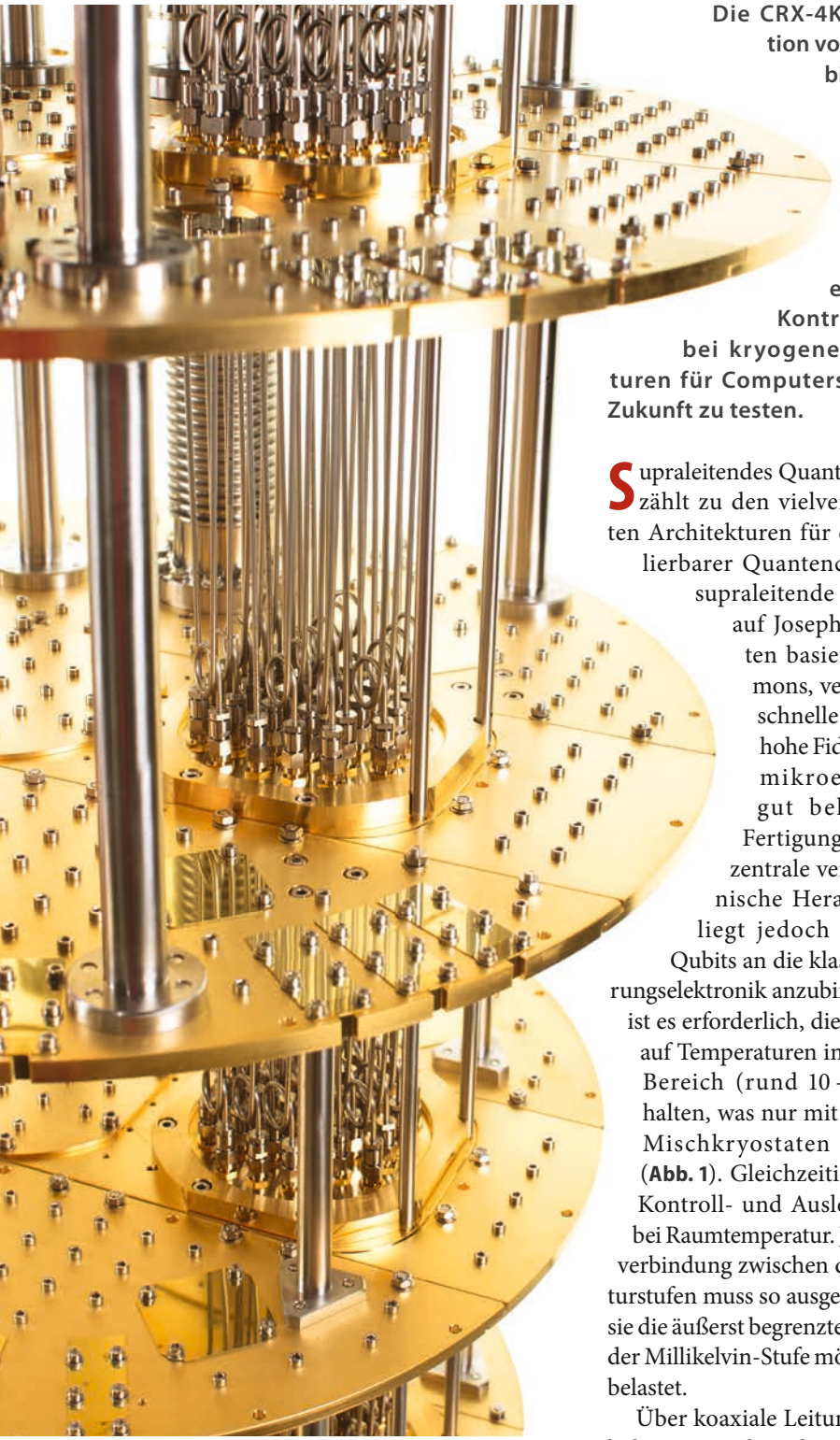
Zuverlässig kontrolliert und skaliert

Elektronische Bauteile für den Einsatz bei 4 K zu optimieren, erhöht die Wahrscheinlichkeit für die breite Verwendung einsatzstarker Quantencomputer noch in diesem Jahrzehnt.

Christian Koller, Malaika Waheed und Matthias Müller



Die CRX-4K Probe Station von Lake Shore bietet eine flexible Plattform, um elektronische, optische und optoelektronische Kontrollelemente bei kryogenen Temperaturen für Computersysteme der Zukunft zu testen.

Abb. 1 Der Mischkryostat **Proteox**®LX von Quantum Design Oxford unterstützt die Skalierung von Quantencomputern.

Supraleitendes Quantencomputing zählt zu den vielversprechendsten Architekturen für den Bau skalierbarer Quantencomputer, da supraleitende Qubits, etwa auf Josephson-Kontakten basierende Transmons, vergleichsweise schnelle Gatterzeiten, hohe Fidelity und eine mikroelektronisch gut beherrschbare Fertigung bieten. Eine zentrale verfahrenstechnische Herausforderung liegt jedoch darin, diese Qubits an die klassische Steuerungselektronik anzubinden: Hierfür ist es erforderlich, die Qubits selbst auf Temperaturen im Millikelvin-Bereich (rund 10 – 20 mK) zu halten, was nur mit aufwändigen Mischkryostaten möglich ist (**Abb. 1**). Gleichzeitig arbeitet die Kontroll- und Ausleseelektronik bei Raumtemperatur. Jede Leitungsverbindung zwischen den Temperaturstufen muss so ausgelegt sein, dass sie die äußerst begrenzte Kühlleistung der Millikelvin-Stufe möglichst wenig belastet.

Über koaxiale Leitungen und Kabel strömt neben den notwendigen Mikrowellenpulsen auch Wärme in den Kryostaten. Zugleich erzeugen die auf kleinstem Raum unterzubringenden Leitungen bei groß skalierten Systemen parasitäre Wärmebrücken und bewirken ein Übersprechen, das die präzise, phasenkohärente Ansteuerung der Qubits erschwert. Als Auswege werden derzeit unter anderem Cryo-CMOS-Steuerungschips auf der 4-K-Stufe, durch Multiplexing zusammengefasste Auslesekanäle, bei denen mehrere Qubits über eine gemeinsame Leitung angesteuert werden, sowie supraleitende Steuerleitungen und photonische bzw. optische Kopplungskonzepte untersucht. Allen Ansätzen ist gemein, dass sie die Zahl der Verbindungen zur Elektronik drastisch verringern und so eine wesentliche Voraussetzung dafür schaffen, supraleitende Quantencomputer auf Millionen von Qubits zu skalieren.

Elektronische und optische Systeme bei 4 K zu betreiben, führt allerdings zu einigen Herausforderungen, die für die erfolgreiche Verwendung der Systeme ausreichend verstanden und vor allem charakterisiert werden müssen. So sind Standard-CMOS-Transistoren für den Betrieb bei 300 K konzipiert. Bei 4 K beispielsweise frieren die Dotierungen im Gitter praktisch ein, die Ionenstreuung verschwindet, die Mobilität steigt stark an und die Schwellenspannungen verschieben sich erheblich. Die Modelle, Simulationen und Bibliotheken üblicher Chiphersteller gelten damit nicht mehr, und jede Schaltung ist eigens zu charakterisieren und neu abzustimmen. Eine andere Möglichkeit zur thermischen Isolation der Stufen ist, die verlustreichen Koaxialleitungen durch optische Fasern zu ersetzen, die praktisch keine Wärme leiten, enorme Bandbreite haben und massives Multiplexing erlauben. Hierzu sind allerdings entsprechende Demodulatoren und Transceiver für die optischen Fasern auf der 4-K-Stufe nötig.

© 2026 Wiley-VCH GmbH

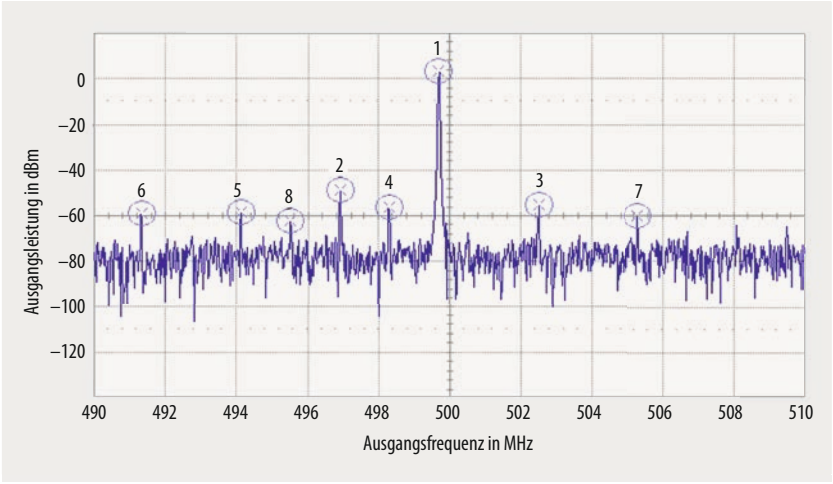


Abb. 2 Das Ausgabespektrum eines SAW-Frequenzgebers (CCSO-914XL 500.00) bei 4 K zeigt, dass die Seitenbänder auch im kryogenen Betrieb deutlich unterdrückt bleiben.

Hier setzt die Verwendung der CRX-4K Probe Station zur schnellen und unkomplizierten Charakterisierung von Bauteilen bei 4 K an. Das System ist für solche Tests besonders gut gerüstet: Neben gängigen AC/DC-Messungen ermöglicht es die Charakterisierung von Hochfrequenzbauteilen bis 67 GHz. Dies ist insbesondere notwendig, um digitale Signale im Mikrowellenspektrum von Quantencomputern zu verarbeiten. Zusätzlich besteht die Möglichkeit, optische Fasern als Probes zu verwenden, um beispielsweise die Vermessung kryogener optischer Transceiver zu testen. Unter Verwendung eines geschlossenen („trockenen") Kühlkreislaufs lassen sich eine entsprechende Anzahl an unterschiedlichen Proben innerhalb weniger Stunden zuverlässig vermessen.

Ein System zum Testen

Ein wesentlicher Baustein in der notwendigen Toolbox für die Kontrolle der quantenmechanischen Schaltkreise sind phasenstabile Frequenzquellen, die sowohl als Referenz für die Messsignale als auch als Taktgeber für optische oder digitale Transceiver nutzbar sind. Als geeignete Frequenzquelle empfehlen sich hier Surface-Acoustic-Wave-(SAW-) Resonatoren, die ähnlich wie die in der Telekommunikation gebräuchlichen SAW-Filter aufgebaut sind, aber als schwingendes Element in einer Oszillatorschaltung arbeiten. Der SAW-Resonator bestimmt über seine Resonanz mit hoher Güte und sehr steiler Impedanzkurve die Frequenz, während ein Verstärker die Schwingung aufrechterhält. Im Vergleich zu Quarzoszillatoren überzeugen SAW-Oszillatoren mit typischerweise höheren Frequenzen von rund 100 MHz bis 3 GHz. Im Vergleich zu Phase-Locked-Loop-Lösungen sind sie einfacher, kleiner und robuster aufgebaut. Im üblichen verifizierten Temperaturbereich von −40 °C bis + 85 °C zeigen sie üblicherweise eine sehr gute Temperaturstabilität.

Um die Fähigkeiten der CRX-4K Probe Station zu demonstrieren, wurden SAW-Oszillatoren der CCSO-914X-Serie vermessen, wobei die Grundfrequenzen von 250, 500, 800 bzw. 1000 MHz untersucht wurden. Der Vorteil einer kryogenen Probe Station besteht hier darin, dass sich mehrere Prüfobjekte ohne aufwändige Verkabelung untersuchen lassen und hier sowohl DC-Probes zur Versorgung als auch die entsprechenden hochfrequenten Probes für die akkurate Vermessung der Ausgangsfrequenz zu verwenden sind (**Abb. 2**). So gelang es, für die Bauteile zwar eine entsprechende Verschiebung der Frequenz zu niedrigeren Werten im Bereich von bis zu −700 ppm zu zeigen (etwa −350 kHz für den 500-MHz-Oszillator). Die generellen Eigenschaften wie Phase Noise und Seitenbandunterdrückung blieben allerdings vergleichbar mit den Werten bei Raumtemperatur. Hier zeigte sich auch die Fähigkeit der CRX-4K-Station, auf eine akkurate Endtemperatur mit sehr geringen Schwankungen auszuregeln.

Ausblick

Die derzeitigen Untersuchungen konzentrieren sich auf die Bewertung von Standardbauteilen für ihre Verwendung in Kontrollsystemen für Quanteninformationssysteme. Im gezeigten Beispiel des SAW-Oszillators (**Abb. 3**) sieht diese Strategie zielführend aus; allerdings zeigen andere Bauteile aus den oben genannten Gründen oft ein deutlich komplexeres Verhalten, das durch entsprechendes Neudesign ausgeglichen werden muss. Für die entsprechenden Untersuchungen der temperaturabhängigen elektrischen und Materialeigenschaften dieser Designs wird die CRX-4K-Station auch weiterhin zuverlässige Dienste leisten.

Die Autor:innen

Christian Koller und **Malaika Waheed**, Fachhochschule Wiener Neustadt, Johannes Gutenbergstraße 3, 2700 Wiener Neustadt, Österreich, und **Matthias Müller**, Quantum Design GmbH, Breitwieserweg 9, 64319 Pfungstadt

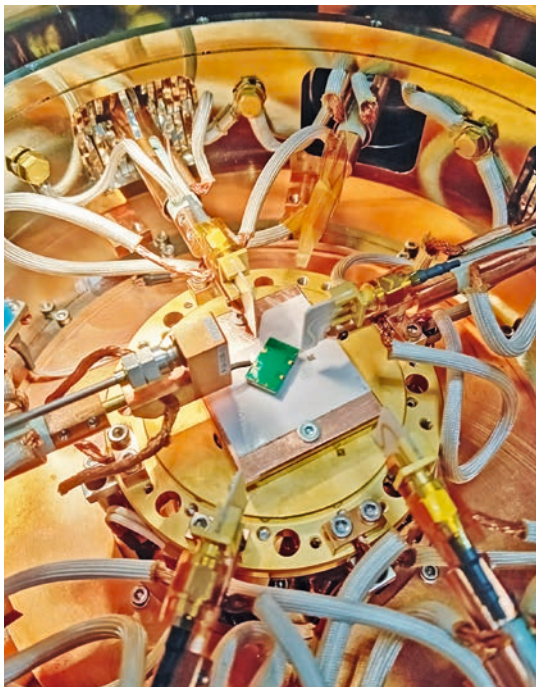


Abb. 3 Der SAW-Frequenzgeber befindet sich in der CRX-4K Probe Station; zu sehen sind das Prüfobjekt und insgesamt sechs installierte Probenarme.

© 2026 Wiley-VCH GmbH