



Verbundprojekt: „QRydDemo“



Quantencomputer mit Rydbergatomen

Thema des Teilprojekts:

Speziallasersysteme für atomare Quantenprozessoren

Laufzeit: 01.02.2021 bis 31.01.2025

TOPTICA Photonics SE¹

Förderkennzeichen: 13N15635

Abschlussbericht

**Gefördert vom Bundesministerium für Bildung und Forschung
im Rahmen *Quantenprozessoren und Technologien für Quantencomputer***

Bericht erstellt am 31.07.2025

¹ Die Geschäftsform der TOPTICA Photonics AG wurde zum 18.07.2025 von einer Aktiengesellschaft (AG) in eine Societas Europaea (SE) umgewandelt. Diese Umwandlung hatte keine Auswirkungen auf die Durchführungen des Teilvorhabens im QRydDemo Projekt.

Zusammenfassung

Das Verbundprojekt „Quantencomputer mit Rydberg Atomen (QRydDemo)“ wurde im Rahmen des Vorhabens „Quantenprozessoren und Technologien für Quantencomputer“ innerhalb der Bekanntmachung „Quantentechnologien – von der Grundlage zum Markt“ vom BMBF gefördert. Koordiniert wurde der Verbund vom 5. Physikalischen Institut der Universität Stuttgart (PI5) durch Prof. Tilman Pfau. Neben dem Projektkoordinator waren das 3. Institut für Theoretische Physik der Universität Stuttgart (ITP3) und die Universität Ulm als akademische Partner beteiligt. Die TOPTICA Photonics SE war als Industriepartner im Konsortium beteiligt. Koordiniert und geleitet wurde das Projekt bei der TOPTICA Photonics SE durch Dr. Jürgen Stuhler, Dr. Lukas Reichsöllner und Dr. Florian Figge. Nach dem Ausscheiden von Dr. Reichsöllner übernahm Dr. Christoph Tresp dessen Rolle.

Der Forschungsverbund hatte sich zum Ziel gesetzt einen Quantencomputer-Demonstrator auf der Plattform neutraler Strontium-Atome durch die Nutzung der starken und langreichweitigen Rydberg-Rydberg-Wechselwirkung zu realisieren. Diese Plattform gilt als vielversprechend bezüglich der Skalierbarkeit in der Anzahl an Qubits und der Geschwindigkeit von Gatteroperationen.

Für dieses Vorhaben steuerte die TOPTICA Photonics SE im Teilprojekt „Speziallasersysteme für atomare Quantenprozessoren“ Arbeitspakete zur Realisierung von maßgeschneiderten Lasersystemen für den Einsatz im Quantencomputer-Demonstrator bei. Insbesondere die Ausnutzung eines neuartigen Raman-Qubits erforderte dabei die Verwendung von Hochleistungslasern mit mehreren Watt optischer Leistung im grünen (540 nm) und gelben (592 nm) Wellenlängenbereich, um das Fangen einzelner Strontium-Atome in optischen Pinzetten (Tweezer) zu ermöglichen. Die TOPTICA Photonics SE bietet in diesem Wellenlängenbereich rauscharme frequenzverdoppelte Diodenlasersysteme an. Aufgrund des halbleiterbasierten Verstärkerkonzepts in den kommerziellen Lasersystemen können diese nicht in den benötigten Leistungsbereich skaliert werden. Aus diesem Grund wurden im Rahmen des Forschungsprojekts Konzepte zur Realisierung von faserverstärkten Diodenlasern und deren Frequenz-Verdopplung untersucht, um die benötigten Leistungen bei niedrigem Intensitätsrauschen zu erreichen.

Um die Zustände der einzelnen Atome im Demonstrator mit höchster Genauigkeit manipulieren zu können werden Lasersysteme mit geringem Phasenrauschen und hoher spektraler Reinheit benötigt. Die von der TOPTICA Photonics AG vertriebenen gitterstabilisierten Diodenlaser weisen typischerweise Linienbreiten von mehreren 10 bis 100 kHz auf. Diese sind für die Realisierung eines Quantencomputer-Demonstrators nicht ausreichend. Zwar kann die Linienbreite durch die Stabilisierung auf eine externe Referenz reduziert werden, allerdings auf Kosten sogenannter Servo-Bumps (Regeloszillationen). Um dieses Problem zu reduzieren, wurde einerseits die intrinsische Linienbreitenreduktion eines Diodenlasers erforscht. Andererseits wurde die schmalbandige Filterung von Frequenzrauschen mit einem Fabry-Perot Resonator untersucht. Darüber hinaus wurde die breitbandige Filterung von verstärkter spontaner Emission in Trapezverstärkern mit Hilfe geeigneter optischer Filter analysiert und der resultierende Einfluss auf die relative Energieverschiebung von Energieniveaus gefangener Atome bestimmt.

1. Hauptteil

Die Aufgaben der TOPTICA Photonics SE lassen sich in zwei thematische Arbeitspakete unterteilen. Dies ist einerseits die Erforschung von Lasersystemen mit hoher Ausgangsleistung und geringem Intensitätsrauschen in Arbeitspaket 1 zum Fangen einzelner Strontium-Atome im Gesamtsystem-Demonstrator. Andererseits wurde in Arbeitspaket 2 die Erforschung von frequenzrauscharmen Lasersystemen für die präzise Adressierung und Manipulation einzelner Qubits in angegangen.

1.1. AP 1 Erforschung von Hochleistungslasersystem für optische Tweezer Arrays

In Arbeitspaket 1 wurden zwei Hochleistungslasersysteme für optische Tweezer-Arrays zum Fangen einzelner Strontium-Atome am Gesamtsystem-Demonstrator entwickelt. Die Lasersysteme benötigen eine hohe optische Ausgangsleistung von > 8 W, damit eine ausreichende Anzahl (~ 2000) optischer Tweezer mit hinreichender Falltiefe zum Fangen einzelner Strontium-Atome am Gesamtsystem-Demonstrator realisiert werden kann. Dabei waren im Rahmen des Forschungsverbunds zwei unterschiedliche Wellenlängen besonders relevant:

- 540 nm für die Realisierung einer Falle mit magischer Wellenlänge für die Sr-88 Zustände 3P_0 und 3P_2 des Raman-Qubits
- 592 nm für die Realisierung einer Falle mit magischer Wellenlänge für die beiden Zustände des Raman-Qubits und den Rydberg-Zustand.

1.1.1. AP 1.1 Erforschung eines Faserverstärkers bei 1080 nm

Als Grundlage für die Erzeugung eines leistungsstarken Lasers bei 540 nm wurde ein Faserverstärker, der auf einer Ytterbium-dotierten optischen Faser als Gainmedium basiert, erforscht. Mit seiner theoretischen Bandbreite von <1030 nm bis 1120 nm eignet sich dieses Gainmedium im Besonderen zur Realisierung der Zielwellenlänge durch Verstärkung und anschließende Frequenzverdopplung. Aus diesem Grund wurde zunächst ein zweistufiges Verstärkerdesign bestehend aus einem Vorverstärker und daran anschließenden Hauptverstärker erforscht. Dieses Design erwies sich als besonders vielversprechend hinsichtlich der benötigten Ausgangsleistung und dem relativen Intensitätsrauschen. Als Seed für den Faserverstärker dient ein Diodenlaser mit externem Feedback (ECDL). Der Faserverstärker wurde experimentell für optimale Ausgangsleistung und niedriges Intensitätsrauschen optimiert. Dabei wurde insbesondere darauf geachtet, die Faserlängen kurz zu halten um stimulierte

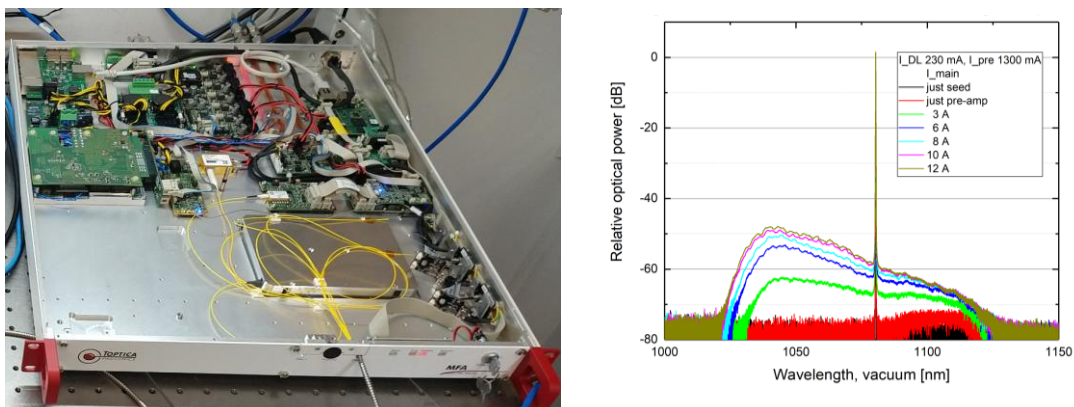


Abb. 1 Realisierung der Elektronik des Faserverstärkers inklusive Pumpdioden, Treibern und Monitor-Fotodioden (links) und Ausgangsspektrum des Faserverstärkers für verschiedene Pumpströme des Hauptverstärkers (rechts).

Brillouin-Streuung (SBS) zu verhindern. Zum Betrieb des Faserverstärkers wurde ein Elektronik-Einschub im 19“-Zoll Format mit einer Höhe von 22 mm (1 HE) konzipiert (vgl. Abb. 1 links). Dieser Elektronik-Einschub umfasst Schnittstellen zur externen Kommunikation, Stromtreiber zum Betrieb der Pumpdioden, Monitordioden zur Überwachung optischer Leistungen und Elektronik für das Laser-Sicherheits-Konzept. Außerdem sind die Pumpdioden des Verstärkers selbst im Elektronikmodul untergebracht. Da beim Betrieb der Pumpdiode des Hauptverstärkers (mit bis zu 12 A Pumpstrom) eine

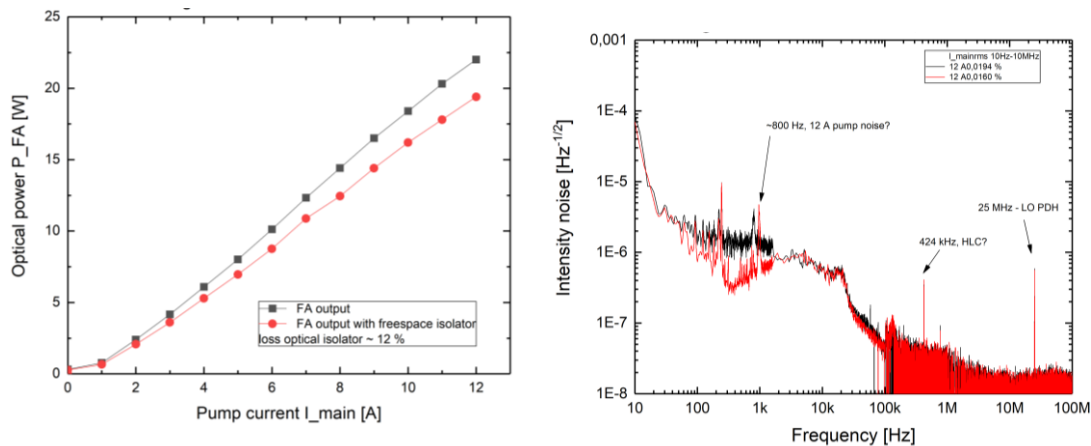


Abb. 2 Ausgangsleistung des 1080 nm Faserverstärkers für verschiedene Betriebsströme der Pumpdiode des Hauptverstärkers (links). Messung des relativen Intensitätsrauschens mit (rot) und ohne (schwarz) aktiver Stabilisierung.

hohe Abwärme erzeugt wird, ist der Elektronik-Einschub mit Wärmetauscher zur Wasserkühlung versehen. Dieses Kühlkonzept ermöglicht eine Integration des Einschubs, wahlweise in einem Rack-System oder auf einem Lasertisch und vermeidet störende akustische Einwirkungen von Lüftern. Ausgangsspektren des Faserverstärkers bei 1080 nm sind in Abb. 1Abb. 2 rechts zu sehen. Die Spektren zeigen auch bei maximaler Ausgangsleistung des Faserverstärkers eine Rauscherunterdrückung von ≥ 50 dB des breitbandigen ASE-Untergrund (amplified spontaneous Emission) gegenüber des Trägersignals. Die Ausgangsleistung des Faserverstärkers ist abhängig von der Pumpleistung, insbesondere des Hauptverstärkers. Eine typische Kennlinie ist in Abb. 2 (links) dargestellt. Bei maximal verfügbarem Pumpstrom von 12 A kann damit eine optische Ausgangsleistung von bis zu 22 W aus dem Verstärker erreicht werden.

Aufgrund der, für die Lebensdauer einzelner in optischen Tweezern gefangener Atome, hohen Bedeutung des relativen Intensitätsrauschens wurde dieses im Detail untersucht. Der Faserverstärker zeigt beim Betrieb bei einer Ausgangsleistung 22 W ein RMS-Rauschen von 0.02 – 0.03 % integriert über den Frequenzbereich von 10 Hz bis 10 MHz (Abb. 2. rechts). Um das Rauschen noch weiter zu verbessern, wurde eine aktive Stabilisierung des Intensitätsrauschens mithilfe einer auf die Pumpdioden des Faserverstärkers wirkenden Regelschleife implementiert. Dies ermöglichte eine weitere Reduktion des Intensitätsrauschens im Frequenzbereich bis 2 kHz.

1.1.2. AP 1.2 Erforschung der Frequenzverdopplung auf 540 nm

Um aus der Ausgangsstrahlung des Faserverstärkers die benötigte Wellenlänge bei 540 nm zu erreichen, wurde die Methode der resonanten Frequenzverdopplung mit einem sich in einem Überhöhungsresonator befindlichen nichtlinearen Kristall realisiert. Dazu wurden die Parameter des Verdopplungsresonators sowohl für eine ausreichende Konversionseffizienz als auch die Langlebigkeit des Systems bei hohen Ausgangsleistungen optimiert.

Zur vereinfachten Bedienung am Gesamtsystem-Demonstrator wurde ein Bedienkonzept erarbeitet, welches in Abb. 3 (links) dargestellt ist. Das gesamte Lasersystem lässt sich durch TOPTICAs bewährten digitalen Lasercontroller (DLC pro) ansteuern. Durch eine direkte Netzwerkverbindung lässt sich ebenfalls die weiter oben vorgestellte Elektronikeinheit des Faserverstärkers ansteuern. Softwareseitig konnte damit eine komfortable Ansteuerung des Faserverstärkers durch den Nutzer inklusive verschiedener Sicherheitsmechanismen wie der Überwachung von Seedleistungen mit automatischer Abschaltung implementiert werden. Eine angepasste graphische Benutzeroberfläche erlaubt dem Nutzer eine komfortable Nutzung des gesamten Lasersystems und eine Integration ins Experiment über eine Programmierschnittstelle via Python. Die optische und mechanische Integration des Faserverstärkers ist in Abb. 3 (rechts) gezeigt. Um die Längen der optischen Fasern (zur Reduktion von SBS) möglichst kurz zu halten, wurde ein Konzept gewählt bei dem der Faserverstärker als Gesamtes in den Laserkopf integriert wurde. Als Schnittstelle zwischen Laserkopf und Verstärker-Elektronik inkl. Pumpdioden dient ein Bündel mit Glasfasern, um die Strahlung der Pumplaser zum Faserverstärker zu leiten und das optische Monitorsignal an ausgewählte Überwachungsfotodioden zu leiten. Der Ein- und Ausgang des Faserverstärkers wurden mit Kollimatoren versehen, um das Seed-Licht einzukoppeln und die verstärkte Laserstrahlung in den Verdopplungsresonator zu koppeln. Ein optischer Isolator am

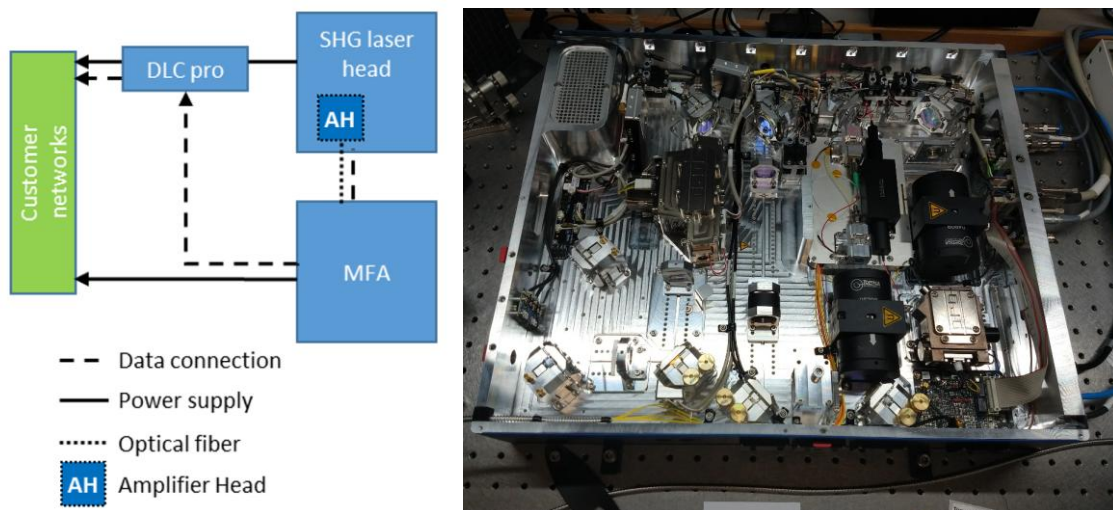


Abb. 3 Schematische Darstellung des Bedienkonzepts des faserverstärkten und frequenzverdoppelten Systems bei 540 nm (links). Realisierung des Laserkopfs mit integriertem Faserverstärker (rechts).

Eingang schützt den Seedlaser vor rückwärts emittiertem Licht, Isolatoren am Ausgang verhindern Rückreflexe des Verdopplungsresonators in den Faserverstärker.

Mit diesem Aufbau konnte eine maximale Ausgangsleistung des Lasersystems von 11.2 W realisiert werden. Dies entspricht einer Verdopplungseffizienz von 58 %. Bei dieser Ausgangsleistung konnte eine Langzeitstabilität der frequenzverdoppelten Ausgangsleistung über eine Messdauer von > 400 h demonstriert werden.

1.1.3. AP 1.3 Validierung am Demonstrator

Der in AP 1.1 und AP 1.2 erforschte Demonstrator wurde gegen Ende des ersten Projektjahrs an das 5. Physikalische Institut in Stuttgart übergeben und dort installiert. Abb. 4 zeigt den Laser nach der Installation am Gesamtsystem-Demonstrator. Dem Team in Stuttgart gelang es mit diesem Lasersystem einzelne Strontium-Atome in optischen Tweezern zu laden und zu kühlen. Die Lebensdauer der gefangenen Atome beträgt mehrere Sekunden und ist nicht durch die Rauscheigenschaften der Laserintensität limitiert. Seit der Inbetriebnahme konnte das Lasersystem zur Realisierung von insgesamt vier [2, 3, 4] wissenschaftlichen Publikationen beitragen, u. A. der im Projekt angestrebten

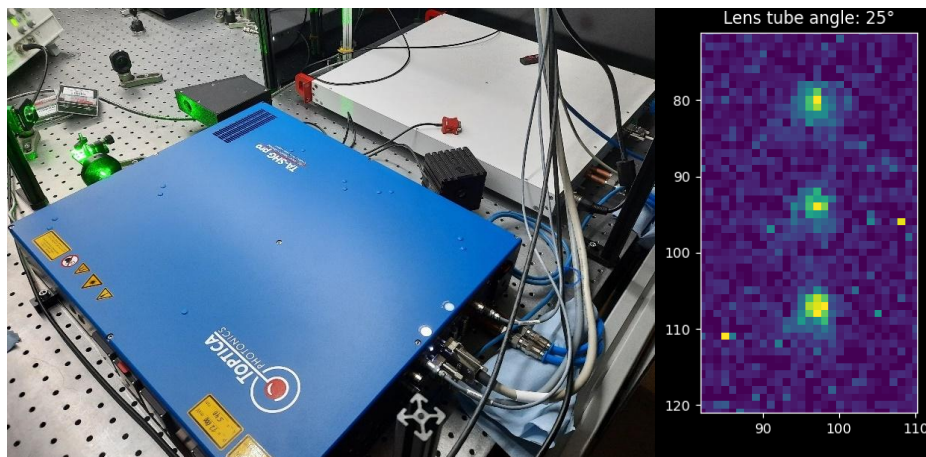


Abb. 4 Foto des 540 nm Laser-Prototyps am Gesamtsystem-Demonstrator in Stuttgart (links) und Abbildung eines Falschfarbenbilds der Fluoreszenz von drei einzelnen Strontium-Atomen, die in mit 540 nm Licht erzeugten Tweezern gefangen wurden.

Realisierung des Feinstruktur Qubits [5]. Ein zwischenzeitliches technisches Problem, welches durch eine defekte Pumpdiode im Vorverstärker verursacht wurde, konnte Ende September 2022 durch einen Austausch der Pumpdiode vor Ort behoben werden. Vorsorglich wurde ein zusätzlicher Protection-WDM zum Schutz der Laserdiode vor Rückreflexen eingebaut. Seit diesem Eingriff läuft das System zuverlässig stabil.

² C. Hölzl et al: "Motional ground-state cooling of single atoms in state-dependent optical tweezers", Phys. Rev. Research 5, 033093 (2023)

³ C. Hölzl et al: „Long-Lived Circular Rydberg Qubits of Alkaline-Earth Atoms in Optical Tweezers“, Phys. Rev. X 14, 021024 (2024)

⁴ M. Wirth et al: Quadupole Coupling of Circular Rydberg Qubits to Inner Shell Excitations, Phys. Rev. Letters 133, 123403 (2024)

⁵ G. Unnikrishnan et al: Coherent Control of the Fine-Structure Qubit in a Single Alkaline-Earth Atom, Phys. Rev. Letters 132, 150606 (2024)

1.1.4. AP 1.4 Erforschung der Faserverstärkung bei 1184 nm

Die für die mittels resonanter nichtlinearer Frequenzverdopplung (second harmonic generation, SHG) geplante Realisierung von 592 nm Laserstrahlung benötigte Wellenlänge von 1184 nm liegt außerhalb des Gain-Bereichs von aktiven Ytterbium-dotierten Faserverstärkern wie sie z. B. in AP 1.1 realisiert

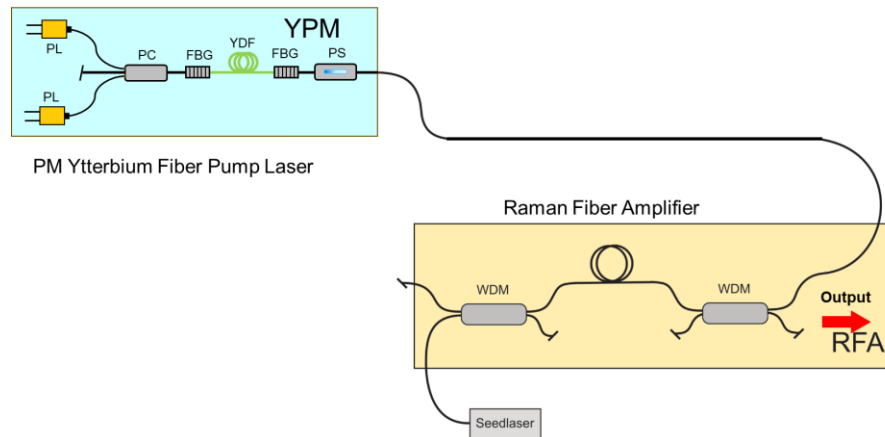


Abb. 5 Prinzipieller Aufbau des Raman-Faserverstärkers. Ein speziell ausgelegter Hochleistungspumplaser (links oben, YPM) bei einer Wellenlänge von 1120 nm wird rückwärts als Pumpe in den Raman-Faser-Verstärker (RFA) eingekoppelt und verstärkt das gegenläufig propagierende Seedlicht.

wurden. Eine geeignete Architektur zur Verstärkung in diesem Wellenlängenbereich bietet ein Raman-Faserverstärker. Ein solcher Raman-Faserverstärker besteht insgesamt aus zwei Komponenten: einem leistungsstarken Pumplaser und dem eigentlichen Raman-Verstärker. Im letzteren wird das injizierte Seed-Laserlicht mittels stimulierter Raman-Streuung durch energiereichere Photonen des Pumplasers verstärkt.

Im ersten Teilarbeitspaket wurde ein cw-Hochleistungs-Pumplaser bei einer Wellenlänge von 1120 nm mit einer angestrebten optischen Ausgangsleistung von 40 W erforscht. Dafür wurde zunächst eine Software zur numerischen Simulation eines polarisationserhaltenden Faserlasers im Dauerstrichbetrieb programmiert. Mithilfe dieser Simulations-Software konnte ein grundlegendes Design für einen effizienten Faserlaser-Resonator, inklusiver der Auslegung der benötigten Faser-Bragg Gitter, erarbeitet werden.

Das erarbeitete Konzept wurde schließlich hinsichtlich der Baubarkeit mit faser-optischen Komponenten und der thermischen Stabilität optimiert. Für den Betrieb des Pumplasers wurde ein rauscharmer Stromtreiber erforscht, um die eingesetzten Hochleistungspumpdioden (> 100 W optische Leistung) zu betreiben. In diesen Stromtreiber wurde eine schnelle Abschaltung integriert, welche es erlaubt den Pumplaser im Demonstrator sicher betreiben zu können. Anschließend wurde ein Konzept zur optomechanischen Integration des Pumplasers in einen 19“-Einschub erarbeitet, welches auch die thermische Stabilität des Systems durch eine geeignete Wärmeanbindung inklusive Anbindung an eine Wasserkühlung zur effizienten Abfuhr der Abwärme gewährleistet.

Der nach diesem Konzept realisierte Pumplaser bei 1120 nm liefert eine Ausgangsleistung von bis zu 40 W. Es erfolgten Messungen um das Intensitätsrauschen (RIN) und die Leistungsstabilität zu untersuchen.

Im zweiten Teilarbeitspaket wurde ein polarisationserhaltender Raman-Faserverstärker, bei dem der Pumplaser als Pumpquelle eingesetzt wurde, erforscht. Die besondere Schwierigkeit dieses Arbeitspakets bestand darin, ein geeignetes Konzept zu erforschen um stimulierte Brillouin-Streuung (SBS) durch die schmalbandige Signalquelle zu vermeiden. Dafür wurde ein Simulations-Programm erarbeitet, welches erlaubt longitudinale Stressprofile entlang der optischen Faser auf einer speziellen

Faserwickleinheit im Hinblick auf minimale Brillouin-Streuung zu optimieren. Für den Aufbau des Raman-Verstärkers wurden verschiedene polarisationserhaltende Strahlkoppler (WDMs) in speziell dafür ausgelegten Messaufbauten unter dem Einfluss hoher optischer Leistungen qualifiziert. Für den Aufbau des Raman-Verstärkers wurde schließlich eine optomechanische Plattform auf Basis eines 19"-Baugruppenträgers entworfen, welche auch ein thermisches Kühlkonzept inklusive Wasserkühlung beinhaltet. Als Schnittstelle des Raman-Faserverstärkers wurde ein Freistrahl-Auskoppler erforscht. Dieser beinhaltet eine Faser-Endkappe mit Anti-Reflex-Beschichtung um den hohen Ausgangsleistungen am Ausgang Stand zu halten.

Nach der Forschungs- und Konzeptionsphase wurde der Demonstrator aufgebaut. Der Verstärker ermöglicht eine maximale Ausgangsleistung von 25 W bei der spezifizierten Wellenlänge von 1184 nm.

1.1.5. AP 1.5 Design und Aufbau des verdoppelten faserverstärkten Diodenlasers bei 592 nm

Nach der Beendigung von AP 1.4 wurde die Integration des Raman-Faserverstärkers in das gesamte Lasersystem bestehend aus Diodenlasereinheit als Seed und einer Einheit zur resonanten Frequenzverdopplung angegangen. Eine Fotografie des Gesamtaufbaus ist in Abb. 6 dargestellt. Für die Realisierung des Systems wurde eine Architektur zur Integration des Raman-Faserverstärkers festgelegt. Der als Seed fungierende Diodenlaser und ein als erste Verstärkereinheit eingesetzter Trapezverstärker wurde dazu in einem Laserkopf untergebracht. Die Laserstrahlung wurde mittels einer optischen Faser dem Raman-Verstärker zugeführt. Ebenso wird die verstärkte Laserstrahlung des Raman-Verstärkers mit dem in AP 1.4 erforschten Faserkollimator wieder dem Laserkopf zugeführt und ist mit diesem fest verbunden.

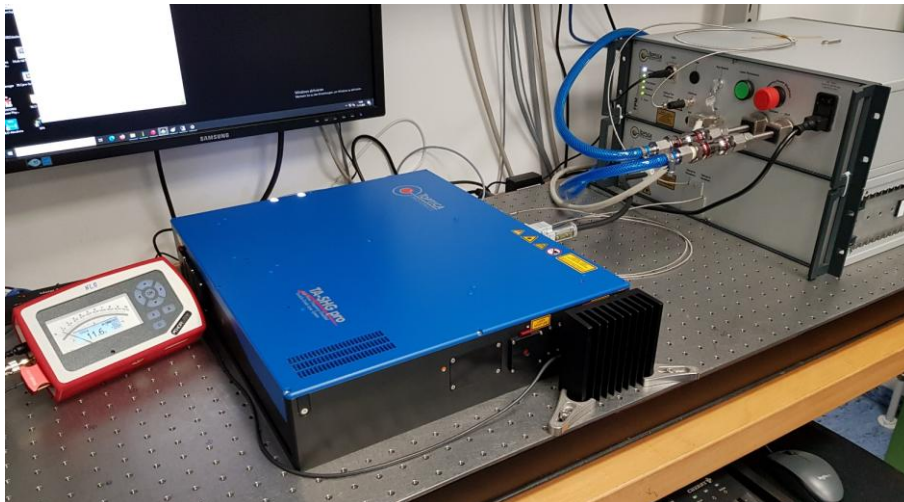


Abb. 6 Realisierung des Raman-verstärkten und frequenzverdoppelten Diodenlasersystems bei 592 nm. Seed-Laser und Frequenzverdopplungseinheit sind im linken Teilsystem untergebracht (blauer Deckel). Der Raman-Faserverstärker und der zugehörige Hochleistungs-Pumplaser befinden sich in den 19"-Baugruppenträgern (rechts).

Für die effiziente Frequenzverdopplung der verstärkten Laserstrahlung wurden die Strahlparameter des Verdopplungsresonators optimiert und die benötigten optischen Elemente zur Erzielung dieser Parameter gewählt.

Nach Aufbau und Inbetriebnahme wurde das System gründlich bezüglich verschiedenster Laserparameter (Ausgangsleistung, Konversionseffizienzen, Strahlparameter, PER, Intensitätsrauschen, Phasenrauschen) charakterisiert und optimiert. Bei der Zielwellenlänge von 592 nm konnte eine

Ausgangsleistung von 15 W erreicht und damit die spezifizierte Ausgangsleistung von 8 W übertroffen werden. Mit einem Langzeittest konnte nachgewiesen werden, dass diese Leistung auch über eine Messperiode von 200 h stabil gehalten werden konnte (< 4% Leistungsfluktuationen). Besonderes Augenmerk wurde auf die Messungen des relativen Intensitätsrauschens (RIN) gelegt, da dieses die Lebensdauer eines Atoms in der Falle beeinflussen kann. Für diesen Parameter wurden je nach Ausgangsleistung integrierte RMS-Werte (10 Hz bis 10 MHz) im Bereich von 0.9 % bis 1.5% gemessen. Vergleichsmessungen mit anderen Lasersystemen bei gleicher Wellenlänge aber geringerer Ausgangsleistung am 5. Physikalischen Institut in Stuttgart ergaben bei diesen deutlich höhere Rauschwerte. Dennoch wurde in Absprache mit den Projektpartnern versucht, das Intensitätsrauschen noch weiter zu verringern. Zu diesem Zweck wurden Netzteile und Stromtreiber des Ytterbium-Pumplasers des Raman-Verstärkers gegen neuere und rauschärmere Varianten getauscht. Dadurch konnte das Intensitätsrauschen auf bis zu 0.7 % reduziert werden.

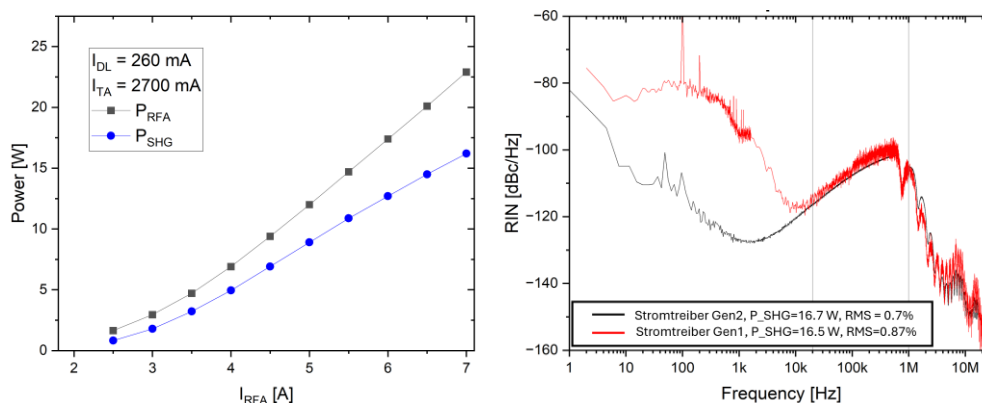


Abb. 7 Charakterisierungsmessung der Ausgangsleistung von Raman-Faserverstärker bei 1184 nm und frequenzverdoppelter Laserstrahlung bei 592 nm in Abhängigkeit des eingestellten Stroms der Pumpdioden im Pumplaser (links). Messung des relativen Intensitätsrauschens vor (rot) und nach (schwarz) Tausch von Netzteilen und Stromtreibern des Pumplasers.

1.1.6. AP 1.6 Validierung am Gesamtsystem-Demonstrator

Das Lasersystem für die Erzeugung von optischen Tweezern bei einer Wellenlänge von 592 nm wurde im August 2023 an das 5. Physikalische Institut in Stuttgart übergeben und erfolgreich installiert, kam aber bis zur Beendigung dieses Teilvorhabens nicht zum Einsatz.

1.2. AP 2 Erforschung rauscharmer Laser für die Adressierung von Qubits

Zur hochkohärenten Adressierung einzelner Qubits werden besonders reine und rauscharme Lasersystem benötigt. In diesem Arbeitspaket wurden Ansätze zur Realisierung solcher rauscharmer Lasersystemen erforscht.

Insbesondere mit Hilfe von Trapez-Verstärkern (Tapered Amplifier, TA) verstärkte Diodenlaser weisen eine eher geringe Unterdrückung von verstärkter spontaner Emission (ASE) im Verhältnis zur in der Trägerfrequenz emittierten Leistung auf. Diese „unerwünschte“ Laserstrahlung kann bei der Anwendung des Lasers als optische Falle zu einer relativen Verschiebung der Fallentiefe für die unterschiedlichen Energieniveaus gefangenen Atome und damit zu einer Linienverbreiterung bei Quantenoperationen führen. Bei der Anwendung des Lasers zur Qubit-Manipulation kann die spontane Emission zur Dephasierung der kohärenten Kopplung beitragen und dadurch die Güte der Operationen beeinträchtigen.

Ein weiterer Effekt, welcher die Güte von Gatteroperationen beeinflussen kann, wird durch das Frequenzrauschen der verwendeten Laserquellen verursacht. Das Frequenzrauschen kann u.A. als eine zeitabhängige Verstimmung der Laserfrequenz im Bezug zur atomaren Resonanzfrequenz wirken und dadurch ebenfalls für eine Dephasierung von Gatteroperationen sorgen.

AP 2.1. Filtermethoden zur breitbandigen ASE-Unterdrückung

Die breitbandige Filterung spontaner Emission einer Laserquelle kann durch verschiedene optische Elemente realisiert werden. Die Vor- und Nachteile verschiedener Filterelemente wurden untersucht, dabei wurden Fiber-Bragg-Gitter in Transmission und Reflektion, Volume-Bragg Gitter, Fabry-Perot Resonatoren und Interferenzfilter als Lösungen in Betracht gezogen. Die verschiedenen Optionen wurden hinsichtlich ihrer Bandbreite des Transmissionsfensters, der Unterdrückung der spontanen Emission, der Transmission der Zentralwellenlänge (Effizienz) und der Durchstimmbarkeit des Transmissionsfensters analysiert. Die Ergebnisse dieser Betrachtung sind in Tabelle 1 zusammengefasst.

	Bandbreite (FWHM)	ASE Unterdrückung	Effizienz	Durchstimmbarkeit	Kommentar
Fiber-Bragg Gitter (Reflektion)	~ 10 GHz möglich	Etwa 30 dB (0.2 nm vom Träger entfernt)	65-70% (ohne Faserkopplung)	< 1 nm	- Unterdrückung und Bandbreite sehr gut - Effizienz nur moderat
Fiber-Bragg Gitter (Transmission)	200 MHz möglich	~ 20 dB	> 99%	< 1 nm	- Extrem gute Effizienz - Aktive Stabilisierung notwendig - Zusätzliche breitbandige Filterung nötig
Volume Bragg Gitter (VBG)	Rund 10 GHz	25 dB	> 90 % (ohne Faserkopplung)	> 5 nm	- Gute Spezifikationen - Nicht so stabil wie Faser basierte Lösungen
Fabry-Perot Resonator	wenige MHz	25 dB	> 80% (typisch)	> 10 nm	- Komplexe Lösung - Aktive Stabilisierung nötig
Interferenzfilter	~ 150 GHz	25 dB	> 90%	< 2 nm	- Bandbreite eher groß

Tabelle 1: Zusammenfassung der Eigenschaften verschiedener optischer Elemente für den Einsatz zur breitbandigen Filterung von stimulierter spontaner Emission eines Diodenlasers.

Während die erzielbare Unterdrückung der ASE für die verschiedenen gewählten Optionen vergleichbar im Bereich von 20 bis 30 dB im Vergleich zum Trägersignal liegt, unterscheiden sich die Filterungsmethoden deutlich in der Transmissions-Bandbreite des Filters, der Transmission des Trägersignals und der Durchstimmbarkeit des Transmissionsfensters. Insbesondere das Fiber-Bragg Gitter in Transmission und Fabry-Perot Resonatoren können ein sehr schmalbandiges Transmissionsfenster besitzen, benötigen daher aber eine aktive Stabilisierung des Transmissionsfenster auf die Trägerfrequenz.

Um die Relevanz der verschiedenen Parameter im Experiment des Quantencomputer-Demonstrators zu ermitteln, wurde die relative Energie-Verschiebung ^{87}Sr -Zustände $^1\text{S}_0$ (Grundzustand) und $^3\text{P}_0$ (angeregter Zustand), welche den Uhrenübergang bei 698 nm bilden, unter dem Einfluss der verstärkten spontanen Emission eines Lasers als Fallenlaser berechnet. Die Analyse basiert auf einem vermessenen Emissionsspektrum einer mittels Trapezverstärkers verstärkten Laserquelle bei der für diesen Übergang magischen Wellenlänge von 813 nm. Entlang Fasano et al.⁶ wurde die relative Verschiebung des Uhrenübergangs aus den Polarisierbarkeiten der beteiligten Zustände und dem Laserspektrum bestimmt.

Die Ergebnisse der Überprüfung zeigen eine relative Verschiebung der Resonanzfrequenz um den Wert

⁶ R.J. Fasano et al., Phys. Rev. Applied **15**, 044016 (2021)

$\frac{\Delta\nu_{clock}}{\nu_{clock}} = 2.4 \cdot 10^{-15}$ für den ungefilterten Laser. Im nächsten Schritt wurde das Laserspektrum mit den Transferfunktionen der entsprechenden Laser um das Trägersignal numerisch gefiltert. Diese Simulationen liefern den besten Wert für das in Reflektion verwendete Faser-Bragg Gitter mit einer relativen Frequenzverschiebung des Uhrenübergangs von $1.25 \cdot 10^{-20}$. Jedoch können auch schon mit einem Interferenzfilter relative Frequenzverschiebungen auf der Größenordnung von 10^{-18} erreicht werden.

1.2.1. AP 2.2 Schmalbandige Servo-Bump-Filterung

Eine gängige Methode, um die Linienbreite eines Diodenlasers zu reduzieren ist ein sogenannter Frequenzlock. Dafür wird zunächst ein Fehlersignal mittels einer schmalbandigen optischen Referenz generiert (beispielsweise mit einem hochstabilen Fabry-Perot Resonator oder einem Frequenzkamm) und dieses mit Hilfe eines PID-Reglers als Feedback z.B. auf den Laserstrom appliziert. Je nach Güte der optischen Referenz können dadurch Linienbreiten von weniger als 1 Hz erreicht werden.

Der Nachteil dieser Methode zur Linienbreitenreduktion ist, dass die Regelbandbreite eines solchen Regelkreises limitiert ist und insbesondere bei den Frequenzen welcher der Regelbandbreite entsprechen Regeloszillationen entstehen. Diese sind abhängig vom Halbleitermaterial, optischen und elektrischen Pfadlängen und der eingesetzten Detektions- und Regelelektronik. Typische Regelbandbreiten liegen im Bereich von hunderten kHz bis mehreren MHz, und damit im Frequenzbereich der im Quantencomputer Demonstrator zum Treiben der Qubit Übergänge verwendet werden soll. Rauschen in diesem Frequenzbereich hat besonders starken Einfluss auf die erreichbare Güte der Quantengatter und soll daher so gut wie möglich unterdrückt werden.

Um die Regeloszillationen zu unterdrücken, wurde in diesem Arbeitspaket der Einfluss des Dämpfungsverhaltens eines externen Fabry-Perot Resonators untersucht. Ziel war es ein ausreichendes Dämpfungsverhalten bei Frequenzen im Bereich > 1 MHz zu erreichen, um das Frequenzrauschen bei den im Gesamtsystem-Demonstrator angestrebten Gatter-Frequenzen ausreichend zu dämpfen. Dies legt die Linienbreite des Fabry-Perot Resonators auf einige 100 kHz fest. Diese Linienbreite wurde experimentell mit einem Fabry-Perot Resonator mit einer Länge von 5 cm, d.h. einem freien Spektralbereich von 3 GHz realisiert. Dazu wurde ein Spiegelpaar, dessen Reflektivität einer Finesse von 20 000 des Resonators entspricht, verwendet. Die resultierende Linienbreite entspricht daher $\Delta f_{FWHM} = 150$ kHz und damit der benötigten Spezifikation.

Für die experimentelle Demonstration wurde ein Diodenlaser auf einen externen Resonator frequenzstabilisiert, um eine Linienbreite von 20 Hz zu erhalten. Der Hauptanteil der verfügbaren

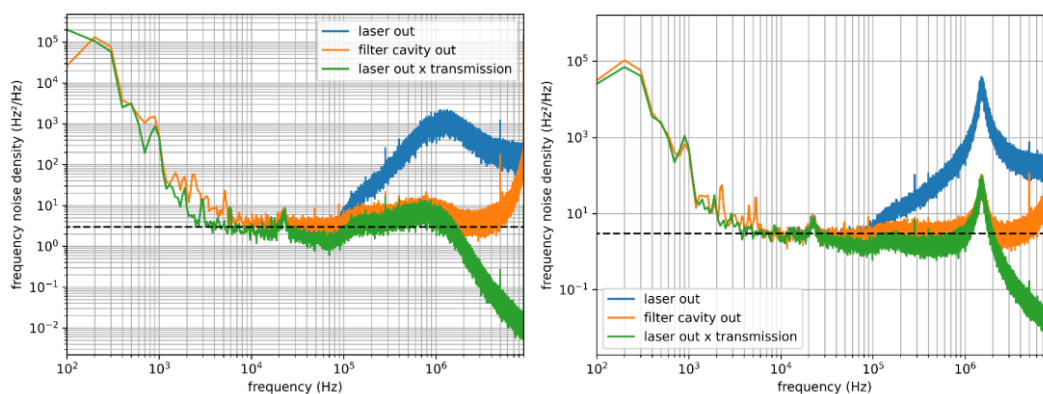


Abb. 8 Messung der Frequenzrauschdichte eines extern frequenzstabilisierten Lasers mit und ohne Fabry-Perot Resonator zur Filterung der Regeloszillationen. Die blauen Kurven entsprechen der Frequenzrauschdichte des gelockten und ungefilterten Lasers. Die orangefarbenen Messkurven entsprechen der Frequenzrauschdichte nach Filterung durch den Filter-Resonator. Die grüne Kurve entspricht der theoretisch zu erwartenden Filterung. Die beiden Graphen zeigen unterschiedliche Einstellungen der Servo-Parameter des Regelkreises zur Linienbreitenreduzierung des Lasers,

Laserleistung wurde in einem separaten optischen Aufbau zugeführt, um dort in den Filter-Resonator eingekoppelt zu werden.

Die Herausforderung bestand darin, die Resonanz-Frequenz des Filter-Resonators auf die Frequenz der Laserstrahlung anzugleichen. Dafür wurde der Filter-Resonator modulierbar ausgelegt, indem ein Spiegel des Plan-Konkaven Resonator-Designs auf einem Piezo-Aktuator platziert wurde.

Dies ermöglichte mit einem weiteren Regelkreis (Pound-Drever-Hall Methode) die Länge des Filter-Resonators auf die Frequenz der emittierten Laserstrahlung zu stabilisieren, um eine hohe Transmission zu gewährleisten. Das durch den Filter-Resonator transmittierte Licht wurde in eine optische Faser gekoppelt, um das Frequenzrauschspektrum der gefilterten Laserstrahlung zu charakterisieren. Entsprechende Messergebnisse sind in Abb. 8 dargestellt. Die beiden Graphen zeigen einen Vergleich der Frequenzrauschdichte des frequenzstabilisierten Lasers ohne Filterung (blaue Kurven) und nach dem Durchgang durch den Filter-Resonator (orange Kurven), jeweils für unterschiedliche Einstellungen der Regelparameter zur Reduzierung der Linienbreite des untersuchten Lasers (Servo-Gain). Die grünen Kurven zeigen die zu erwartende Frequenzrauschdichte nach der Filterung. Die gemessene Unterdrückung entspricht sehr gut dem aufgrund der Eigenschaften des Filter-Resonators zu erwartenden Werts und zeigt insgesamt eine Unterdrückung der Regeloszillationen um bis zu 20 dB.

Die erreichte Unterdrückung erlaubt es, das Frequenzrauschen des Lasers auf die im Demonstrator benötigten Werte zu reduzieren. Andererseits zeigten die Untersuchungen auch, dass die benötigte geringe Linienbreite des Filter-Resonators eine große Herausforderung in Hinblick auf Intensitätsschwankungen darstellt. Besonders unter dem Einfluss akustischer Störungen, wurden teilweise Einbrüche der durch den Filter-Resonator transmittierten Leistung um 30 % beobachtet. Durch Optimierungen am optomechanischen Aufbau und der Regelung könnte dies bei Bedarf für den Einsatz zukünftig verbessert werden.

1.2.2. AP 2.3 Erforschung eines rauscharmen Dioden-Laser

Ein alternativer Ansatz zur Filterung von Regeloszillationen durch die Transmission eines Resonators besteht darin, schon die freilaufende Linienbreite des Lasers zu reduzieren. Dies bietet den Vorteil, dass die volle Ausgangsleistung des Lasers genutzt werden kann und dass keine parasitären Effekte das Intensitätsrauschen des Lasers beeinflussen.

Zur Messung von Frequenz- und Phasenrauschen der Laser wurde ein Setup entworfen, welches es „in-situ“ erlaubt, die Frequenzrauschdichte zu messen. Das Setup besteht aus einem interferometrischen Messkopf und einer rauscharmen Elektronik, welche das Signal des Interferometers in Echtzeit demoduliert und aus den erhaltenen Daten das Frequenzrauschspektrum des Lasers berechnet und visualisiert. Sowohl der optische Messaufbau, die optische Detektion des interferometrischen Messaufbaus als auch die Elektronikeinheit wurden optimiert um Frequenzrauschdichten auf dem Niveau von $1 \text{ Hz}^2/\text{Hz}$ oder besser detektieren zu können. Die für die Messapparatur realisierte Messsoftware unterstützt darüber hinaus eine Programmierschnittstelle, so dass Messungen extern gestartet und ausgelesen werden können. Dies ermöglicht die komplexen Parameterräume (Laserdioden-Betriebsstrom, Laserdioden-Betriebstemperatur, Position des externen optischen Feedbacks) eines Diodenlasers mit externem optischem Feedback hinsichtlich des Einflusses auf die Frequenzrauschdichten des Lasers zu untersuchen.

Zur Unterdrückung der Linienbreite eines Diodenlasers wurden zwei unterschiedliche Methoden betrachtet, welche einen gitterstabilisierten Diodenlaser (ECDL) um einen zusätzlichen Resonator erweitern. Der zugrunde liegende Ansatz der beiden Methoden ist sehr ähnlich und beruht auf einem schmalbandigen optischen Feedback zur Linienbreitenreduktion. In der detaillierten Umsetzung unterscheiden sich die beiden Methoden jedoch. Für die ersten Methode wurde der externe Resonator durch eine optische Faser mit Endspiegel realisiert. Eine schematische Darstellung des prinzipiellen Aufbaus dieser Methode sowie ein Foto des ersten Demonstrators sind in Abb. 9 dargestellt.

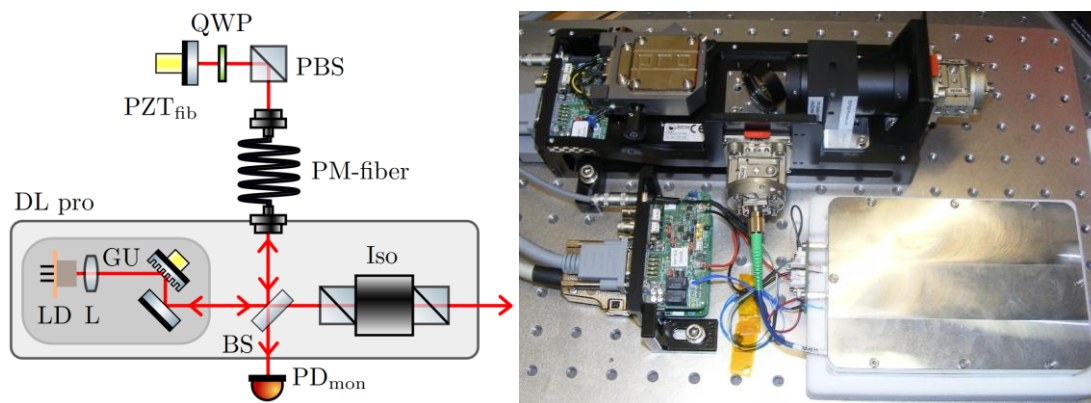


Abb. 9 Schematische Darstellung des Aufbaus zur intrinsischen Reduktion der Linienbreite eines gitterstabilisierten Diodenlasers durch optische Rückkopplung aus einem faserbasierten Resonator (links) „ULNL“. Realisierung des ersten Laboraufbaus nach diesem Schema (rechts).

Die Ergebnisse mit einem ersten Demonstrator zeigten eine sehr gute Unterdrückung der Frequenzrauschdichte um einen Faktor von 100 (20 dB) im Vergleich zum herkömmlichen ECDL auf ein flaches Niveau von $10 \text{ Hz}^2/\text{Hz}$ (weißes Frequenzrauschen), siehe Abb. 10 (links). Dies entspricht einer intrinsischen Linienbreite des Lasers von $\sim 30 \text{ Hz}$.

Die Unterdrückung der Linienbreite durch den zusätzlichen Resonator im sogenannten „ULNL“ wurde detailliert erforscht. Für unterschiedliche Typen von Laserdioden (AR-Dioden und FP-Dioden) konnte eine Abhängigkeit der Linienbreite vom Verhältnis der rückgekoppelten Leistung im Vergleich zur Ausgangsleistung des Lasers bestimmt werden und mit einem theoretischen Modell, welches auf der Kopplung der drei beteiligten Resonatoren (Laserdiode, Gitter, Faser) basiert, untermauert werden (Abb. 10 rechts).

Im Langzeitbetrieb zeigte der erste Demonstrator regelmäßige Modensprünge, welche durch das Wechselspiel der unterschiedlichen Resonatoren verursacht werden und insbesondere durch den kleinen freien Spektralbereich des Faserresonators verstärkt werden. Zur Verbesserung der Langzeitstabilität wurde eine kompaktere Optomechanik konzipiert. Durch die Verwendung von Piezo-Faser-Streckern und eines Faserreflektors konnte der mechanische Aufbau des Faserresonators im Vergleich zur ersten Variante mit Freistrahloptiken deutlich verringert werden. Dies erlaubte eine bessere Temperaturstabilisierung der Faserstrecke und durch die dadurch konstantere optische Weglänge eine bessere Langzeitstabilität der Emissionsfrequenz des Lasers.

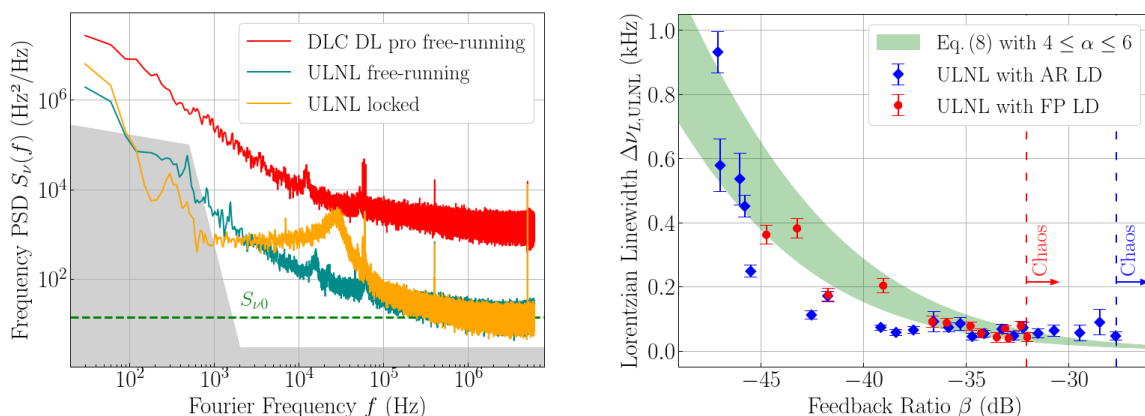


Abb. 10 Messung der Frequenzrauschdichte von ECDL, ULNL und frequenzstabilisiertem ULNL (links) sowie Verhalten der Linienbreite in Abhängigkeit der Feedback-Stärke (rechts).

Zum Einsatz im Demonstrator muss die Linienbreite des Lasers auf zusätzlich auf längeren Zeitskalen reduziert und stabilisiert werden. Dafür wurde der Demonstrator per Pound-Drever-Hall-Verfahren auf eine High-Finesse-Cavity stabilisiert. Die Ergebnisse der Linienbreitenreduktion sind in Abb. 10 rechts gezeigt.

Mit Hilfe von Feedback auf den Strom kann eine vergleichbare Linienbreitenreduktion wie bei einem herkömmlichen ECDL erreicht werden. Die Daten zeigen jedoch auch direkt den Vorteil des linienbreiten reduzierten ULNL-Lasersystems: durch die geringere intrinsische Linienbreite wird nur eine geringere Bandbreite im Feedback-Kreis benötigt. Es konnte damit gezeigt werden, dass Regeloszillationen bei niedrigeren Frequenzen auftreten und auch in ihrer Amplitude um 15-20 dB unterdrückt sind. Insbesondere für schnelle Qubit-Operationen mit Rabi-Frequenzen > 1 MHz spielen diese Regeloszillationen damit keine Rolle.

Eine Zusammenfassung der Forschungsergebnisse zur Reduzierung der Linienbreite eines ECDL-Lasers basierend auf Faserfeedback wurde in der Fachzeitschrift *Optics Express* veröffentlicht⁷.

Neben dem faserbasierten Feedback-Mechanismus wurde ein zweiter Ansatz zur Linienbreitenreduktion untersucht. Dabei wurde die Transmission eines monolithischen Resonators zurück in den gitterstabilisierten Diodenlaser gekoppelt. Das zugrunde liegende Prinzip ähnelt sehr stark dem des Faserresonators und erlaubt ebenfalls eine gute Unterdrückung der Frequenzrauschdichte des Diodenlasers. Im Vergleich zur oben genannten Realisierung hat der monolithische Resonator den Vorteil kompakter integriert werden zu können, was sich auch in einer besseren Langzeitstabilität äußert. Demgegenüber stehen höhere Anschaffungskosten aufgrund der deutlich komplexeren Bauform und niedrigere Toleranzen. Die erzielten Ergebnisse werden derzeit zusammengefasst und sollen zeitnah veröffentlicht werden.

1.3. AP 3 Validierung im Demonstrator

Für die Realisierung des Quantencomputer Demonstrators in QRydDemo sind verschiedenste Lasersysteme zur Adressierung einer Vielzahl von atomaren Übergängen nötig (Laserkühlung, Zustandspräparation, Adressierung von Qubits). Zu diesem Zweck hatte der Projektpartner 5. Physikalisches Institut ein Lasersystem bestehend aus Frequenzkamm, cw-Lasern und Phasenlock-Einheiten sowie einen auf eine High-Finesse Cavity stabilisierten Uhrenlaser erworben.

Während der Projektphase erfolgten mehrere Besuche von Beteiligten des QRydDemo Projektteams an der Universität Stuttgart, um dieses Lasersystem im Hinblick auf die Durchführung der Messungen am Quantenprozessor-Demonstrator zu optimieren. Beispielsweise wurde ein optischer Lock des Frequenzkamms auf den Uhrenlaser implementiert, damit konnte die Linienbreite aller Kammzinken und damit aller im Demonstrator eingesetzten Laser auf die Größenordnung von 1 Hz reduziert werden. Die Projektteams des 5. Physikalisches Instituts und der TOPTICA Photonics AG entwickelten gemeinsam Ansätze, um das Gesamtsystem am Demonstrator effizient einzusetzen, z.B. bei der Integration einzelner Komponenten in die Echtzeit-Experimentsteuerung oder zu Kalibrierung von Laserfrequenzen.

Mit dem innerhalb von AP 2.3 entwickelten Messaufbau zur Live-Messung von Phasen- und Frequenzrauschen wurden vor Ort im Labor in Stuttgart die Frequenzrauschdichten relevanten Laser des Gesamtsystems vermessen und optimiert. Insbesondere für die Implementierung von Zwei-Qubit-Gattern stellte sich hierbei das Frequenzrauschen des Rydberg-Lasers als kritisch heraus und wurde daher für diese Anwendung optimiert. In Zusammenarbeit mit den Projektpartnern wurden aus den Frequenzrauschdichtemessungen die erreichbaren Güten eines solchen Zwei-Qubit-Gatters berechnet. Die Simulationen

⁷ N. Kolodzie et al.: Ultra-low frequency noise external cavity diode laser systems for quantum applications, *Optics Express*, Vol. 32, Issue 17, 2024

zeigen, dass mit dem derzeitigen Lasersystem Güten im Bereich von größer als 99.5 % realisiert werden können, wenn die Rabi-Frequenz des Rydberg-Levels entsprechend gewählt wird (> 7 MHz).

1.4. Verwertung

Das QRydDemo Projekt bot für TOPTICA eine hervorragende Gelegenheit die Anforderungen, welche atomare Quantenprozessoren an Lasersystemen für den Einsatz als optische Falle oder zur gezielten Manipulation von Quantenzuständen stellen in großem Detail zu verstehen. Die Ergebnisse der Arbeiten die im Rahmen des Teilprojekts „Speziallasersysteme für atomare Quantenprozessoren“ lassen sich für weitere Arbeiten nutzen und sind auch für weitere Anwendungen im Umfeld von Quantentechnologien sehr interessant.

Die beiden Forschungsmuster für Hochleistungs-Lasersysteme zur Anwendung als optische Pinzette zeigen einen direkten Weg auf, derartige Lasersysteme in Zukunft kommerziell verfügbar zu machen. Solche Lasersysteme wecken am Markt nicht nur das Interesse für den innerhalb von QRydDemo untersuchten Einsatzzweck, sondern auch zur Manipulation von Quantenzuständen oder gar außerhalb von Quantentechnologien. Die erfolgreiche Forschung und Implementierung rauscharmer und leistungsstarker Lasersysteme im sichtbaren Spektralbereich bilden unter anderem auch eine Grundlage hohe optische Leistungen im UV-Bereich zu erzeugen. Auch hier besteht am Markt der Bedarf nach zuverlässigen und rauscharmen Laserquellen, zum Beispiel für die Kopplung an Rydberg-Zustände in atomaren Quantenprozessoren.

Ebenso lieferten die Forschungsergebnisse aus Arbeitspaket 2 wichtige Einsicht wie das Frequenzrauschen von Diodenlasersysteme deutlich verbessert werden kann. Insbesondere die intrinsische Linienbreitenreduktion durch optisches Feedback zeigte sich hierbei sehr vielversprechend. Der allgemeine und schnelle Fortschritt in der Forschung zu Quantentechnologien, insbesondere des Quantencomputing, erzeugt einen enormen Bedarf an derartigen Lösungen um Gatteroperationen mit geringen Fehlern auszuüben. Daher plant TOPTICA weitere Forschung und Entwicklung, um die hier gesetzten Grundlagen weiter fortzuschreiben und frequenzrauscharme und modenstabile Lasersysteme marktfähig zu machen.

1.5. Fortschritte und Ergebnisse Dritter

Der kanadische Hersteller MPB Photonics brachte 2023 ein frequenzverdoppeltes Raman-Faserverstärker System auf den Markt welches ebenfalls resonante Frequenzverdopplung innerhalb eines Verdopplungsresonators nutzt. Dieses System ist hinsichtlich der verwendeten Technologie vergleichbar mit dem in AP 1.4 und AP 1.5 erforschten System.

Bezüglich der in Arbeitspaket 2.2 erforschten schmalbandigen Filterung von Regeloszillationen wurden im Laufe des Forschungsprojekt einige Publikationen Dritter veröffentlicht, bei welchen anstatt eines schmalbandigen Fabry-Perot Resonators ein breitbandiger (nicht resonanter) EOM in Kombination mit einem Feedforward-Schema zum Nachregeln der Phase verwendet wird. Die Publikationen zeigen, dass dieses Schema den Beitrag zur Frequenzrauschdichte von Regeloszillationen um ungefähr 20 dB unterdrücken kann. Der zu erwartende Einfluss auf das Intensitätsrauschen sollte für diese Realisierung geringer sein als für die erforschte Filterung mit Hilfe eines Fabry-Perot Resonators. Ebenso ist eine bessere Transmission und dementsprechend eine höhere Nutzleistung zu erwarten. Andererseits zeigen die Publikationen ein erhöhtes Rauschen bei hohen Frequenzen, welche mit einem Filter-Resonator noch weiter unterdrückt werden.

1.6. Schutzrechte

Im Rahmen des Forschungsprojekts QRydDemo wurden von der TOPTICA Photonics AG keine Schutzrechte beantragt.