

Kurzbericht zum Verwendungsnachweis - Teil I des Sachberichts

Verbundprojekt qBriqs - Bausteine kryogener Quantentechnologie

Teilvorhaben: Entwicklung hochstabiler, mehrkanaliger Stromquellen mit optionaler kryogener Stabilisierung

Zuwendungsempfänger: Stahl-Electronics

Förderkennzeichen: 13N15948

Laufzeit: 01.10.2021 - 30.04.2025 (42 Monate)

Ursprüngliche Aufgabenstellung und technischer Stand

Quantencomputer nutzen supraleitende Qubits, deren Eigenschaften durch präzise elektrische Ströme gesteuert werden. Diese Ströme erzeugen magnetische Felder, mit denen sich die Qubits auf die gewünschten Frequenzen einstellen lassen. Für Quantensysteme mit mehr als 100 Qubits werden viele solcher Stromquellen benötigt, die extrem stabil und präzise arbeiten müssen.

Zu Projektbeginn gab es keine geeignete kommerzielle Lösung: Verfügbare Präzisions-Stromquellen waren entweder nur einkanalig, sehr teuer und sperrig (etwa 30 kg schwer bei Gerätebreite von einem halben Meter), oder sie waren zwar mehrkanalig, aber nicht präzise genug für Quantenanwendungen. Zudem fehlten Ansätze, die Stabilität durch den Einsatz von Tieftemperatur-Komponenten weiter zu verbessern.

Das Projektziel war die Entwicklung einer erweiterbaren, kompakten Plattform für hochpräzise Stromquellen mit vielen Kanälen. Zusätzlich sollte untersucht werden, ob der Einsatz von Elektronik bei kryogenen Temperaturen (4K bis mK) die Stabilität weiter verbessern kann.

Ablauf des Vorhabens

Das Projekt gliederte sich in vier Phasen:

Definitionsphase (Oktober 2021 bis Januar 2022): Gemeinsam mit den Projektpartnern wurden alle technischen Anforderungen festgelegt, die elektrischen Schnittstellen definiert und der Aufbau eines Demonstrators geplant.

Entwicklungsphase (Januar 2022 bis Februar 2023): Trotz der weltweiten Halbleiterknappheit wurde ein modulares System mit 32 unabhängigen Stromkanälen entwickelt - doppelt so viele wie ursprünglich geplant. Das Gerät wurde im Standard-Rack-Format konzipiert und nutzt hochauflösende Wandler sowie individuelle Präzisions-Referenzschaltungen für jeden Kanal. Besonderer Wert wurde auf die galvanische Trennung zwischen den Kanälen gelegt, um gegenseitige Störungen zu minimieren.

Testphase (März 2023 bis März 2024): Die Raumtemperatur-Version wurde umfassend charakterisiert. Parallel dazu wurde die Tieftemperatur-Erweiterung entwickelt. Dabei musste auf eine neue Halbleiter-Technologie umgestellt werden, da die ursprünglich geplanten Bauteile durch Corona-bedingte Produktionsausfälle über zweieinhalb Jahre nicht verfügbar waren. Der Wechsel zu Galliumnitrid-Transistoren erwies sich als Glücksfall: Die Kosten pro Bauteil sanken von 4.500 Euro auf unter einen Euro, bei gleichzeitig besserer Leistung.

Integrationsphase (Oktober 2023 bis April 2025): Alle Komponenten wurden zu einem funktionsfähigen Gesamtsystem zusammengeführt und charakterisiert. Die Projektverlängerung um sechs Monate war notwendig, da es neben der Halbleiterknappheit zu Personalausfällen und einer Reparatur der Tieftemperatur-Testanlage kam.

Wesentliche Ergebnisse

Die entwickelte 32-Kanal-Stromquelle übertrifft alle ursprünglich gesetzten Ziele deutlich:

Raumtemperatur-Version: Die Genauigkeit liegt bei 30 Millionstel (ppm) der eingestellten Stromstärke (Spezifikation: 100 ppm, dreimal besser). Die Stabilität über eine Stunde erreicht 1,7 ppm (Spezifikation: 5 ppm, dreimal besser), über 24 Stunden 2,5 ppm (Spezifikation: 20 ppm, achtmal besser). Das elektronische Rauschen im niederfrequenten Bereich liegt bei 3 bis 5 ppm (Spezifikation: 30 ppm, sechs- bis zehnmal besser), bei höheren Frequenzen bei 0,7 ppm RMS/VHz (Spezifikation: 10 ppm RMS/VHz, 14-mal besser).

Tieftemperatur-Erweiterung mit aktiver Regelung: Das innovative Konzept platziert Mess- und Regelelektronik direkt bei den Qubits im Tieftemperaturbereich. Durch die kürzeren Signalwege und die direkte Regelung vor Ort wird die Störunterdrückung um den Faktor zehn erreicht (Spezifikation: Faktor 2, fünfmal besser). Das niederfrequente Rauschen beträgt 4 ppm im Bereich 0,1-2,5 Hz bzw. maximal 8 ppm im Bereich 0,1-10 Hz (Spezifikation: 15 ppm, zweimal besser). Das Eigenrauschen bei höheren Frequenzen liegt bei 0,2 ppm RMS/VHz (Spezifikation: 5 ppm RMS/VHz, 25-mal besser).

Technologische Innovation: Das entwickelte Konzept mit Regelung direkt im Tieftemperaturbereich bietet gegenüber bisherigen Ansätzen entscheidende Vorteile: kürzere Kabelwege reduzieren Störungen und Wärmeeintrag, weniger Kabeldurchführungen vereinfachen den mechanischen Aufbau, und die Architektur lässt sich deutlich besser auf höhere Kanalzahlen skalieren. Der erfolgreiche Einsatz von Galliumnitrid-Transistoren macht die Technologie durch die drastische Kostenreduktion für einen breiten Markt zugänglich.

Systemaufbau: Die modulare Architektur im Standard-Rack-Format mit acht Einschüben zu je vier Kanälen ermöglicht flexible Konfigurationen und lässt sich ohne grundlegende Designänderungen auf bis zu 128 Kanäle erweitern. Die Gesamtleistungsaufnahme beträgt geschätzt 65 Watt für 32 Kanäle.

Zusammenarbeit mit anderen Forschungseinrichtungen

Das Projekt wurde in Zusammenarbeit mit vier Partnern durchgeführt:

Das **Karlsruher Institut für Technologie** (KIT) koordinierte das Verbundprojekt, definierte die Anforderungen aus Sicht der Quantencomputer-Anwendung und führte die Integration am Demonstrator durch. Das **Fraunhofer-Institut für Angewandte Festkörperphysik** (IAF) brachte seine Expertise im Bereich Hochfrequenz-Verstärker ein und bewertete die Gesamtsystem-Performance. Die **Physikalisch-Technische Bundesanstalt** (PTB) führte Präzisionsmessungen zur Validierung durch. Die **Firma Rosenberger** entwickelte spezialisierte Kabel und Verbindungstechnik für den Einsatz bei tiefen Temperaturen.

Diese interdisziplinäre Zusammenarbeit ermöglichte die ganzheitliche Optimierung der gesamten Messkette vom Raumtemperaturbereich bis zu den Qubits. Die finale gemeinsame Bewertung aller Projektpartner fand im Juli 2025 statt.

Wirtschaftliche Verwertung

Die Projektergebnisse wurden bereits in ein kommerzielles Produkt umgesetzt. Ein erstes System wurde erfolgreich in die USA verkauft. Die drastische Kostenreduktion durch den Einsatz von Galliumnitrid-Technologie macht die hochpräzisen Stromquellen für einen deutlich breiteren Markt zugänglich und trägt zur Sicherung von Arbeitsplätzen bei Stahl-Electronics und regionalen Zulieferbetrieben bei.