikrochip erreichen kann. Wir simulieren die elektrische und magnetische Kopplung der Schaltungskomponenten. Durch die Verknüpfung aller Modelle wird eine monolithische Integration ermöglicht.

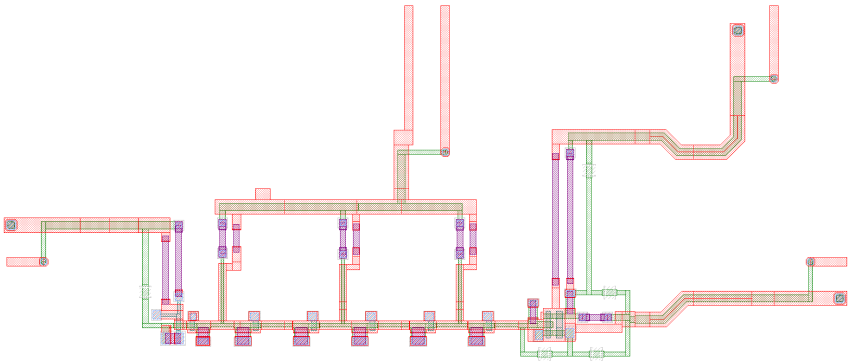


Abbildung 15 – Layout eine digitale Grundschaltung zur Erzeugung von Einzelflussquenten

Abbildung 15 zeigt die Testschaltungen für SFQ-Interfaceschaltungen zur Erzeugung schneller Impulsfolgen, DC/SFQ-Wandler, Josephson-Transmissionsleitungen (JTL) und SFQ/DC-Wandler. Die Schaltungen und das Layout sind darauf ausgelegt, dass sie bei Frequenzen bis zu 40 GHz korrekt arbeiten können. Die Herausforderung ist aber, eine Messung der korrekten Funktion bei so hohen Frequenzen zu ermöglichen. Für die Charakterisierung der Schaltungseigenschaften bei hohen Frequenzen wurden zwei spezielle Ausgangsschaltungen entworfen. Ein 4JL-Gate erlaubt den Betrieb bis zu 40 GHz und erzeugt Ausgangsspannungen von 2,5 mV an 50 Ohm Impedanz. Der Suzuki-Stack kann bis zu einer Taktfrequenz von 8 GHz eingesetzt werden. Dabei erzeugt er eine Ausgangsspannung von etwa 12 mV. Die Schaltung liefert am Ausgang eine sehr schwache SFQ Spannungsimpulse. Sie wurde mittels eines Taktgenerators bei 10 und 20 GHz erfolgreich getestet. Die finalen Tests dieser Schaltung erfolgen durch IQM.

Für die SFQ-Impulsfolgen wurde nur eine mittlere Spannung der Ausgangsimpulse gemessen. Mit der Josephson-Spannungs-Frequenzbeziehung kann damit genau auf die Impulsfrequenz geschlossen werden. Für den Nachweis der korrekten Funktion der AQFP-Schaltungen wurde ein spezieller supraleitender Ausgangsverstärker verwendet. Er erzeugt eine Spannung von etwa 1mV an 50 Ohm bei Frequenzen bis zu einigen GHz.

Die sehr gute Signalqualität war erst durch ein sehr aufwendiges Chip-Package möglich. Damit konnten das Übersprechen und weitere Störungen gut beseitigt werden.

Nachweis der Skalierbarkeit

Alle Schaltungsentwürfe und Layouts im Projekt basieren auf vorhandenen Entwurfsregeln und theoretischen Berechnungen und Annahmen über die Parameter. Im Ergebnis aller Experimente werden wir eine Vielzahl von Daten erzeugen. Die Korrelation experimenteller und simulierter Daten mit den ursprünglichen Ausgangswerten und im Projekt ermittelten Werten hat es uns erlaubt umfangreiche Entwurfsregeln zu erstellen und ein Design-Kit für andere Projekte (z.B. QSolid FKZ 13N16172) bereitzustellen. Es ist uns gelungen eine funktionsfähige Sammlung von Schaltungskomponenten zu entwickeln und experimentell zu erproben. Weiterhin wurden die Entwurfsregeln so angepasst, dass sie direkt für „First-Pass-Designs“ und für weitere Entwicklungen im Rahmen der Verwertung des Projektes nutzbar sind. Das ist ein wesentlicher Bestandteil der Skalierbarkeit in diesem Projekt.

1.2. Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Zu den wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises zählen die Reiskostenmittel zur SPIE Photonics West. Sowohl die Teilnahme 2022 als auch 2024 an der Konferenz bot Einblicke in die neusten Entwicklungen, dem wissenschaftlichen Fortschritt und technische Lösungen im Bereich Quantencomputing. Weiterhin erfolgten Vernetzungen mit Experten und Forschern aus der Branche. Die Konferenz bot uns eine Plattform zur Präsentation unserer Teilergebnisse.

T. Ortlepp, B. Schwartz, C. Moeller, “Sensitivity of the Adiabatic Quantum Flux Parametron versus clock frequency”, **Quantum Computing, Communication, and Simulation IV**, talk at Photonics West, Conference of the SPIE, San Francisco, 2022

T. Ortlepp, S. Engert, C. Moeller, A. Reinhardt, "Quantum precise bias supply of superconducting single photon detectors", **Quantum Computing, Communication, and Simulation IV**, Proceedings of the SPIE, pp. 1291105, 2024

2. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Projektarbeiten

Zum Projektbeginn konnte das CiS Forschungsinstitut auf umfängliche Vorkenntnisse in Entwicklung supraleitender Schaltkreise sowie erste praktische Erfahrungen im Bereich der Qubit-Ansteuerung, dabei vornehmlich für supraleitende Transmon-Qubits, zurückgreifen. Das Vorhaben ermöglichte dem CiS Forschungsinstitut einerseits den intensiven Kontakt zu kompetenten Forschungspartnern und andererseits zu interessierten Industriepartnern. Die Eintrittshürde für industrielle Entwicklungen im Bereich der Quantentechnologie ist sehr hoch, da auch das technologische Risiko noch sehr hoch war. Die Industrie konnte aus eigener Kraft nicht in der gleichen Intensität an den Aufgaben arbeiten.

Die durchgeführten Arbeiten und die erreichten Ergebnisse im Verbundvorhaben HiQuP konnten einen erheblichen Beitrag zur Einführung von supraleitenden Quantentechnologien in praktischen Sensorsystemen leisten. Es wurden erstmals klassische Elektronikschaltungen bei Temperaturen unterhalb von 100 mK erfolgreich getestet und qualifiziert, sowie kompakte Demonstratoren in Form von Flip-Chip Hybridaufbauten, gefertigt und experimentell qualifiziert.

3. Voraussichtlicher Nutzen

Die mit diesen Teilvorhaben im Verbund HiQuP erreichten Ergebnisse und gewonnenen Erfahrungen wird das CiS Forschungsinstitut im nichtwirtschaftlichen Bereich verwerten. Das bedeutet vor allem Wissenstransfer durch wissenschaftliche Veröffentlichungen in Fachartikel, Vorträgen und im Rahmen von Workshops auch über die Grenzen des Verbundes hinaus – aber auch die interne Qualifizierung und Weiterentwicklung von Mitarbeitern sowie wissenschaftlichem Nachwuchs. Mit der Darstellung des erreichten Knowhows ist es bereits während der Projektlaufzeit gelungen, weitere geförderte Kooperationsprojekte als Forschungspartner zu initiieren, sowie auch kleinere Unteraufträge in anderen Vorhaben einzuwerben. Hier sind insbesondere die laufenden bzw. beantragten Vorhaben:

- QSolid 13N16172
- Signal 13N17346 (beantragt)
- Quantenkryotron 2024 VDY 0052

zu nennen. Zudem wurden Unteraufträge in anderen Förderprojekten an das CiS Forschungsinstitut vergeben. Weitere Projekte sind in Vorbereitung.

Die im Verbund entwickelten Quantentechnologie-Bausteine können als „Enabling technologies“ zusammengefasst werden, für die inzwischen noch weitere Anwendungsfälle aufgezeigt wurden und noch zu erwarten sind. So lassen sich auf der technologischen Grundlage auch neuartige Konzepte für Quantencomputer demonstrieren, was in parallel zu diesem Vorhaben gestarteten Förderprojekten weiterentwickelt und demonstriert werden soll. Die bereits erzielten Erfolge bei der Akquise von Anschlussvorhaben basieren zum Großteil auf den sehr guten Projektergebnissen und der guten

Zusammenarbeit der Partner. Ebenfalls dazu beigetragen haben die strategischen Förderentscheidungen der EU und Deutschlands, um Quantentechnologien zu stärken. Vor diesem Hintergrund ist die wissenschaftliche Anschlussfähigkeit als sehr gut zu bewerten.

Es ist uns gelungen erstmals klassische Schaltungen zur Ansteuerung von Qubit bei Temperaturen unterhalb von 100mK praktisch zu testen und nachzuweisen, dass ein Betrieb gemeinsam mit den sehr empfindlichen Qubits möglich ist.

Eine direkte wirtschaftliche Nutzung der Projektergebnisse ist nicht möglich oder vorgesehen. Vielmehr ist diese Plattformtechnologie zur industriellen Serienfertigung noch weiter auszureifen und auf weitere Anwendungsszenarien zu applizieren, wozu Anschlussprojekte bei und mit den Industriepartnern notwendig sind. Dennoch demonstrieren die erreichten Ergebnisse die sehr gute wirtschaftliche Anschlussfähigkeit, welche mittelfristig (3-5 Jahre) auch zu wirtschaftlichen Erfolgen führen werden.

4. Fortschritt an anderen Stellen

Die in diesem Vorhaben adressierten technischen Ziele finden sich auch in den Roadmaps weiterer teils namhafter Unternehmen und Forschungseinrichtungen in Deutschland, Europa und weltweit wieder. Die fortwährende Literaturrecherche zu wissenschaftlichen Veröffentlichungen und auch Patenten in der Projektlaufzeit ergab in der Projektlaufzeit >100 Dokumente mit Bezug zu den Projektinhalten. Diese Literaturangaben können ggf. auf Anfrage separat angefordert werden.

5. Veröffentlichungen

Referierte Zeitschriften

"Design and characterization of adiabatic quantum flux parametron using sub-µm cross-type Josephson junction technology", S.G. Reddy, M. Schmelz, J. Kunert, T. Ortlepp, G. Oelsner, H. Töpfer, R. Stolz, **Superconductor Science and Technology** 38 (4), 045002, 2025

"Quantum precise bias supply of superconducting single photon detectors", T. Ortlepp, S. Engert, C. Moeller, A. Reinhardt, **Quantum Computing, Communication, and Simulation IV**, Proceedings of the SPIE, pp. 1291105, 2024

"Advanced FLUXONICS Process CJ2 Based on Sub-µm-Sized Cross-Type Nb/AlOx/Nb Josephson Junctions for Mixed Signal Circuits", J. Kunert, M. Schmelz, K. Peiselt, G. Oelsner, S.G. Reddy, T. Ortlepp, R. Stolz, **IEEE Transactions on Applied Superconductivity** 34 (3), 1-5, 2024

“Quantum precise bias supply and single flux quantum readout of superconducting nanowire single photon detectors”, Thomas Ortlepp, Taghrid Haddad, Bernhardt Schwartz, Sonja Engert, Matthias Schmelz and Anna Reinhardt, submitted for publication to **IEEE Transactions on Applied Superconductivity**

Vorträge

“Sensitivity of the Adiabatic Quantum Flux Parametron versus clock frequency”, T. Ortlepp, B. Schwartz, C. Moeller, Quantum Computing, Communication, and Simulation IV, Photonics West, San Francisco, 2022

“Sensitivity of the Adiabatic Quantum Flux Parametron as interface circuit for Quantum Computing Systems”, T. Ortlepp, I. Käpplinger, D. Karolewski, B. Schwartz, A. Reinhardt, International Conference on Quantum Materials and Technology, ICQMT, May 2022

Sensitivity of the Adiabatic Quantum Flux Parametron as interface circuit for Quantum Computing Systems, T. Ortlepp, D. Karolewski, B. Schwartz, A. Reinhardt, N. Yoshikawa, European Conference on Applied Superconductivity, EUCAS, Bologna, September 2023

“Quantum precise bias supply and single flux quantum readout of superconducting nanowire single photon detectors”, T. Ortlepp, S. Engert, C. Moeller and A. Reinhardt, talk, International Conference on Quantum Materials and Technology, ICQMT, May 2024

“Quantum technology for future applications in Quantum computing”, T. Ortlepp, Asia Photonics Expo 2025, Singapore, Februar 2025

“Quantum pricise bias supply and single flux quantum readout of superconducting nanowire single photon detectors”, T. Ortlepp, T. Haddad, B. Schwartz, S. Engert, M. Schmelz and A. Reinhardt, International Conference on Superconductive Electronics, ISEC 2025, Juni 2025

Anlage 2, Teil III

Erfolgskontrollbericht

zum Verwendungsnachweis zu FuE Vorhaben

Reg.-Nr.: 13N15914

FuE-Einrichtung: CiS Forschungsinstitut für Mikrosensorik GmbH

Titel: Verbundprojekt: Hochintegrierte und skalierbare lnterfaceschaltungen für Quantenprozessoren (HIQuP) - Teilvorhaben: Simulation und Design von Quantenelektronik und Quantenprozessoren (SiDQuP)

Laufzeit des Projekts

vom: 01.09.2021 **bis:** 28.02.2025

1. Wissenschaftlich-technisches Ergebnis des Vorhabens

1.1. Erreichte Ergebnisse

Es gibt drei wesentliche Ergebnisse.

- Es konnte erstmals gezeigt werden, dass man mittels AQFP Schaltungen eine technische Möglichkeit hat, komplexe Elektronikschaltungen bei Temperaturen unterhalb von 100 mK zu betreiben.
- Weiterhin konnte nachgewiesen werden, dass der Betrieb der Schaltungen die Funktion des Qubits nicht beeinträchtigt.
- Und als drittes wesentliches Ergebnis konnte gezeigt werden, dass die Schaltfunktion auch bei Taktfrequenzen von 2 GHz noch stabil sichergestellt werden kann.

Zum Halbzeitmeilenstein wurde der Nachweis der Funktion bei 4K und mit Frequenzen von 100 kHz erbracht. Zum Projektende wurde eine minimale Temperatur von 80mK mit einer Frequenz von 2 GHz bei einer Fehlerrate BER<10^{-15} erreicht. Die entwickelten Schaltungen bieten ein einmalig gutes Energy-Delay-Product (EDP) von 2 aJ x ps (15 zJ x 125 ps). Dieser Wert ist etwa 10.000-fach kleiner als es moderne Halbleitertechnologien bieten.

Damit ist nachgewiesen, dass sowohl die hybride Multi-Chip-Integration, aber zukünftig auch die monolithische Integration von Qubit Prozessoren und AQFP-Ansteuerschaltungen technisch möglich ist. Damit wird erstmals ein deutlicher Fortschritt in der Skalierung der heutigen Quantencomputer möglich.

1.2. Erreichte Nebenergebnisse

Es wurde eine neue Zellbibliothek entwickelt und gemeinsam mit der Technologie des IPHT Jena wurden ersten Schaltkreise entwickelt. Im Gegensatz zum Stand der Technik war das Ziel die Technologie und die Chipdesigns so auszulegen, dass ein Betrieb der Schaltungen in direkter Umgebung des Qubits möglich ist.

Die Ergebnisse wurden in folgenden Publikationen veröffentlicht:

Referierte Zeitschriften

"Design and characterization of adiabatic quantum flux parametron using sub-µm cross-type Josephson junction technology", S.G. Reddy, M. Schmelz, J. Kunert, T. Ortlepp, G. Oelsner, H. Töpfer, R. Stolz, **Superconductor Science and Technology** 38 (4), 045002, 2025

"Quantum precise bias supply of superconducting single photon detectors", T. Ortlepp, S. Engert, C. Moeller, A. Reinhardt, **Quantum Computing, Communication, and Simulation IV**, Proceedings of the SPIE, pp. 1291105, 2024

"Advanced FLUXONICS Process CJ2 Based on Sub-µm-Sized Cross-Type Nb/AlOx/Nb Josephson Junctions for Mixed Signal Circuits", J. Kunert, M. Schmelz, K. Peiselt, G. Oelsner, S.G. Reddy, T. Ortlepp, R. Stolz, **IEEE Transactions on Applied Superconductivity** 34 (3), 1-5, 2024

"Quantum pricise bias supply and single flux quantum readout of superconducting nanowire single photon detectors", Thomas Ortlepp, Taghrid Haddad, Bernhardt Schwartz, Sonja Engert, Matthias Schmelz and Anna Reinhardt, submitted for publication to **IEEE Transactions on Applied Superconductivity**

Vorträge

"Sensitivity of the Adiabatic Quantum Flux Parametron versus clock frequency", T. Ortlepp, B. Schwartz, C. Moeller, Quantum Computing, Communication, and Simulation IV, Photonics West, San Francisco, 2022

"Sensitivity of the Adiabatic Quantum Flux Parametron as interface circuit for Quantum Computing Systems", T. Ortlepp, I. Käpplinger, D. Karolewski, B. Schwartz, A. Reinhardt, International Conference on Quantum Materials and Technology, ICQMT, May 2022

Sensitivity of the Adiabatic Quantum Flux Parametron as interface circuit for Quantum Computing Systems, T. Ortlepp, D. Karolewski, B. Schwartz, A. Reinhardt, N. Yoshikawa, European Conference on Applied Superconductivity, EUCAS, Bologna, September 2023

"Quantum precise bias supply and single flux quantum readout of superconducting nanowire single photon detectors", T. Ortlepp, S. Engert, C. Moeller and A. Reinhardt, talk, International Conference on Quantum Materials and Technology, ICQMT, May 2024

"Quantum technology for future applications in Quantum computing", T. Ortlepp, Asia Photonics Expo 2025, Singapore, Februar 2025

"Quantum pricise bias supply and single flux quantum readout of superconducting nanowire single photon detectors", T. Ortlepp, T. Haddad, B. Schwartz, S. Engert, M. Schmelz and A. Reinhardt, International Conference on Superconductive Electronics, ISEC 2025, Juni 2025

1.3. Gesammelte wesentliche Erfahrungen

Die bereits erzielten Erfolge bei der Akquise von Anschlussvorhaben basieren zum Großteil auf den sehr guten Projektergebnissen und der guten Zusammenarbeit der Partner. Ebenfalls dazu beigetragen haben die strategischen Förderentscheidungen der EU und Deutschlands, um Quantentechnologien zu stärken.

2. Fortschreibung des Verwertungsplanes

Das CiS Forschungsinstitut wird die Ergebnisse des Vorhabens wissenschaftlich verwerten. Bereits während der Projektlaufzeit wurden wissenschaftliche Publikationen getätigt und Ergebnisse auf Fachtagungen vorgestellt. (siehe Punkt 1.2). Diese Verwertung wird gemäß aktualisiertem Verwertungsplan in den kommenden Jahren intensiv fortgeschrieben.

2.1. Erfindungen/Schutzrechtsanmeldungen und erteilte Schutzrechte

… die vom Zuwendungsempfänger oder von am Vorhaben Beteiligten gemacht oder in Anspruch genommen wurden, sowie deren standortbezogene Verwertung (Lizenzen u.a.) und erkennbare weitere Verwertungsmöglichkeiten

Innerhalb des Vorhabens wurden seitens des CiS Forschungsinstituts keine Erfindungen oder Schutzrechtsanmeldungen getätigt.

2.2. Wirtschaftliche Erfolgsaussichten nach Projektende

(mit Zeithorizont) z. B. auch funktionale/wirtschaftliche Vorteile gegenüber Konkurrenzlösungen, Nutzen für verschiedene Anwendergruppen/-industrien am Standort Deutschland, Umsetzungs- und Transferstrategien

Für das CiS Forschungsinstitut war ausschließlich eine wissenschaftliche Verwertung durch die Erhöhung der wissenschaftlich-technischen Kompetenzen geplant.

2.3. Wissenschaftliche und/oder technische Erfolgsaussichten nach Projektende

(mit Zeithorizont) - u. a. wie die geplanten Ergebnisse in anderer Weise (z. B. für öffentliche Aufgaben, Datenbanken, Netzwerke, Transferstellen etc.) genutzt werden können. Dabei ist auch eine etwaige Zusammenarbeit mit anderen Einrichtungen, Firmen, Netzwerken, Forschungsstellen etc. darzustellen

Die erzielten wissenschaftlichen Ergebnisse und Zusammenhänge aus dem Projekt werden als bestehendes Know-how in weitere Forschungsprojekte mit eingebracht. Die Verwertung der Projektergebnisse nach Projektende wird wie folgt anvisiert:

Jahr nach Projektende	geplante Aktivität/ geplantes Produkt/ geplante Dienstleistung	Verwertungsziel
2025	Beantragung Folgeprojekt im Rahmen des Calls „Enabling Technologies for Resilient R&D Supply Chains in Quantum Technologies“	Vergrößerung Attraktivität CiS als Forschungs- und Entwicklungspartner, Schaffung Technologieplattform als Ausgangspunkt weiterer Projekte Erhöhung Kompetenzen am CiS im Bereich
2026ff	Beantragung weiteres Folgeprojekt	

2.4. Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit

für eine mögliche notwendige nächste Phase bzw. die nächsten innovatorischen Schritte zur erfolgreichen Umsetzung der Ergebnisse

Die mit diesen Teilvorhaben im Verbund HiQuP erreichten Ergebnisse und gewonnenen Erfahrungen wird das CiS Forschungsinstitut im nichtwirtschaftlichen Bereich verwerten. Das bedeutet vor allem Wissenstransfer durch wissenschaftliche Veröffentlichungen in Fachartikel, Vorträgen und im Rahmen von Workshops auch über die Grenzen des Verbundes hinaus – aber auch die interne Qualifizierung und Weiterentwicklung von Mitarbeitern sowie wissenschaftlichem Nachwuchs. Mit der Darstellung des erreichten Knowhows ist es bereits während der Projektlaufzeit gelungen, weitere geförderte Kooperationsprojekte als Forschungspartner zu initiieren, sowie auch kleinere Unteraufträge in anderen Vorhaben einzuwerben.

Hier sind insbesondere die laufenden bzw. beantragten Vorhaben:

- QSolid 13N16172
- Signal 13N17346 (beantragt)
- Quantenkryotron 2024 VDY 0052

zu nennen.

Die im Verbund entwickelten Quantentechnologie-Bausteine können als „Enabling technologies“ zusammengefasst werden, für die inzwischen noch weitere Anwendungsfälle aufgezeigt wurden und noch zu erwarten sind. So lassen sich auf der technologischen Grundlage auch neuartige Konzepte für Quantencomputer demonstrieren, was in parallel zu diesem Vorhaben gestarteten Förderprojekten weiterentwickelt und demonstriert werden soll. Vor diesem Hintergrund ist die wissenschaftliche Anschlussfähigkeit als sehr gut zu bewerten.

3. Angaben zu Arbeiten, die zu keiner Lösung geführt haben

Die wesentlichen Projektziele wurden erreicht.

4. Angaben über die Einhaltung der Ausgaben- und Zeitplanung

Die Kostenplanung wurde eingehalten. Es wurde eine zuwendungsneutrale Laufzeitverlängerung um sechs Monate beantragt und bewilligt. Die Gründe hierfür waren:

- Eine verzögerte Anlagenerweiterung des BESTEC-Clusters am Leibniz-IPHT. Als Konsequenz kam es zu Verzögerung in der Herstellung von geplanten supraleitenden (hier AQFP und RSFQ) Schaltungen, d.s. supraleitende Digitalschaltungen zur engen Integration mit entsprechenden Qubits.
- Zudem verzögerte sich aufgrund einer Cyberattacke am Leibniz-IPHT und dem damit verbunden Ausfall von IT-Services außerdem die Charakterisierung der im März 2024 gelieferten kryogenen Halbleiterschaltungen des Projektpartners IHP bei tiefen Temperaturen.

Die Gewährung der zuwendungsneutralen Laufzeitverlängerung hat zum Erreichen des Projektzieles signifikant beigetragen.