

Abb. 1 Mit einer großen Auswahl an abstimmbaren Diodenlasern und komfortabler digitaler Ansteuerung bietet TOPTICA Photonics maßgeschneiderte Lösungen für nahezu alle Quantentechnologien, die Laser erfordern.

Kontrolle von Quantenzuständen mit Lasern

Neueste Innovationen für Quantentechnologien

Stephan Ritter und Jürgen Stuhler

Als vor einem Jahrhundert die ersten Quantentheorien entwickelt wurden, hätte wohl niemand gedacht, wie viele technologische Entwicklungen aus der Quantenphysik unser Leben prägen werden. Ob wir nun am Computer arbeiten, unser Mobiltelefon nutzen oder eine medizinische Diagnose mittels Magnetresonanztomographie erhalten: Das Verständnis der Quantenmechanik ist Grundlage für all diese Technologien. In der Photonik sind Laser und Laserdioden Paradebeispiele hierfür. Neue Quantentechnologien versprechen eine zweite Quantenrevolution.

Regierungen und Unternehmen investieren in „Quantum 2.0“. Dem liegt die verblüffende Erkenntnis zugrunde, dass die fragilsten Eigenschaften von Quantensystemen, die oft als

nicht intuitiv empfunden werden, die Quelle radikal neuer Technologien sind. Die daraus resultierenden Anwendungen sind neu, aber nicht die Werkzeuge, um die Quantentechnologien zu ermöglichen.

Der Laser – ein Produkt der ersten Quantenrevolution – ist Basis für Quantentechnologien. Seine Anwendung ist aber nicht auf rein optische Quantentechnologien beschränkt, sondern Laser sind in den meisten Apparaturen für Quantentechnologien zu finden. Tatsächlich ist das Laserunternehmen TOPTICA Photonics, das seinen Ursprung in der Laserkühlung sowie Atom- und Molekülspektroskopie hat, heute der größte Anbieter von Lasersystemen für alle Bereiche der Quantentechnologie: Quantenkommunikation, -computer, -simulation und -sensorik.

Lichtquellen sind das Herzstück von Quantennetzwerken, denn Photonen tragen Quantenzustände über große Entfernungen. Sie ermöglichen Anwendungen wie die Quantenschlüsselverteilungen oder die zukünftige Vernetzung von Quantencomputern. Aber auch innerhalb von Quantencomputern, Quantensensoren und optischen Uhren sind Laser unverzichtbar. Im Wesentlichen ist die gute Kontrolle aller Freiheitsgrade des von einem Laser ausgehenden Lichts ein erstklassiges Werkzeug, um andere Quantensysteme zu initialisieren, zu manipulieren und auszulesen.

Jede Eigenschaft eines Lasers, d. h. seine Wellenlänge, Linienbreite, Leistung, Polarisation sowie zeitliches und räumliches Strahlprofil, ist ein wichtiger Kontrollparameter in den Quantentechnologien.

Erforderliche Wellenlängen

Die Liste der Quantensysteme, die für Quantentechnologien verwendet werden oder hierfür vorgeschlagen wurden, ist so vielfältig wie die Liste der Anwendungen. Forscher nutzen die Diversität der Natur, indem sie verschiedene Elemente des Periodensystems einsetzen – in ihrer neutralen Form, aber auch als Ionen, in Molekülen sowie eingebettet in Festkörper. Künstliche Atome und andere Nanostrukturen wie Quantenpunkte ergänzen diese natürlichen Quantensysteme. Die Resonanzfrequenzen aller genannten Systeme decken einen großen Teil des elektromagnetischen Spektrums ab, sodass Laser bei praktisch allen Wellenlängen nötig sind (Abb. 1 und Abb. 2).

Diese Farbvielfalt wird ergänzt durch sehr gut definierte Übergangsfrequenzen jedes einzelnen Elements. Damit sind Atome und Ionen mit extrem schmalen Übergängen ideale Frequenznormale. Wenn diese Übergänge mit Lasern in optischen Uhren abgefragt werden, bestimmt die Linienbreite des Lasers oft die Qualität der Uhr (Abb. 3). Frequenzkämme wie TOPTICA's DFC CORE [1, 2] dienen dazu, optische Uhren zu vergleichen. Bei dieser extremen Genauigkeit spielt die Kontrolle der Umgebungsbedingungen eine wichtige Rolle. Als Beispiel ist Licht bei einer „magischen Wellenlänge“ nötig, um neutrale Atome festzuhalten. Nur bei dieser Wellenlänge ist der Einfluss der optischen Falle auf den Uhrenübergang gering genug für die angestrebte Genauigkeit.

Hohe Anforderungen

Optische Fallen sind nur ein Beispiel dafür, wie sich mittels Laserlicht die Bewegung von Atomen manipulieren lässt. Ebenso kann es auch für die Kühlung von Atomen bis in den absoluten Grundzustand eingesetzt werden. Dies erfordert oft eine hohe Leistung bei voller Kontrolle über die spektralen Eigenschaften. Hohe Leistungen sind auch für die Skalierung von Quantencomputern auf Basis gefangener Ionen erforderlich, wobei jedes Ion, das ein einzelnes Quantenbit trägt, einzeln

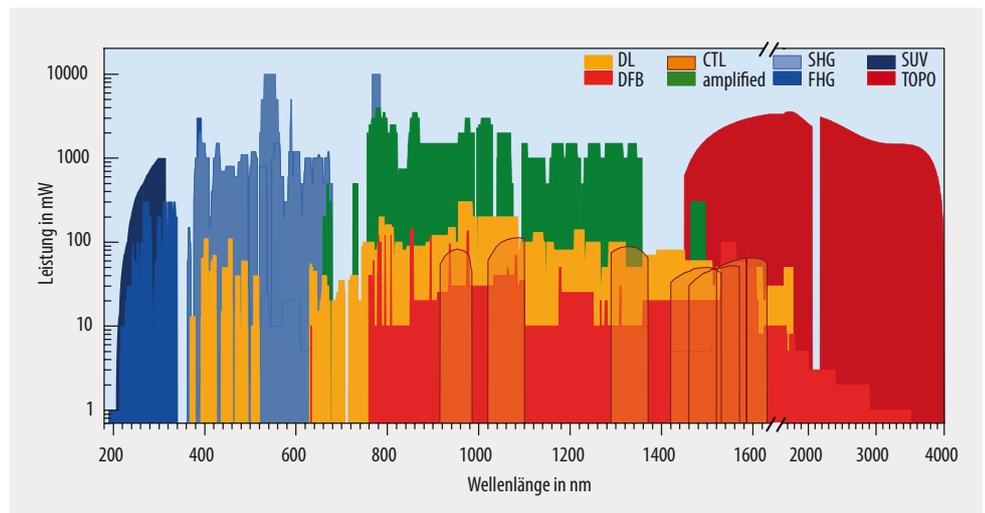


Abb. 2 Jedes Quantensystem benötigt Laser einer spezifischen Kombination aus Wellenlänge und Leistung. Durchstimmbare Diodenlaser von TOPTICA bieten eine Wellenlängenabdeckung von 190 nm bis 4 μ m in Kombination mit hoher Zuverlässigkeit und komfortabler Bedienung, was spektakuläre Anwendungen von Quantentechnologien ermöglicht.

angesprochen werden muss. Diese Anwendungen sind auch in Bezug auf die Ausrichtung und andere räumliche Eigenschaften der verwendeten Laserstrahlen sehr anspruchsvoll.

Die Polarisation der Laser ist ein weiterer Freiheitsgrad, der zur Unterscheidung zwischen spektral entarteten Übergängen mittels Auswahlregeln dient. Die Polarisation eines einzelnen Photons eignet sich hervorragend als Quantenbit in der Quantenkommunikation. Aber auch die Pulsform, die Frequenz und sogar der Bahndrehimpuls einzelner Photonen kann hierfür genutzt werden, jeweils mit spezifischen Vor- und Nachteilen. Auch die Phase und Am-

plitude der Lichtimpulse werden in der Quantenkommunikation genutzt.

Herausforderungen der Zukunft

Neben der anwendungsbestimmten und physikalisch bedingten Forderung nach Kontrolle aller Laserparameter gibt es viele technologische Herausforderungen, denen sich Lichtquellen für Quantentechnologien stellen müssen: So sind modensprungfreie Durchstimmung über große Frequenzbereiche, Zuverlässigkeit, geringer Stromverbrauch, niedrige Betriebskosten und dezentrale Steuerung unerlässlich. Diodenlaser erfüllen viele dieser Anforderungen.

2015 war das internationale Jahr des Lichts, um die Bedeutung von Licht und lichtbasierten Technologien zu würdigen. Quantentechnologien werden den durch Licht ermöglichten Anwendungen ein weiteres Kapitel hinzufügen.

Literatur

- [1] R. Kliese et al., Eur. Phys. J. Spec. Top. **225**, 2775 (2016)
- [2] T. Puppe et al., Opt. Lett. **41**, 1877 (2016)

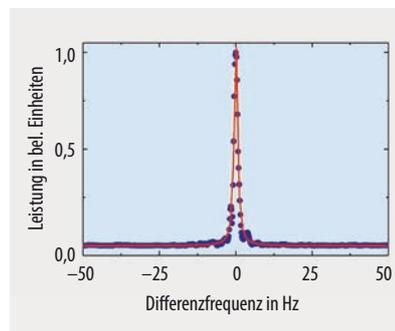


Abb. 3 Laser mit schmaler Linienbreite ermöglichen z. B. optische Uhren. Durch die Frequenzstabilisierung auf einen optischen Resonator hoher Finesse reduziert sich die Linienbreite von Diodenlasern auf 1 Hz und weniger. Die Grafik zeigt das Schwebungssignal zwischen zwei unabhängigen, resonatorstabilisierten TOPTICA Diodenlasern bei 1162 nm.

Autoren

Dr. sc. nat. Stephan Ritter und Dr. Jürgen Stuhler, TOPTICA Photonics AG, Lochhamer Schlag 19, 82166 Gräfelfing; Tel.: +49 (89) 858370, www.toptica.com