



Abb. 1 Der zylindrische optische Resonator besteht aus einem Glasabstandshalter mit extrem geringer Ausdehnung und optisch kontaktierten hochreflektierenden Spiegeln.

Ultrastabil, ultrapräzise, transportabel

Kommerzielle ultrastabile Lasersysteme sind eine Schlüsseltechnologie für die Quantenrevolution 2.0.

Patrizia Krok, Gabrielle Thomas und Michael Mei

Neben höchster Frequenzstabilität und geringstem Phasenrauschen bieten kommerzielle ultrastabile Lasersysteme einen zuverlässigen, automatisierbaren Betrieb rund um die Uhr – und das alles in einem transportablen Gerät. Sie vereinfachen den Zugang zu Anwendungen, die bisher kontrollierte Laborbedingungen erforderten. Zusammen mit dem technologischen Fortschritt bei optischen Frequenzkämmen beschleunigt diese neue Generation kompletter Quantensysteme die zweite Quantenrevolution.

Die Fähigkeit, in atomaren Systemen Übergänge mit extrem schmaler Linienbreite anzusteuern, hat die wissenschaftliche Forschung in der Quantenwissenschaft und -technolo-

gie nahezu explosionsartig ansteigen lassen. Eine ultrastabile Lichtquelle mit schmaler spektraler Linienbreite ist eine der wichtigsten Komponenten in solchen Experimenten. Sie ist erforderlich, um die schmalen Übergänge in Systemen mit langlebigen angeregten Zuständen zu untersuchen. Eine etablierte Methode der aktiven Stabilisierung von Lasern besteht darin, die Ausgangsfrequenz mit einer Referenz zu vergleichen und mit dem daraus resultierenden Schwebungssignal die Laserparameter zu steuern. Hierzu kann die ausgewählte Resonanzfrequenz eines sehr stabilen optischen Referenzresonators dienen.

Solche resonatorstabilisierten Lasersysteme kamen klassisch nur in kontrollierter Laborumgebung zum Einsatz. Anwendungen der zweiten

Quantenrevolution erfordern jedoch schlüsselfertige und transportfähige Laserquellen. Modernste kommerzielle Lösungen mit einer sorgfältigen Auswahl aller Systemkomponenten haben die Performance in jüngster Zeit bis an die Spitze getrieben, mit den zusätzlichen Vorteilen der hohen Benutzerfreundlichkeit und der mobilen Einsatzmöglichkeiten.

Menlo Systems „ORS“-Produktlinie ultrastabiler Lasersysteme setzt Fabry-Pérot-Resonatoren hoher Finesse als Frequenzreferenz ein (**Abb. 1**). Abstandshalter und Spiegelsubstrat sind aus Spezialglas mit niedrigem Ausdehnungskoeffizienten gefertigt, das Längenänderungen des Resonators mit der Temperatur verhindert. Der Bereich verschwindender Materialausdehnung liegt

hier bei Raumtemperatur, sodass ein komplexes Wärmemanagement überflüssig ist. Der Resonator wird im Ultrahochvakuum betrieben und ist von Temperatur- und Druckschwankungen, mechanischen Vibrationen sowie von Schall isoliert. Die spektrale Linienbreite des Systems beträgt < 1 Hz, die fraktionelle Frequenzstabilität übertrifft 7×10^{-16} bei einer Sekunde Messdauer, was vergleichbar ist mit komplexen, kostspieligen Laboraufbauten. Kommerzielle Lösungen senken den Zeit- und Personalaufwand erheblich und legen den Fokus auf den wissenschaftlichen Fortschritt, ohne Kompromisse bei der Genauigkeit eingehen zu müssen.

Neben der Anregung schmaler Atomübergänge kommen ultrastabile Laser häufig zum Einsatz, um andere Lasersysteme zu stabilisieren. Hierzu ist ein optischer Frequenzkamm (OFC) erforderlich, der die spektrale Reinheit des ultrastabilen Lasers ohne Kohärenzverlust auf alle Kammlinien überträgt. Über einen breiten Spektralbereich dienen die einzelnen Kammlinien als Referenz für weitere Laser, sodass sich viele unterschiedliche atomare Spezies untersuchen lassen. Dank jüngster technologischer Fortschritte, einen ultrastabilen Laser mit einem OFC in einem Gesamtsystem zu kombinieren, hat Menlo Systems die Komplettlösung „FC1500-Quantum“ für Anwendungen in den Quantenwissenschaften geschaffen.

Zweifellos ermöglicht die Kommerzialisierung komplexer Ausrüstung für die Quantenbranche (Abb. 2) neue Anwendungen – mit neuen Möglichkeiten für Bereiche von der Kommunikation und Navigation bis hin zur medizinischen Versorgung und Grundlagenforschung. Neuartige Ansätze haben das Potenzial, bestehende Methoden zu vereinfachen oder gar zu ersetzen. Ein prominentes Beispiel ist die geplante Neudefinition der SI-Sekunde mithilfe der optischen Uhrentechnologie. Essenziell hierfür ist es, dass beim Vergleich entfernter Quantenoszillatoren Instabilitäten

der Apparatur die Zeitmessung nicht beeinträchtigen. Kürzlich wurde beim Vergleich zweier Strontium-Uhren in einer Multiplex-Anordnung innerhalb eines optischen Gitters unter Verwendung eines kommerziellen ultrastabilen Lasers eine relative Instabilität von $8,9 \times 10^{-20}$ nachgewiesen [1]. Das entspricht einer Abweichung der beiden Uhren von nur einer Sekunde in 300 Milliarden Jahren!

Da Quantencomputer Aufgaben bewältigen können, die für klassische Computer zu komplex sind, könnten sie etwa die Pharma- und Klimaforschung beschleunigen. Die ersten Quantencomputer von Unternehmen wie Atom Computing, Inc. [2] verwenden kommerzielle ultrastabile Laser, in Kombination mit optischen Frequenzkämmen, für Quantenrechnungen in Spin-Qubits aus einzelnen Strontium-Atomen, die in Arrays optischer Pinzetten eingefangen sind.

Skalierbarkeit und Praktikabilität von Quantencomputern sind auch in den Fokus globaler Fördereinrichtungen gerückt. Das vom BMBF geförderte Projekt MUNIQC-Atoms [3] verwendet kommerzielle ultrastabile Lasersysteme, wiederum in Kombination mit OFCs, um mittels Rydberg-Zuständen in Strontium-Atomen skalierbare Quantencomputer mit Ein- oder Zwei-Qubit-Gattern zu demonstrieren. Das BMBF-Projekt

Rymax [4] verfolgt den Ansatz eines Quanten-Annealers, der weniger komplex ist als ein gatterbasierter Ansatz. Als Qubits dienen Rydberg-Zustände von Ytterbium-Atomen in einem optischen Gitter.

Von der fortschreitenden Miniaturisierung komplexer Quantenapparaturen mit sinkendem Energiebedarf und steigendem Automatisierungsgrad wird ein breites Spektrum an Anwendungen profitieren – auch im Weltraum [5]. Werden Miniatur-Quanteninstrumente für den Einzelnen verfügbar sein? Das EU-finanzierte Projekt CSOC zielt darauf ab, eine optische Uhr zu entwickeln, bei der alle Komponenten auf einem Chip integriert sind [6]. Damit rückt die Vision einer optischen Uhr am Handgelenk in sprichwörtlich greifbare Nähe.

- [1] X. Zheng et al., Nature **602**, 425 (2022)
- [2] atom-computing.com
- [3] MUNIQC-Atoms, bit.ly/3xr0SUx
- [4] Rymax, bit.ly/3Is38kB
- [5] T. Schmidt et al., Proc. 53rd Annual Precise Time and Time Interval Systems and Applications Meeting (2022), S. 158; bit.ly/3Kbhxsj
- [6] csoc-project.eu/index.php

Die Autor:innen

Dr. Patrizia Krok, Dr. Gabrielle Thomas und **Dr. Michael Mei**, Menlo Systems GmbH, Bunsenstr. 5, 82152 Martinsried

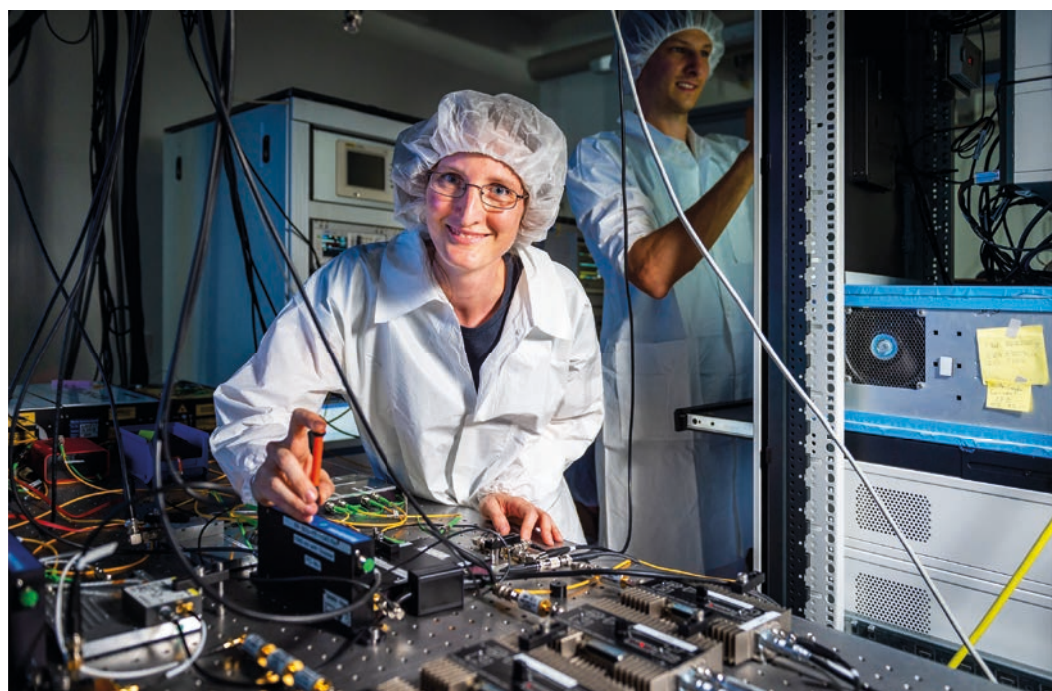


Abb. 2 Die Entwicklung von tragbaren, ultrastabilen Lasersystemen im Rackformat ermöglicht neue Quantentechnologien.