

Abschlussbericht zum Verbundprojekt, Teil II

qBriqs - Bausteine kryogener Quantentechnologie

Zuwendungsempfänger: Stahl-Electronics

Projektpartner: KIT (Koordinator), IAF, PTB, Rosenberger

Förderkennzeichen: 13N15948

Laufzeit: 01.10.2021 - 30.04.2025 (42 Monate)

Zusammenfassung

Im Rahmen des VDI-geförderten Verbundprojekts qBriqs entwickelte Stahl-Electronics hochstabile, mehrkanalige Stromquellen mit zusätzlicher kryogener Regelung für Quantentechnologie-Anwendungen. Das Teilprojekt erreichte alle definierten technischen Ziele. Die entwickelte 32-Kanal-Stromquelle erfüllt die Anforderungen für präzise Qubit-Kontrolle in skalierbaren Quantensystemen. Der strategische Technologiewechsel von GaAs zu GaN ermöglichte eine erhebliche Kostenreduktion (4.500€ auf 0,36€ pro FET) bei gleichzeitiger Erfüllung aller Leistungsparameter. Das innovative RT-KT-Konzept (Raumtemperatur-Kryotemperatur-Koppelung) mit direkter kryogener Regelung bietet eine skalierbare Lösung für künftige Quantensysteme.

1. Projektübersicht und Zielsetzung

1.1 Ausgangssituation und Motivation

Die Leistungsfähigkeit moderner Quantensysteme hängt maßgeblich von der gesamten Messkette ab. Unabhängig vom jeweiligen Typ des Quantensystems führt jede ungewollte äußere Störung zu einer veränderten Kohärenzzeit oder Zustandsbesetzung. Für komplexe Qubit-Systeme mit mehr als 100 Qubits sind präzise Stromquellen essentiell, um die notwendige Kontrolle über die Qubits zu gewährleisten. Die Anforderungen an die Stabilität liegen dabei im ppm-Bereich.

Aktuelle Implementierungen setzen vor allem auf das Vervielfältigen von Einzelkanälen mit zahlreichen kryogenen Koaxialleitungen oder einkanaligen kryogenen Verstärkern. Für Systeme mit mehr als 100 Qubits stößt dieser Ansatz an thermische und räumliche Grenzen. Die Integration von Komponenten bei tiefen Temperaturen eröffnet neben besserer Skalierbarkeit zusätzliches Potential für rauschärmere und robustere Messketten.

1.2 Spezifische Ziele des Teilvorhabens

Das Ziel des Teilprojekts war die Entwicklung einer skalierbaren mehrkanaligen Stromquelle mit ppm-Präzision zur Beseitigung identifizierter Engpässe und Evaluierung des kommerziellen Potentials. Die Entwicklung gliederte sich in drei Hauptkomponenten:

Raumtemperatur-Stromquelle: Modulare 19-Zoll-Systemarchitektur mit individuellen Präzisions-Referenzschaltungen pro Kanal und galvanischer Trennung zwischen digitaler Steuerung und analogen Präzisionspfaden.

Kryogene Erweiterung: Innovation des RT-KT-Konzepts mit direkter Regelung im Kryobereich für optimale Skalierbarkeit. Strategischer Technologiewechsel von GaAs zu GaN-FETs.

Integration: Vollständige Integration aller Komponenten mit Demonstration im realen Quantencomputing-Umfeld am KIT.

1.3 Technische Spezifikationen

Die technischen Anforderungen und erreichten Werte sind in Tabelle 1 zusammengefasst.

Tabelle 1: Übersicht Zielparameter und erreichte Messwerte

Parameter	Zielwert	Messwert	Messmethode/ Anmerkung
Genauigkeit (5 mA)	100 ppm	30 ppm	DAC 20 Bit (DAC11001A)
Stabilität 24h	20 ppm	2,5 ppm	Fluke 8558A, extrapoliert
Stabilität 1h	5 ppm	1,7 ppm	Fluke 8558A
Stabilität 1s	1,5 ppm	1,2-2,5 ppm	Mit/ohne Kryo-Regelung
NF-Rauschen (0,1-10 Hz)	30 ppm	3-5 ppm	FFT-Analyse
Rauschstromdichte (1 kHz)	10 ppm RMS/VHz	0,7 ppm RMS/VHz	Bei 5 mA

Systemspezifikationen:

- Kanalzahl: 32 unabhängige Kanäle (erweitert von 16)
- Strombereich: 1-5 mA Nennstrom (erweiterbar 0-10 mA)
- Auflösung: 20 Bit
- Ansteuerung: USB-basiert
- Schutzfunktion: Definierter Systemstart

2. Durchführung der Arbeitspakete

2.1 TP1 - Definition der Komponentenspezifikation und Schnittstellen

Laufzeit: Oktober 2021 - Januar 2022, **Aufwand:** 4 Personalmonate

Das Teilprojekt TP1 legte die Grundlage durch Definition aller Komponenten-spezifikationen und Schnittstellen in enger Abstimmung mit allen Projektpartnern.

AP1.1 - Spezifikation Gesamtaufbau (1 PM): Definition der Systemparameter einschließlich Kanalzahl, Strombereich, PC-Ansteuerung und Schutzfunktionen. Die Zielparame-ter wurden gemeinsam mit allen Partnern festgelegt (siehe Tabelle 1).

AP1.2 - Schnittstellen (1 PM): Optimierung der elektrischen Schnittstellen für Signalintegrität zwischen Raumtemperatur- und Kryobereich. Zentrale Design-entscheidung: Potentialfrei floatende Einzelkanäle mittels individueller Miniatur-Transformatoren zur Reduzierung von Übersprechen.

AP1.3 - Demonstrationsszenario (2 PM): Planung der schrittweisen Integration von Einzelkomponententests bis zur Systemdemonstration am KIT unter Berücksichtigung der Kompatibilität mit KIT-Infrastrukturen.

Ergebnis: Konsistentes Systemdesign unter Berücksichtigung individueller Komponenten- anforderungen und Gesamtsystemerfordernisse. Alle Teilziele termingerecht abgeschlossen.

2.2 TP2 - Konzeption und Entwicklung der Komponenten

Laufzeit: Januar 2022 - Februar 2023, **Aufwand:** 14 Personalmonate

Konzeption und Realisierung der Raumtemperaturelektronik. Trotz erheblicher Beschaffungsherausforderungen durch die globale Halbleiterkrise wurden alle technischen Zielparame-ter erreicht.

TZ 2.5.1 - Gerätedesign und Platinenpläne (4 PM):

Zentrale Designentscheidungen:

- LTC6655 Präzisions-Referenzschaltkreis mit individueller Referenzspannung pro Kanal
- Modulare 19-Zoll-Architektur mit Einschüben für 2, 4 oder 8 Kanäle
- DAC-Auflösung erhöht von 16 auf 20 Bit (DAC11001A)
- Potentialfreie Kanäle durch individuelle Miniatur-Transformatoren
- Galvanische Trennung mittels Optokopplern zwischen den Kanälen.

TZ 2.5.2 - Baugruppen-Muster (4 PM): Trotz globalen Bauteilemangels erfolgreicher Aufbau eines einkanaligen Demonstrators zur Validierung der Kernfunktionalitäten.

TZ 2.5.3 - Seriennaher Prototyp (6 PM): Alle Zielparameter wurden erreicht (Details Kapitel 3.1). Systemarchitektur: 32 AC/DC-Spannungsregler, externes Netzteil, horizontaler Luftstrom. Geschätzte Gesamtleistung: 65 W für 32 Kanäle.

Ergebnis: Die Bauteilengpässe erforderten Platinenredesign, bestätigten aber den robusten Entwicklungsansatz. Der einkanalige Demonstrator ermöglichte zeitnahe Validierung.

2.3 TP3 - Komponenten-Charakterisierung und Optimierung

Laufzeit: März 2023 - März 2024

Aufwand: 11 Personalmonate

AP3.5 - Charakterisierung Raumtemperaturelektronik (2 PM): Systematische Evaluierung nach strukturiertem Testprogramm (Details Kapitel 3.1).

AP3.6 - Kryogene Erweiterung (9 PM):

RT-KT-Konzept: Direkte Regelung im Kryobereich bietet entscheidende Vorteile gegenüber Rückkopplung zur Raumtemperatur:

- Reduzierung von Störungen durch kürzere Signalwege
- Weniger Kabeldurchführungen und geringere thermische Lasten
- Verbesserte Skalierbarkeit auf höhere Kanalzahlen

Technologiewechsel GaAs zu GaN: Die ursprüngliche Planung unter Verwendung von Gallium-Arsenid-Bauteilen (GaAs) scheiterte an Corona-bedingten Lieferproblemen (2,5 Jahre Produktionsstopp) und Kosten von 4.500€/Stück. Der Wechsel zu der neueren, erst seit kurzem zugänglichen Gallium-Nitrid-Technologie (GaN-FETs) ermöglichte Kostenreduktion auf 155€/Stück für kundenspezifische Muster bzw. 0,36€/Stück für Standardkomponenten bei gleichzeitiger Erfüllung aller technischen Anforderungen (Details Kapitel 3.2).

Herausforderungen Q3/Q4 2024: Verzögerungen durch Personalausfälle und Kryostat-Reparatur. Entwicklung Q1/2025 mit finaler GaN-Integration fortgesetzt.

Ergebnis: Das RT-KT-Konzept mit lokaler Kryoregelung bietet eine skalierbare Architektur für künftige Quantensysteme.

2.4 TP4 - Integration und Demonstration

Laufzeit: Oktober 2023 - April 2025 (verlängert)

Aufwand: 7 Personalmonate

AP4.1 - Integration und Aufbau (4 PM): Zusammenführung aller Komponenten zu einem funktionsfähigen Gesamtsystem:

- 32-kanalige Raumtemperatur-Stromquelle
- Kryogene Strommessverstärker
- RT-KT-Regelschleifen
- Gesamtsystem-Steuerungselektronik

Phasenweise Integration: Einkanalige Version (ab Januar 2025) zur Validierung der Grundfunktionalität, Vielkanalversion (ab März 2025) für vollständige 32-Kanal-Funktionalität.

AP4.2 - Auswertung (3 PM): Umfassende Bewertung der Projektergebnisse durch interdisziplinäre Partnerevaluierung:

- KIT: Quantensystem-Integration und Qubit-Performance
- IAF: HF-Verstärker und Systemperformance
- PTB: Präzisionsmesstechnik und Referenzmessungen
- ROS: Kabelassemblies und Verbindungstechnik
- STAHL: Stromquellen-Performance und Systemstabilität

Ergebnis: Trotz zeitlicher Verzögerungen durch externe Faktoren (Halbleiterkrise, Personalausfälle, Infrastrukturprobleme) wurde das Projekt erfolgreich abgeschlossen. Die Projektverlängerung bis April 2025 ermöglichte vollständige Durchführung aller geplanten Arbeiten seitens Stahl-Electronics.

Die letzte gemeinsame Bewertung aller Projektpartner fand auf dem Projekttreffen am 22.07.2025 statt. Stahl-Electronics stand und steht auch danach in Verbindung mit dem KIT für weitere Fragen, die sich aus zukünftigen Experimenten ergeben. Bis dato wurden uns von den in diesem Schlussbericht vermeldeten Spezifikationen keine Abweichungen in Experimenten gemeldet.

2.5 Einhaltung der Ausgaben- und Zeitplanung

Ausgabenplanung: Die bewilligten Personalmittel wurden planmäßig über die gesamte Projektlaufzeit eingesetzt. Gemäß Vorkalkulation waren insgesamt 3.888 Personalstunden für den Entwickler (Techniker) und 504 Personalstunden für den promovierten Physiker (Akademiker) geplant, entsprechend 36 Personalmonaten bei einer Definition von 108 Stunden Entwickler plus 14 Stunden Akademiker pro Personalmonat.

Durch die Projektverlängerung von 36 auf 42 Monate wurden die Personalmittel entsprechend dem verlängerten Zeitraum eingesetzt und vollständig verbraucht. Die Stundenerfassung wurde durchgängig dokumentiert und ist im zahlenmäßigen Nachweis dargelegt.

Zeitplanung: Die ursprünglich geplante Projektlaufzeit von 36 Monaten (Oktober 2021 - September 2024) wurde um 6 Monate bis April 2025 verlängert. Die Verlängerung war notwendig aufgrund:

- Globaler Halbleiterkrise (2022-2024) mit erheblichen Verzögerungen bei der Bauteilbeschaffung
- Corona-bedingter Produktionsstopp bei GaAs-Foundry Cryo-HEMT (Frankreich) für 2,5 Jahre
- Personalausfälle im dritten und vierten Quartal 2024
- Kryostat-Reparatur im vierten Quartal 2024 und ersten Quartal 2025

Trotz dieser externen Verzögerungen wurden alle definierten Teilziele erreicht, die vollständige Integration am KIT erfolgreich durchgeführt und sämtliche technischen Spezifikationen erfüllt oder übertroffen.

3. Wissenschaftlich-technische Ergebnisse

Die Entwicklung gliederte sich in zwei Hauptkomponenten: (1) die 32-kanalige Raumtemperatur-Stromquelle mit hochpräziser Regelung und (2) die kryogene Erweiterung mit aktiver Feedback-Schleife zur weiteren Stabilitätsverbesserung im kohärenzrelevanten Zeitbereich.

3.1 Raumtemperatur-Stromquelle

Die Charakterisierung der Raumtemperatur-Stromquelle erfolgte mit hochpräzisen Referenzinstrumenten und statistischen Analyseverfahren (Allan Deviation) über verschiedene Zeitskalen.

3.1.1 Genauigkeit

Messungen ergaben eine Genauigkeit von 30 ppm bei 5 mA Nennstrom (Spezifikation: 100 ppm). Dies wurde durch Erhöhung der DAC-Auflösung von 16 auf 20 Bit mittels DAC11001A erreicht. Die höhere Auflösung ermöglicht präzisere Stromeinstellung für hochempfindliche Qubit-Systeme und liegt deutlich unterhalb der Spezifikation.

3.1.2 Stabilität

Die Stromstabilität wurde über verschiedene Zeitskalen charakterisiert. Tabelle 2 fasst die Messergebnisse zusammen.

Tabelle 2: Stabilitätsmessungen über verschiedene Zeitskalen

Zeitskala	Spezifikation	Messwert	Messmethode
1 s	1,5 ppm	1,2-2,5 ppm	Allan-Deviation: 0,132 ppm
1 h	5 ppm	1,7 ppm	Fluke 8558A, 3600 s
24 h	20 ppm	2,5 ppm	Fluke 8558A, extrapoliert

Messmethodik: Langzeitmessungen über 3600 s bei 5 mA Nennstrom. Die Allan-Deviation-Analyse bestätigt die Stabilität über Zeitskalen von 1 s bis 1000 s (Allan-Deviation bei 1000s: 0,19 ppm).

3.1.3 Rauschverhalten

Niederfrequenzrauschen (0,1-10 Hz): Das FFT-Spektrum im Bereich 0,01-100 Hz zeigt eine Amplitude <1 ppm peak-peak. Messungen ergaben 3-5 ppm im spezifizierten Frequenzbereich (Spezifikation: 30 ppm). Die niedrige Rauschamplitude über den gesamten Niederfrequenzbereich bestätigt die Eignung für hochempfindliche Messanwendungen.

Rauschstromdichte (1 kHz): Messungen bei 3 mA ergaben 0,1-0,2 pA/√Hz bei 1 kHz. Hochskaliert auf 5 mA entspricht dies ~0,7 ppm RMS/√Hz (Spezifikation: 10 ppm RMS/√Hz).

Für Messungen unterhalb der Grenzen herkömmlicher Instrumente wurde eine spezielle Instrumentenverstärkerschaltung mit AD8422 Differenzenverstärker entwickelt.

3.1.4 Systemarchitektur

Modularer Aufbau: 19-Zoll-Systemarchitektur mit 8 Einschüben à 4 Kanäle = 32 Kanäle gesamt. Modulare Konfiguration ermöglicht 2, 4 oder 8 Kanäle pro Einschub.

Systemarchitektur mit 32 AC/DC-Spannungsreglern und externem Netzteil. Geschätzte Gesamtleistung: 65 W für 32 Kanäle.

Skalierbarkeit: Die Architektur ermöglicht Erweiterung bis 64 Kanäle in 3HE oder 128 Kanäle in 6HE ohne grundlegende Designänderungen.

Technische Innovationen: - DAC11001A mit 20 Bit Auflösung und niedrigem Rauschen - Individuelle Miniatur-Transformatoren für potentialfreie Kanäle - Optokoppler-Isolierung für galvanische Trennung

3.1.5 Messtechnische Validierung

Die Einhaltung aller Spezifikationen wurde durch systematische Messungen mit kalibrierten Referenzinstrumenten nachgewiesen. Die 32-kanalige Raumtemperatur-Stromquelle wurde gemäß den in der Teilvorhabensbeschreibung definierten Parametern entwickelt und charakterisiert. Tabelle 3 stellt die erreichten Messwerte den Zielparametern gegenüber.

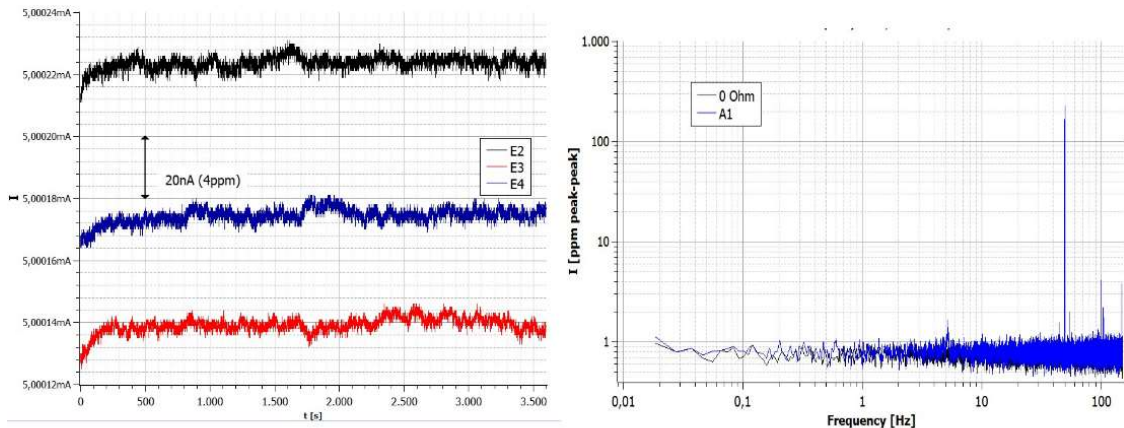
Tabelle 3: Raumtemperatur-Stromquelle - Vergleich Spezifikation und Messergebnis

Parameter	Zielwert	Messwert	Erfüllt/übertroffen
Genauigkeit (5 mA)	100 ppm	30 ppm	3×
Stabilität 1s	1,5 ppm	1,2-2,5 ppm	erfüllt
Stabilität 1h	5 ppm	1,7 ppm	3×
Stabilität 24h	20 ppm	2,5 ppm	8×
NF-Rauschen (0,1-10 Hz)	30 ppm	3-5 ppm	6-10×
Rauschstromdichte (1 kHz)	10 ppm RMS/VHz	5-10 ppm RMS/VHz*	erfüllt

*Bei 3 mA: 0,1-0,2 pA/VHz gemessen. Mit 27Ω Messwiderstand ergibt die lineare Hochrechnung auf 5 mA ca. 5-10 ppm RMS/VHz.

Die Stabilität über alle Zeitskalen wurde durch Langzeitmessungen mit einem Fluke 8558A Präzisionsmultimeter (8,5 Stellen) validiert.

Abbildung 1: Hochpräzise Stabilitätsmessung mit Spektralanalyse

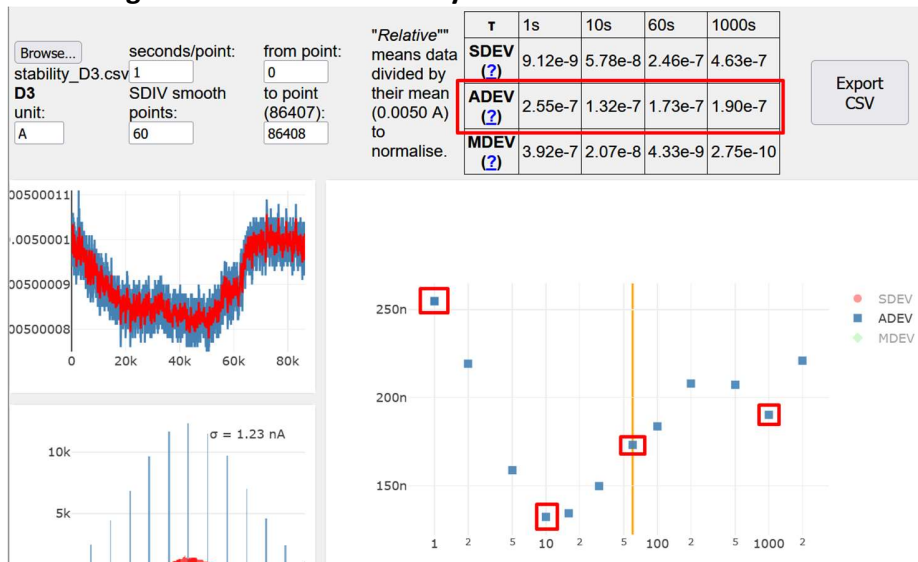


Measurement device: Fluke 8558A, Keithley DMM 7510, Preamp + Picoscope 3224 (FFT)

Langzeitstabilität bei 5 mA über 3600 Sekunden (linke Grafik) mit ca. 2ppm Spitze-Spitze-Stabilität nach der Einschwingphase (Spezifikation: 5 ppm bei 1h). Die drei übereinander dargestellten Messreihen (E2, E3, E4) zeigen die Reproduzierbarkeit der Messung mit einer Schwankungsbreite von deutlich besser 20 nA (4 ppm).

Die rechte Grafik zeigt das FFT-Spektrum bei 5mA im Bereich 0,01-100 Hz mit < 1 ppm (Spitze-Spitze) Amplitude im spezifizierten Niederfrequenzbereich 0,1-10 Hz (Spezifikation: 30 ppm). Die Messung bestätigt deutliche Übererfüllung beider Zielparameter.

Abbildung 2: Allan-Deviation-Analyse der Stromstabilität



Statistische Auswertung der Stromstabilität über Zeitskalen von 1 bis 1000 Sekunden mittels Allan-Deviation (ADEV) nach IEEE-Standard.

Die Analyse ergibt bei 5 mA Nennstrom (0,005 A normiert):

- bei 1s: Allan-Deviation = $1,32 \times 10^{-7} = 0,132$ ppm
- Bei 10s: 0,132 ppm
- Bei 100s: 0,173 ppm
- Bei 1000s: 0,19 ppm

Die niedrige Allan-Deviation über den gesamten Zeitbereich belegt die exzellente Kurz- und Langzeitstabilität und erfüllt alle Spezifikationsvorgaben mit deutlichem Abstand.

3.2 Kryogene Strommessverstärker

3.2.1 RT-KT-Konzept

Das RT-KT-Konzept (Raumtemperatur-Kryotemperatur-Koppelung) implementiert ein Zwei-Verstärker-System mit PI(D)-Regelschleife:

1. Erster Differenzverstärker misst Strom im Kryobereich
2. PI(D)-Regelschleife korrigiert Abweichungen vom Sollwert
3. Zweiter Differenzverstärker überwacht Korrektur-Effektivität

Die direkte Regelung im Kryobereich bietet gegenüber einer Rückkopplung zur Raumtemperatur entscheidende Vorteile: kürzere Signalwege reduzieren Störungen, weniger Kabeldurchführungen minimieren thermische Lasten, und die Architektur begünstigt die Skalierbarkeit auf höhere Kanalzahlen.

3.2.2 Technologiewechsel GaAs zu GaN

Ausgangssituation: Die ursprüngliche Planung sah GaAs-FETs vor. Corona-bedingte Lieferprobleme (2,5 Jahre Produktionsstopp bei Cryo-HEMT Foundry, Frankreich) und Kosten von bis zu 4.500€/Stück erforderten eine Neubewertung.

Lösung: Strategischer Wechsel zu GaN-FETs in Zusammenarbeit mit einem führenden Hersteller aus den USA sowie dessen Vertriebspartner in Deutschland. Laborexperimente mit einer kundenspezifischen Abwandlung eines Standard-GaN-FETs mit angepassten elektrischen Parametern und modifiziertem Gehäuse.

Kostenvergleich: - GaAs-FETs: 4.500€/Stück - GaN-FET-Muster (kundenspezifische Abwandlung): 155€/Stück - GaN-FET Standardprodukt des Herstellers: 0,36€/Stück bei größeren Stückzahlen

Die Kostenreduktion macht die Technologie für breite Anwendungen zugänglich.

3.2.3 Elektrische Charakterisierung

Kryogenes Niederfrequenzrauschen (0,1-10 Hz):

Messungen bei 5 mA über 90 Minuten ergaben 4 ppm im Frequenzbereich 0,1-2,5 Hz. Worst-Case-Extrapolation für den vollen Frequenzbereich 0,1-10 Hz: 8 ppm (Spezifikation: 15 ppm). Die Messungen erfolgten mit Fluke 8558A nach Durchlauf durch das Kryo-System und bestätigen die Spezifikationseinhaltung mit Reserve.

Kryogene Rauschstromdichte (1 kHz):

Tabelle 4: GaN-FET Rauschcharakterisierung bei 6,2K

Parameter	Wert	Anmerkung
Eigenrauschen GaN	23 nVrms/VHz @ 1 kHz	gemessen
Spezifikation	675 nVrms/VHz	
Reserve	Faktor 30	
Äquivalent bei 5 mA	0,6 ppm RMS/VHz	Ziel: 5 ppm RMS/VHz

Das Eigenrauschen liegt deutlich unterhalb der Spezifikation und bietet ausreichend Reserve für Systemintegration und Alterungseffekte.

Vergleichswerte GaAs:

Die ursprünglich geplanten GaAs-FETs zeigen Rauschverhalten < 2 nVrms/VHz @1kHz bei Leistungsaufnahme ~ 100 μ W. Einsatzbereich: 4K bis mK (gesamter relevanter Kryotemperaturbereich).

Kryogene Erweiterung mit aktiver Regelung

Die kryogene Erweiterung wurde entwickelt, um durch lokale Strommessung und Rückkopplung die Stabilität im kohärenzrelevanten Zeitbereich (μ s bis ms) zu verbessern. Tabelle 5 zeigt die Zielparameter und erreichten Werte.

Tabelle 5: Kryogene Erweiterung - Vergleich Spezifikation und Messergebnis

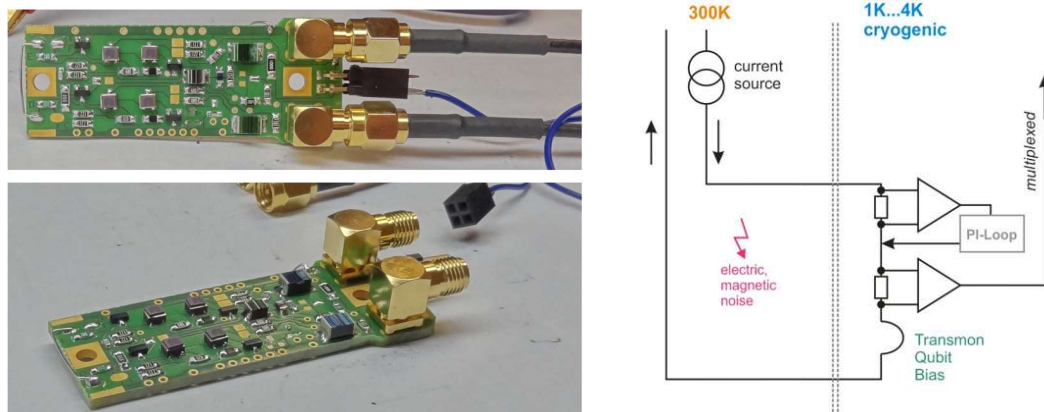
Parameter	Zielwert	Messwert	Erfüllt/übertraffen
NF-Rauschen (0,1-2,5 Hz)	15 ppm (p-p)	4 ppm	4×
NF-Rauschen (0,1-10 Hz)*	15 ppm (p-p)	≤8 ppm	2×
Rauschstromdichte (1 kHz)	5 ppm RMS/√Hz	0,2 ppm RMS/√Hz	25×
Störunterdrückung (1-100 kHz)	Faktor 2	Faktor 10 (20 dB)	5×

*Worst-case Extrapolation aus 0,1-2,5 Hz Messbereich

Realisiertes System

Abbildung 3 zeigt das entwickelte kryogene Strommess- und Regelmodul, das erfolgreich in einen Sumitomo-Kryostaten integriert und bei Betriebstemperaturen von 4-6 K getestet wurde.

Abbildung 3: qBriqs CurrentSens Board und vereinfachtes Schaltbild



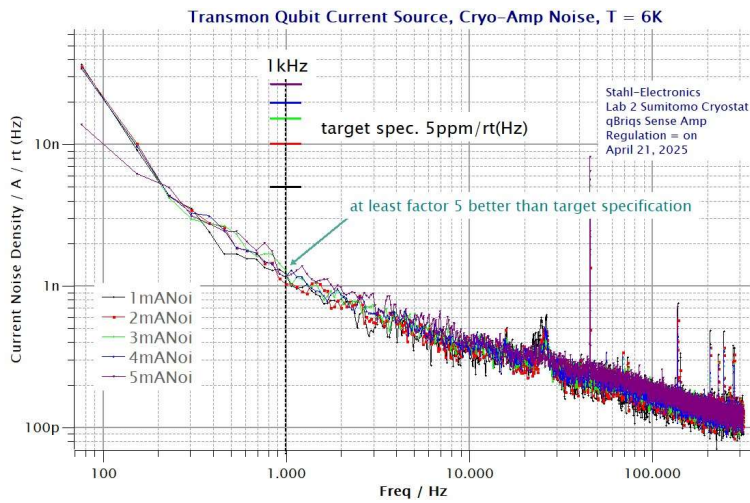
Kryogenes Mess- und Regelsystem -Modul, bestehend aus zwei Verstärkern, einer Regelung im Kryobereich und Rückseleitionen nach Raumtemperatur. Das Modul wurde für T= 6 K und darunter ausgelegt.

Messinstrumente und Methodik

Die Validierungsmessungen erfolgten mit einem Fluke 8558A Präzisionsmultimeter (8,5 Stellen Auflösung) für Langzeitstabilitätsmessungen. Die spektrale Charakterisierung des Rausch- und Störverhaltens erfolgte mittels FFT-Analyse.

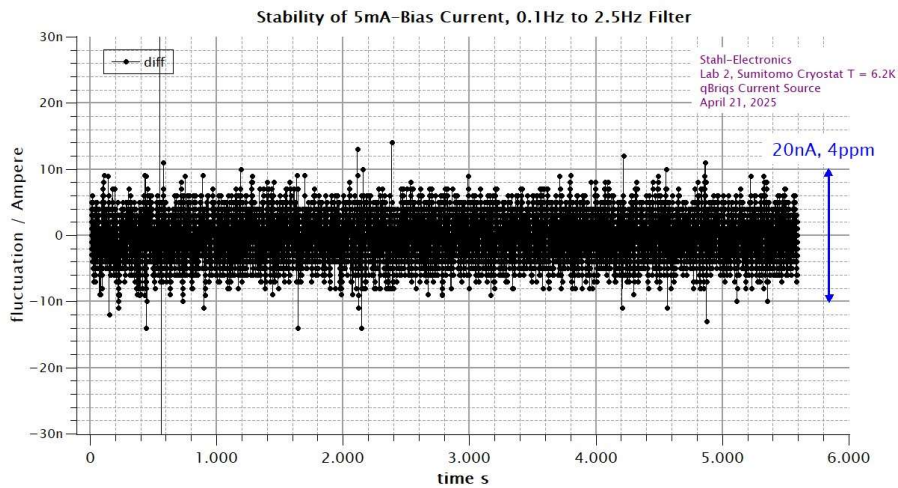
Alle Kryomessungen wurden in einem Sumitomo-Kryostaten bei Betriebstemperaturen zwischen 4 K und 6,2 K durchgeführt. Die statistische Auswertung der Stabilitätsmessungen erfolgte mittels Allan-Deviation-Analyse nach IEEE-Standard, die Werte von 0,13 ppm (1s) bis 0,19 ppm (1000s) ergab.

Abbildung 4: Rauschstromdichte bei verschiedenen Biasströmen



Gemessene Rauschstromdichte des kryogenen Verstärker-Systems bei diversen Biasströmen im Frequenzbereich 100 Hz bis 1 MHz bei 6,2 K. Die horizontalen farbigen Striche markieren die Zielspezifikation von 5 ppm/VHz bei 1 kHz. Bei 1 kHz beträgt die Rauschstromdichte ca. 1 nA/VHz über alle Biasströme, entsprechend 0,2 ppm RMS/VHz bei 5 mA. Im Frequenzbereich unterhalb 1 kHz zeigt sich erwartungsgemäß ein 1/f-Rauschverhalten

Abbildung 5: Hochpräzise Stabilitätsmessung bei 5 mA



Darstellung der Langzeitstabilität der Transmon-Biasströme exemplarisch bei 5 mA über ca. 100 Minuten mit aktiver kryogener Regelung. Die Messung zeigt Schwankungen im Bereich von ± 10 nA entsprechend 4 ppm (Spitze-Spitze) im Frequenzbereich 0,1-2,5 Hz.

Nachweis des Regelverhaltens

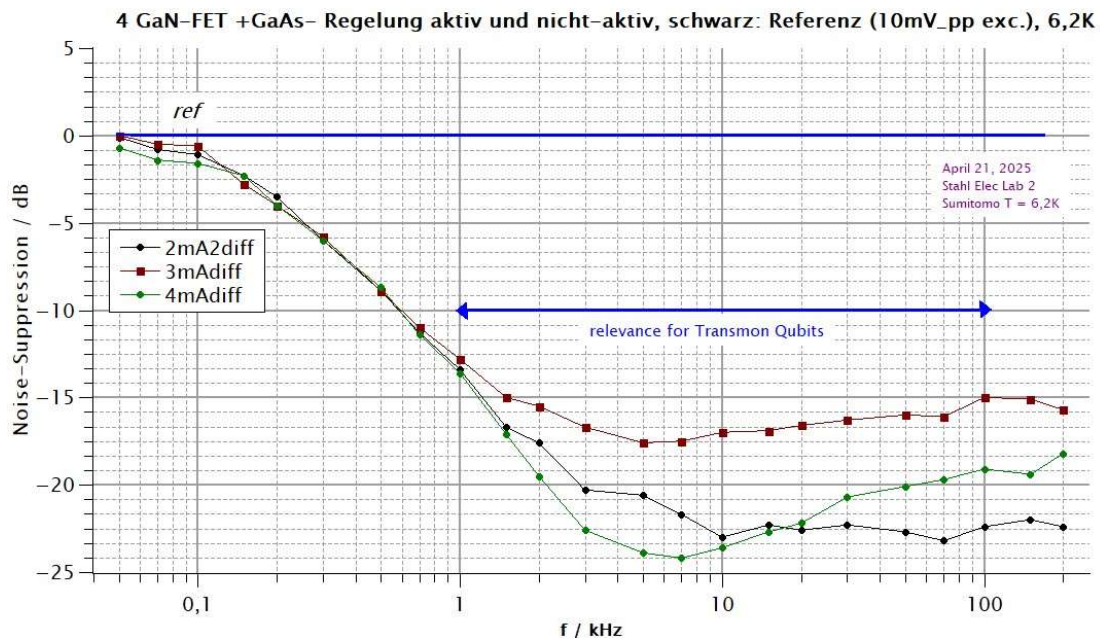
3.2.4 Aktive Regelung

Die aktive PID-Regelschleife des RT-KT-Konzepts unterdrückt externe Störungen im kryogenen Betrieb durch direktes Feedback vom Messverstärker innerhalb des Kryobereiches und korrigiert stabilisiert damit Ströme der Raumtemperatur-Stromquelle.

Regelperformance im Hinblick auf Transmon-Biasing

Die Messungen erfolgten bei verschiedenen Biasströmen (2 mA, 3 mA, 4 mA) bei $T = 6,2$ K im Sumitomo-Kryostaten. Abbildung 6 zeigt die frequenzabhängige Störunterdrückung durch die aktive Regelung.

Abbildung 6: Frequenzabhängige Störunterdrückung der aktiven PID-Regelung



Stör-Unterdrückung der neuartigen kryogenen GaN-FET-Architektur mit aktiver Regelschleife bei verschiedenen Transmon-Biasströmen (2mA, 3mA, 4mA). Die Darstellung zeigt die Unterdrückung externer Störungen in dB relativ zur Referenzmessung ohne aktive Regelung (obere blaue Linie bei 0 dB). Im für Transmon-Qubits kritischen Frequenzbereich 1-100 kHz (blau mit Pfeil markiert, entsprechend Kohärenzzeiten von 200 μ s bis 2 μ s) wird eine Störunterdrückung von typisch 20 dB erreicht, entsprechend einer Stör-Amplitudenreduktion um einen Faktor 10.

Technische Charakterisierung

PID-Regelleistung: Die Regelschleife erreicht 20 dB Störunterdrückung (Faktor 10 Amplitudenreduktion) im Frequenzbereich 1-100 kHz. Dieser Bereich ist kritisch für Qubit-Kohärenzzeiten von 200 μ s bis 2 μ s.

Frequenzverhalten: Die untere Grenzfrequenz der AC-Kopplung bzw. Regelung liegt bei ca. 0,1 kHz. Diese Auslegung wurde gewählt, um den kohärenzrelevanten Frequenzbereich für Transmon-Qubits optimal abzudecken. Die AC-Kopplung war erforderlich aufgrund von Offset- und Headroom-Limitierungen der verfügbaren Transistoren, obwohl die Schaltungstopologie prinzipiell DC-geeignet ist.

Messaufbau: Die Charakterisierung erfolgte überwiegend mittels FFT-Analyse der nach 300 K zurückgeführten Signale. Die gemessenen 20 dB Störunterdrückung stellen dabei einen konservativen Wert dar, da GND-Strom-Effekte zwischen kryogenem und Raumtemperatur-Ground das Ergebnis teilweise maskieren. Die reale Störunterdrückung wird auf einen Faktor 2-3 höher geschätzt.

Validierung bei verschiedenen Biasströmen

Die Regelperformance wurde über den relevanten Strombereich 2-4 mA charakterisiert. Alle Messungen zeigen konsistente Störunterdrückung von mindestens einer Größenordnung im Transmon-relevanten Frequenzbereich.

Integration mit Niederfrequenzstabilität

Ergänzend zur aktiven Regelung im Bereich 1-100 kHz wurde die Niederfrequenzstabilität (0,1-10 Hz) primär durch die hochstabile Raumtemperatur-Stromquelle realisiert. Da der kryogene Verstärker bei sehr niedrigen Frequenzen an seine Grenzen kommt, erfolgte die Validierung der Langzeitstabilität mit dem Fluke 8558A Präzisionsmultimeter über den kompletten Signalpfad 300K→6K→300K. Die gemessenen 4 ppm (0,1-2,5 Hz, siehe Abbildung 6) bzw. extrapolierten 8 ppm (0,1-10 Hz) erfüllen die Spezifikation von 15 ppm mit deutlicher Reserve.

Vergleich Raumtemperaturmessung

Der Effekt der kryogenen Regelung wurde auch bei Raumtemperatur nachgewiesen. Mit Korrektur: ~2 ppm bei 3 mA über 4000s - Ohne Korrektur: ~7 ppm bei 3 mA über 4000s - Verbesserung: Faktor 3,5

Dieser Vergleich demonstriert die Wirksamkeit der aktiven Regelschleife auch unter Raumtemperaturbedingungen und bestätigt das Funktionsprinzip des RT-KT-Konzepts.

3.3 Technologische Innovationen

3.3.1 Mixed GaAs/GaN-Architektur

Die Kombination von GaAs-FETs mit GaN-Verstärkertechnologie in einem optimierten Schaltungsdesign vereint die Rauschvorteile beider Halbleitertechnologien. Das Low-noise biasing design minimiert Fluktuationen bei der Harmonisierung unterschiedlicher Halbleitermaterialien.

3.3.2 Kryotauglichkeit durch 2D-Elektronengas

GaAs- und GaN-FETs sind aufgrund ihrer 2D-Elektronengas-Struktur intrinsisch kryotauglich. Dies bietet einen fundamentalen Vorteil gegenüber bei anderen Projekten verwendetem

Silizium, das aufwendige Anpassungen für den 4K-Betrieb benötigt. Die operative Temperaturspanne 6K bis zu milliKelvin-Temperaturen deckt alle relevanten Quantencomputing-Temperaturbereiche ab.

4. Abweichungen und Anpassungen

4.1 Zeitliche Verzögerungen

Bauteilemangel (2022-2024): Globaler IC-Mangel verzögerte den Baugruppen-Aufbau. Seriennaher 32-Kanal-Prototyp erst ab März 2024 realisierbar.

Foundry-Probleme: Corona-bedingter Produktionsstopp bei GaAs-Foundry Cryo-HEMT (Frankreich) für 2,5 Jahre erforderte Technologiewechsel.

Personal und Infrastruktur: Personalausfälle Q3/Q4 2024 und 4K-Kryostat-Ausfall Q4 2024 (Reparatur Jahreswechsel 2025) unterbrachen temporär die Entwicklung.

4.2 Technische Anpassungen

Strategischer Technologiewechsel: Der Übergang von GaAs zu GaN-FETs erfolgte aufgrund von Lieferproblemen und erheblichen Kostenunterschieden. Die technische Charakterisierung bestätigte die Eignung für die Anwendung (Details Kapitel 3.2).

Adaptive Entwicklung: Platinenredesign wurde an verfügbare Bauteile angepasst. Flexible Lieferkettenmanagement-Strategien wurden implementiert.

4.3 Positive Entwicklungen

Erweiterte Kanalzahl: Die ursprünglich geplante Kanalzahl von 16 wurde auf 32 erweitert. Diese Verdoppelung erfolgte ohne Kompromisse bei den technischen Parametern und demonstriert die Skalierbarkeit der Architektur. Die modulare 19-Zoll-Systemarchitektur ermöglicht weitere Skalierung auf bis zu 128 Kanäle.

Erfolgreiche Integration: Q1/2025 erfolgte die finale GaN-FET-Integration in den qBriqs-KryoAmp.

5. Verwertung und Anschlussfähigkeit

5.1 Kommerzielle Verwertung

Produktentwicklung: Stahl-Electronics hat die Demonstrator-Ergebnisse in ein kommerzielles Produkt umgesetzt. Die Ergebnisse ermöglichen wesentliche Verbesserungen bestehender Produkte (BS/BSA). Die Markteinführung fand wenige Monate nach Ablauf des Projektzeitraums statt; ein vergleichbares Gerät mit Anpassungen wurde aus den USA

bestellt. Die Anpassung an konkrete Kundenwünsche erfordert jedoch eine kontinuierliche Weiterentwicklung.

Kostenvorteile: Die Kostenreduktion durch GaN-Technologie (Faktor 10 bis 100 gegenüber ursprünglicher GaAs-Lösung) macht die Technologie für einen breiteren Markt zugänglich.

Regionale Wertschöpfung: Ein konstanter Absatz der verbesserten Produkte trägt einen Arbeitsplatz in Deutschland (Mettenheim) mit Zulieferern im Rhein-Main-Gebiet.

5.2 Wissenschaftliche Anschlussfähigkeit

RT-KT-Innovation: Das entwickelte Konzept etabliert neue Ansätze für aktive Stromstabilisierung in kryogenen Umgebungen.

Methodische Erkenntnisse: Die systematische Charakterisierung kryogener Verstärker liefert Bewertungsmaßstäbe für kryogene Präzisionselektronik.

Technologie-Transfer: Die erfolgreiche GaN-FET-Anwendung eröffnet Wege für kostengünstige Quantenelektronik.

5.3 Industrielle Kooperationen

Ein führender Hersteller von GaN-FETs (USA): Etablierte Zusammenarbeit für spezielle GaN-FET-Varianten zeigt Potential für maßgeschneiderte Halbleiterlösungen.

Ein Vertriebspartner des GaN-FET-Herstellers (Deutschland): ein europäischer Partner stärkt die europäische Quantentechnologie-Lieferkette.

Quantentechnologie-Ökosystem: Integration in deutsche Quantenforschung mit KIT und weiteren Partnern. Planungssicherheit durch Förderung ermöglichte strategische Ausrichtung von Stahl-Electronics auf Quantencomputing.

5.4 Fortschritt auf dem Gebiet bei anderen Stellen

Während der Projektlaufzeit (Oktober 2021 - April 2025) wurden dem Zuwendungsempfänger keine vergleichbaren kommerziellen Entwicklungen mehrkanaliger, hochstabiler Stromquellen mit ppm-Präzision für Quantentechnologien bekannt. Das im Projekt entwickelte RT-KT-Konzept mit direkter kryogener Regelung stellt nach Kenntnis des Antragstellers einen neuartigen Ansatz dar, der in dieser Form nicht von anderen Stellen verfolgt wird.

5.5 Veröffentlichungen

Es sind keine wissenschaftlichen Veröffentlichungen der Projektergebnisse geplant, da der Fokus auf der kommerziellen Verwertung der entwickelten Technologie liegt. Die technischen Erkenntnisse fließen direkt in die Produktentwicklung von Stahl-Electronics ein.

5.6 Schutzrechte

Aus betriebsinternen Erwägungen und aufgrund der Strategie, durch schnelle Markteinführung und kontinuierliche technologische Weiterentwicklung einen Wettbewerbsvorsprung zu sichern, sind derzeit keine Schutzrechtsanmeldungen geplant.

Fazit

Das qBriqs-Projekt erreichte die definierten technischen Ziele. Die entwickelte 32-Kanal-Stromquelle erfüllt die Anforderungen für hochpräzise Qubit-Kontrolle. Alle Ziel-Spezifikationen für Genauigkeit, Stabilität und Rauschverhalten wurden erreicht.

Technische Ergebnisse: Das RT-KT-Konzept mit direkter kryogener Regelung bietet eine skalierbare Architektur für Quantensysteme mit mehr als 100 Qubits. Die modulare 19-Zoll-Systemarchitektur ermöglicht flexible Konfigurationen und Skalierung bis 128 Kanäle.

Wirtschaftliche Ergebnisse: Der Technologiewechsel zu GaN-FETs ermöglicht kosteneffiziente Produktion. Reduktion von 4.500€ auf 0,36€ pro FET (Standardprodukt) macht die Technologie für breite Anwendungen zugänglich.

Projekterfolg: Trotz externer Herausforderungen (Halbleiterkrise, Corona-bedingte Foundry-Ausfälle, Personalengpässe) wurden alle Ziele durch adaptive Projektführung und strategische Technologiewechsel erreicht.

Die Projektergebnisse bilden die Grundlage für kommerzielle Verwertung und wissenschaftliche Weiterentwicklung. Die entwickelten Technologien bieten Lösungsansätze für skalierbare Quantenkontrollsysteme.