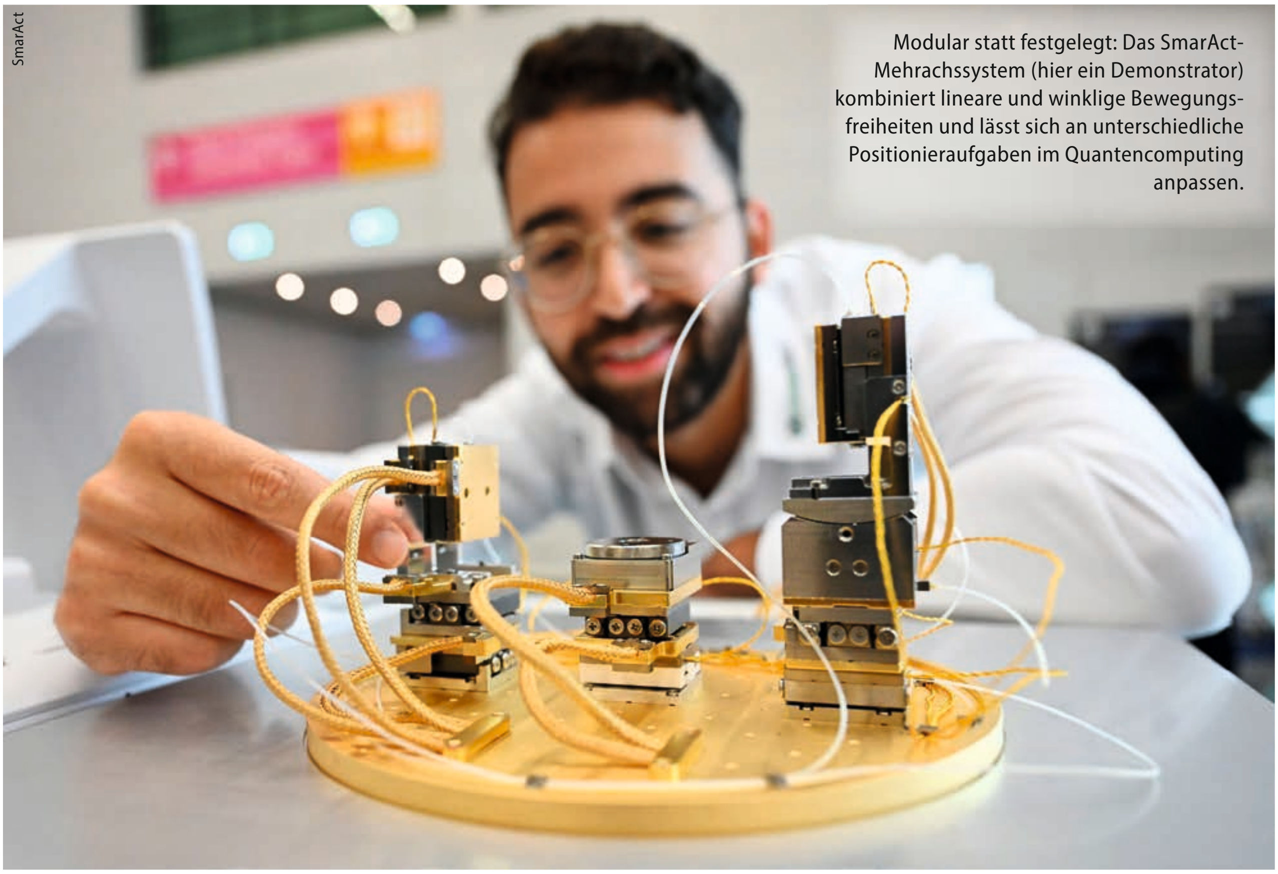


Modular statt festgelegt: Das SmarAct-Mehrachssystem (hier ein Demonstrator) kombiniert lineare und winklige Bewegungsfreiheiten und lässt sich an unterschiedliche Positionieraufgaben im Quantencomputing anpassen.

Präzision als Schlüssel für Quantentechnologien

Ob Quantencomputer, -kommunikation oder -sensorik: Der Weg von der Grundlagenforschung zu skalierbaren Anwendungen führt über hochpräzise Positionier- und Messtechnik.

Hundert Jahre nach der Formulierung der Quantenmechanik geht es nicht mehr allein darum, welche Quanteneffekte sich im Labor nachweisen lassen. Entscheidend ist vielmehr, wie daraus robuste und skalierbare Systeme entstehen. Diesen Übergang markierte das Internationale Quantenjahr 2025.

Die Europäische Kommission richtet ihre Quantum Europe Strategy auf den Transfer wissenschaftlicher Durchbrüche in marktreife Anwendungen, koordinierte Infrastrukturen und stärkere europäische Lieferketten aus [1]. In Deutschland zählt die Quantentechnologie zu den sechs Schlüsseltechnologien der Hightech-Agenda [2]. Neben Qubit-Zahl, Kohärenzzeit oder Messsensitivität verschiebt sich der Fokus auf technische Disziplinen, die weniger sichtbar sind. Quantenexperimente müssen stabil betrieben, optische Pfade reproduzierbar ausgerichtet und Komponenten trotz Vakuum, tiefer Temperaturen oder begrenzten Bauraums präzise bewegt werden. Hochpräzise Positionier- und Messtechnik hilft, die für die Nutzung von Quanteneffekten erforderlichen Versuchsbedingungen kontrolliert und reproduzierbar herzustellen. SmarAct entwickelt hierfür Systemlösungen, die sich an unterschiedliche Quantenplattformen und deren Umgebungsbedingungen anpassen lassen.

Messen bei 13 Kelvin

Ein aktuelles Beispiel liefert eine 2026 veröffentlichte Arbeit der TU Braunschweig und der ETH Zürich zur Terahertz-Mikroskopie von Quantenkaskadenlasern mithilfe supraleitender Josephson-Kontakte [3]. Um ihre Strahlung nicht nur integral, sondern räumlich und spektral aufgelöst zu untersuchen, nutzten die Forschungsteams einen miniaturisierten Josephson-Sensor an der Spitze einer Antenne.

Der Sensor wurde bei 13 Kelvin schrittweise durch das Strahlungsfeld geführt. Hierbei galt es, jeden Messpunkt unter kryogenen Bedingungen zuverlässig anzufahren. Dies übernahm ein dreiachsiges Piezo-Positioniersystem von SmarAct mit 50 × 50 × 16 mm^3 Verfahrbereich und nanometergenauer Wiederholgenauigkeit.

Die im System integrierte Nanosensorik erfasste direkt die räumliche Lage der Sonde und erlaubte es, jedem Messpunkt die entsprechende Sensorantwort zuzuordnen und daraus eine räumliche THz-Karte zu erstellen (**Abb. 1**). Hohe Auflösung entsteht somit nicht allein über den Josephson-Kontakt in der THz-Antenne. Sie hängt auch davon ab, wie genau dessen Position bekannt ist und wie reproduzierbar die Messgeometrie herzustellen ist.

Vom einzelnen Ion zum skalierbaren Rechner

Noch deutlicher zeigt sich der Zusammenhang zwischen Präzision und Skalierung bei Quantencomputern mit gefangenen Ionen. In einer Paul-Falle schließen elektromagnetische Felder einzelne geladene Atome ein. Ihre internen Zustände dienen als Qubits; Laserstrahlen initialisieren, manipulieren und lesen sie aus. Schon kleine Abweichungen in Strahllage oder Fokus können die adressierte Wechselwirkung verändern. Je mehr Qubits und optische Kanäle ein System umfasst, desto höher ist die Bedeutung kompakter Bauformen, mechanischer Stabilität und reproduzierbarer Justage.

Das deutsche Unternehmen neQxt entwickelt Full-Stack-Quantencomputer auf dieser Basis. Im Februar 2026 startete unter seiner Leitung das mit 18,4 Millionen Euro vom BMFTR geförderte Projekt SQale, das einen modularen Ionenfallen-Rechner mit mehr als 200 verbundenen Qubits und besonders niedrigen Fehlerraten hervorbringen soll [4]. Die Einbindung integrierter Wellenleiter und aktiver Modulatoren zeigt, wohin sich die Plattform bewegt: Optische Funktionen müssen dichter an die Falle rücken und langfristig skalierbar werden.

In den experimentellen Plattformen kommen kompakte, ultrahochvakuumtaugliche Nanopositioniermodule zum Einsatz, die SmarAct an die räumlichen und mechanischen Anforderungen angepasst hat (**Abb. 2a**). Sie richten optische Strahlen im Submikrometerbereich aus; standardisierte Achsen ergänzen die Module. Ein *XYZ*-Tip-Tilt-System ermöglicht translatorische und winklige Korrekturen auf engem Raum (**Abb. 2b**). Entscheidend ist die kontrollierte Integration vieler optischer Freiheitsgrade: Skalierung bedeutet nicht nur mehr Qubits, sondern auch mehr beherrschbare Schnittstellen.

Verlustarm auf den Chip bringen

Bei der Quantenschlüsselverteilung mit kontinuierlichen Variablen, kurz CV-QKD, wird Information in elektromagnetischen Feldern codiert. Photonisch integrierte Schaltkreise vereinen die erforderlichen Funktionen auf kleinen Chips. KEEQuant meldete 2026 die Validierung wesentlicher QKD-Bausteine auf kommerziellen photonischen Chips und kündigte erste Auslieferungen an. Die Integration soll QKD kompakter, wirtschaftlicher und zugleich die Voraussetzungen für eine skalierbare Produktion schaffen.

Auch bei integrierten photonischen Schaltkreisen bleibt die präzise optische Kopplung eine zentrale Herausforderung. Hierfür gilt es, Licht effizient von einer Faser in mikrometergroße Wellenleiterstrukturen einzukoppeln; bereits geringe laterale oder winklige Abweichungen erhöhen die Verluste. Für QKD-Systeme ist eine hohe Koppeleffizienz besonders relevant: Eine präzise und reproduzierbare Faserausrichtung hilft, das relative Rauschen zu minimieren und dadurch hohe Schlüsselraten sowie Übertragungsreichweiten zu erreichen. Zugleich verbessert sie die Voraussetzungen für eine verlässliche Charakterisierung und Qualitätssicherung. Geht es zudem darum, ungepackte Chips unterschiedlicher Geometrie zu untersuchen, muss der Aufbau zur Ausrichtung der Fasern präzise und flexibel anpassbar sein.

KEEQuant nutzt hierfür einen mehrachsigen SMARPOD P-SLC-17, welcher Einzelfasern, Faserarrays und Chip-zu-Chip-Schnittstellen relativ zum photonischen Schaltkreis positioniert (**Abb. 3**). Translatorische und rotatorische Freiheitsgrade optimieren Lage und Winkel der Schnittstelle. Der SMARPOD erlaubt dabei, völlig frei einen virtuellen Pivotpunkt zu definieren, der beispielsweise direkt an das Faserende oder einen Punkt im Faser-Array gelegt, das Zentrum der Bewegung ist. So lassen sich photonisch integrierte Schaltkreise unterschiedlichster Konfigurationen einfach und schnell unter vergleichbaren Bedingungen charakterisieren und verlustarm koppeln. Was im Labor noch Feinjustage bedeutet, wird auf dem Weg zur Industrialisierung zu einer Frage der Testbarkeit und automatisierbaren Montage.

Kryogene Positionierung als plattformübergreifende Aufgabe

Tiefe Temperaturen sind nicht nur für supraleitende Sensoren relevant. Auch supraleitende Qubits, Spin-Qubits und zahlreiche quantenphysikalische Materialexperimente arbeiten in Kryostaten, teilweise nahe am absoluten Nullpunkt und in starken Magnetfeldern. Je nach Experiment sind präzise lineare und rotatorische sowie Kippbewegungen erforderlich – beispielsweise für optische Kopplung, elektrische Kontaktierung oder das räumliche Abtasten einer Probe.

Für kryogene Umgebungen geeignete Linear- und Rotationspositionierer lassen sich zu komplexen und gleichzeitig kompakten Systemen kombinieren. So ist es möglich, diese an die Kühlgeometrie oder den meist

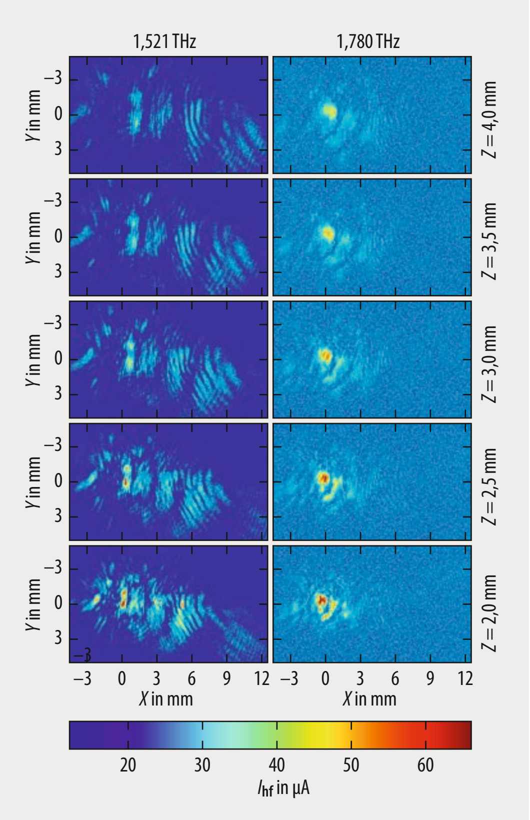
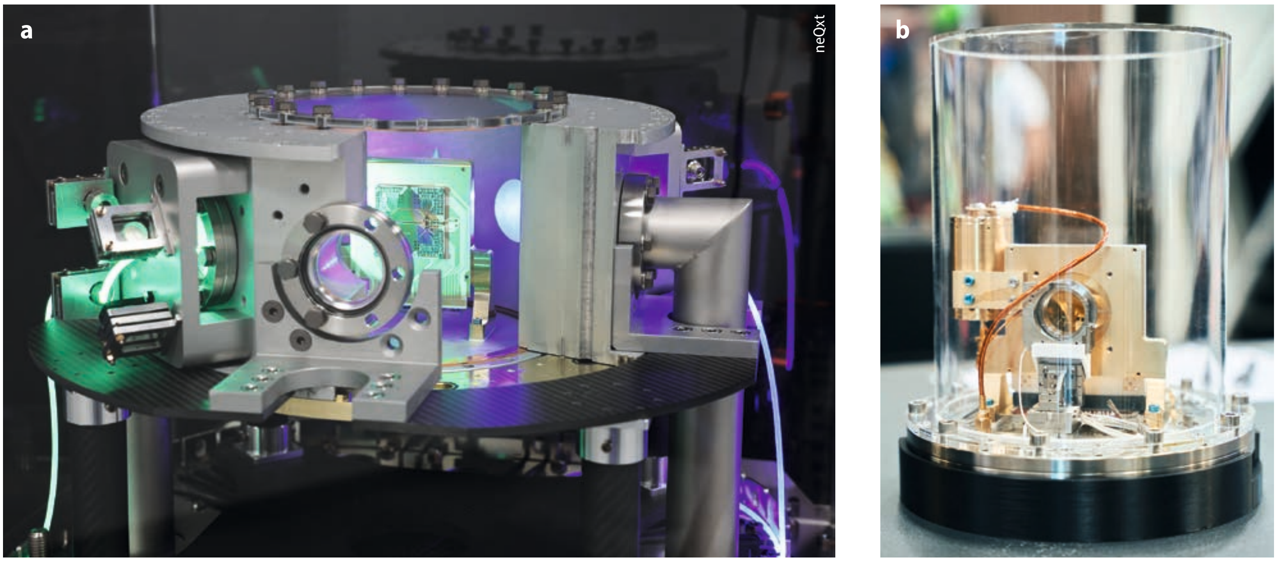


Abb. 1 THz-Strahlung räumlich vermessen: Durch die präzise dreiachsige Positionierung des Josephson-Sensors relativ zum Quantenkaskadenlaser lassen sich dessen Fernfeld-Modenstrukturen bei unterschiedlichen Frequenzen und Abständen räumlich aufgelöst erfassen.

Abdruck mit Genehmigung aus: J. Mumme et al., IEEE Trans. Appl. Supercond. 36(5), © IEEE 2026.



neQxt

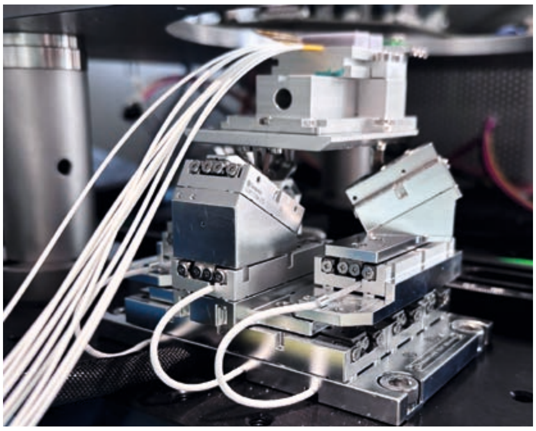
SmarAct

Abb. 2 Kompakte Nanopositioniermodule unterstützen bei neQxt die präzise Ausrichtung optischer Komponenten für Ionenfallen-Quantencomputer (a). Das *XYZ*-STT-System von SmarAct kombiniert translatorische und winklige Bewegungsfreiheiten, um optische Komponenten in Ionenfallen-Experimenten präzise auszurichten (b).

sehr begrenzten Platz im Experiment anzupassen. Kühlplatten und Kupfergeflechte verbessern den thermischen Kontakt; die nanometerpräzise, interferometrisch erfasste Position schließt den Regelkreis. Eine nominell hohe Auflösung hilft schließlich wenig, wenn thermische Drift, Spiel oder unzureichende Wärmeankopplung die Messgeometrie verändern. Für belastbare Daten zählen Positionsauflösung, Wiederholbarkeit, Stabilität und thermisches Verhalten gleichermaßen.

Gemeinsame technische Ebene

Terahertz-Mikroskopie, Ionenfallen und photonische Chips beruhen auf unterschiedlichen physikalischen Prinzipien. Auf der Ebene des experimentellen Aufbaus begegnen ihnen jedoch ähnliche Fragen: Wie lässt sich ein Sensor bei 13 Kelvin reproduzierbar scannen? Wie bleiben zahlreiche Laserpfade auf einzelne Ionen ausgerichtet? Wie wird eine Faser verlustarm an einen Wellenleiter gekoppelt?



KEEQuant

Abb. 3 Faserausrichtung an photonischen Chips: KEEQuant nutzt einen SMARPOD P-SLC-17 zur mehrachsigen Ausrichtung optischer Fasern an photonischen integrierten Schaltkreisen.

Die Antworten liegen selten in einer einzelnen Spitzenkennzahl. Gefragt ist die Kombination aus Verfahrbereich und Feinauflösung, kompakter Mechanik und Stabilität, Vakuum- oder Kryotauglichkeit sowie Mess- und Regeltechnik. Hinzu kommt die Fähigkeit, diese Technologien an unterschiedliche Systemarchitekturen anzupassen. Denn genauso wenig wie es nur eine technologische Plattform für Quantencomputer, Quantensensoren oder Quantenkommunikation gibt, existiert eine universelle Instrumentierung für alle Anwendungen.

SmarAct begegnet diesen unterschiedlichen Anforderungen mit einem modularen Ansatz: Lineare und rotatorische Positionierung, Tip-Tilt-Bewegungen sowie geeignete Mess- und Steuerungstechnik werden entsprechend der jeweiligen experimentellen Aufgabe kombiniert. Aus einzelnen Komponenten entstehen so komplexe Mehrachssysteme, die unter Berücksichtigung der spezifischen Anforderungen an Bauraum, Temperatur, Vakuum oder magnetische Eigenschaften konzipiert werden.

Mit dem Übergang von einzelnen Experimenten zu komplexeren Quantensystemen verändert sich auch die Rolle der Instrumentierung. Entscheidend ist nicht mehr nur, ob eine Position einmal mit hoher Präzision erreichbar ist. Sie muss reproduzierbar angefahren, gemessen und in komplexere Abläufe integriert werden können. Genau an der Schnittstelle zwischen physikalischem Experiment und technischem System entscheidet sich mit, wie sich neue Quantenplattformen vom Laboraufbau in skalierbare Anwendungen übertragen lassen.

Literatur

[1] Europ. Kommission, Quantum Europe Strategy, https://tinyurl.com/25msmj2j

[2] Hightech Agenda Deutschland, https://tinyurl.com/4uznk9ch

[3] *J. Mumme* et al., IEEE Trans. Appl. Supercond. **36**, 1500205 (2026)

[4] neQxt GmbH, Scalable quantum computers through a modular approach, https://tinyurl.com/4e5c2rwk

Kontakt

SmarAct GmbH
Schütte-Lanz-Str. 9
26135 Oldenburg
Tel.: +49 441 800879 0
E-Mail: info@smaract.com
Website: www.smaract.com