COMBINATION

Comb Infrastructure for atoms and ions

Programm / Ausschreibung	Quantum Austria, Quantum Austria 1. Ausschreibung (2022)	**Status**	laufend
Projektstart	01.01.2023	**Projektende**	31.12.2024
Zeitraum	2023 - 2024	**Projektlaufzeit**	24 Monate
Keywords	quantum computing; frequency standard; frequency comb; atomic clock; precision spectroscopy		

Projektbeschreibung

Atomare, molekulare, und optische (AMO) Quantensysteme bilden die technologische Basis für viele der heutigen Quantentechnologien, von Quantencomputern mit gespeicherten Ionen, bis hin zu Atomuhren für Hochpräzisionsmessungen. Diese Technologien basieren auf der präzisen Manipulation von Quanteninformation die in langlebigen atomaren Zuständen gespeichert ist. Unverzichtbar für den Betrieb dieser Geräte sind dabei die mitunter stabilsten Lasersysteme der Welt mit 15-stelliger Genauigkeit. Da jede Atomsorte ihre eigene charakteristische Laserfrequenz hat, benötigen die AMO Experimente der Universität Innsbruck alleine fast 10 solcher ultra-stabilen Lasersysteme. Diese Laser auf dem notwendigen Niveau zu betreiben ist ein Zeit- und Resourcenintensives Unterfangen. Die unterschiedlichen Frequenzen haben außerdem zur Folge, dass Laser für verschiedene Atome nicht direkt miteinander verglichen werden können, was nicht nur die Laserstabilisierung erschwert, sondern auch kollaborative Forschung auf einzelne Atomsorten beschränkt.

Als Lösung für diese Herausforderungen bietet ein Frequenzkamm die Möglichkeit breite Frequenzbereiche abzudecken und gleichzeitig die Stabilität eines Referenzlasers auf beliebige andere Laser in seinem Frequenzbereich weiterzugeben. Das Ziel von COMBINATION ist es einen automatisierten, Rack-kompatiblen, und wartungsfreien Frequenzkamm als Standardreferenz für alle AMO Experimente der Universität Innsbruck zu installieren. Der Kamm soll dabei auf einen dedizierten, telekom-kompatiblen, ultra-schmalbandigen Laser stabilisiert werden. Die COMBINATION Frequenzreferenz kann somit direkt in das Österreichische Forschungsglasfasernetzwerk ACUnet eingespeist werden und steht externen Nutzern, wie etwa Partnern im AQUnet Quantenfasernetzwerk für kollaborative Forschungszwecke zur Verfügung. Das System wird ausfallssicher gestaltet um nahe 100% Verfügbarkeit zu erreichen und zusätzlich wird über eine GPS Verbindung zum primären Zeitstandard der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt in Deutschland Langzeitgenauigkeit sichergestellt. Diese Eigenschaften ebnen den Weg für neue Forschung wie Hochpräzisionstests fundamentaler physikalischer Theorien.

Die COMBINATION Infrastruktur deckt die Atomuhrenübergänge der wichtigsten Atomsorten ab, insbesondere Calcium, Barium, Strontium, und Aluminium Ionen, sowie Erbium und Ytterbium Atome. Als Standardreferenz ermöglicht dies die Stabilisierung und kontinuierliche Überwachung aller Atomuhrenlaser an der Universität Innsbruck und kann außerdem auch eine präzise Mikrowellenreferenz für supraleitende Systeme zur Verfügung stellen. Neben einer drastischen Reduzierung des

Erhaltungsaufwands der Laser erschließt die breite Frequenzabdeckung des Systems neue Forschungsmöglichkeiten wie etwa direkte Vergleiche zwischen Atomuhren basierend auf verschiedenen Atomsorten, oder sogar verschiedenen experimentellen Ansätzen. Für die Quantenforschung in Österreich stellt COMBINATION einen stabilen Frequenzstandard zur Verfügung der über das ACOnet Fasernetzwerk aus ganz Österreich für kollaborative Forschung und Quantentechnologieentwicklung zugänglich ist. Mit der geplanten Anbindung an ähnliche Fasernetzwerke in Deutschland, der Tschechischen Republik, und Frankreich wird Innsbruck damit zu einem zentralen Knoten im Europäischen Quantenökosystem.

Abstract

Quantum technologies based on atomic, molecular, and optical (AMO) systems, from atomic clocks to quantum computers, operate by precise manipulation of quantum information encoded in long-lived electronic states. The backbones for these applications are some of the most stable laser systems in the world, with relative stabilities on the order of 10-15. Since each atomic species requires its own frequency reference, AMO experiments at the University of Innsbruck (UIBK) operate close to 10 such ultra-high stability laser systems. Maintaining all these devices at the required level of performance is a challenging and time-consuming task. Moreover, the wide frequency range covered by these experiments precludes a direct comparison or cross-referencing of multiple lasers. As a consequence, not only laser maintenance, but also collaborative research is restricted to identical atomic species.

These challenges can be addressed with frequency combs, able to bridge wide frequency gaps, while maintaining the exquisite performance of a narrow-linewidth reference laser. We thus propose the acquisition of a state-of-the-art automated, rack-mounted frequency comb to serve as a standard reference for the AMO laboratories at UIBK and beyond. The comb will be stabilized to a dedicated narrow linewidth laser operating at the “telecom” wavelength of 1550nm. This ensures compatibility with the Austrian long-distance fiber network ACOnet to allow direct access to third parties, such as partners in the AQUnet quantum fiber network. The system will be designed in a fail-safe way, building on UIBK’s expertise in stabilizing ultra-narrow linewidth laser systems, to ensure close to 100% uptime. Additionally, the proposed infrastructure will use an existing hydrogen maser and GPS link to enable absolute frequency stability by comparison to a primary frequency standard at Physikalisch-Technische Bundesanstalt in Germany. This provides an avenue towards precision tests of fundamental physical theories.

The infrastructure will be designed to cover the atomic clock transitions of the most commonly used atomic species, including Calcium, Barium, Strontium, and Aluminium ions, as well as Erbium and Ytterbium atoms. At the applicant institution, this provides a standardized reference for stabilization and continuous monitoring of all atomic clock lasers. Beyond significantly reducing maintenance overheads, this will enable novel research, such as direct comparisons of clocks using not only different atomic species, which differ in their sensitivity to external influences, but even different experimental platforms, such as trapped ions and neutral atoms, marking a milestone in precision metrology in Austria. Practically, the system can also be used for absolute calibration of other measurement devices, such as wavemeters, and could be extended to serve as a microwave standard for superconducting quantum systems. On the community level, the proposed infrastructure will establish a local frequency standard at UIBK, connected to the ACOnet fiber network to enable collaborative quantum metrology and quantum technology development with research institutions in Austria. Planned extensions of this network foresee connections to similar initiatives in Germany, the Czech Republic, and France. This will not only mark a highly beneficial addition to all members of the ACOnet network, but establish Innsbruck as a central node in

the European quantum ecosystem, benefitting collaborative research over the long run.

Projektpartner

- Universität Innsbruck Institut für Experimentalphysik