

OPUS-2:

Optische Uhren unter Schwereelosigkeit

DLR 50WM2052

Laufzeit: 01.08.2020 – 31.07.2023

Abschlussbericht für das Vorhaben

Erstellt von:

Oliver Fartmann, Vladimir Schkolnik, Markus Krutzik
Humboldt-Universität zu Berlin

Inhaltsverzeichnis

I.	Kurzdarstellung	1
1.	Aufgabenstellung	1
2.	Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde	1
3.	Planung und Ablauf des Vorhabens	2
4.	Wissenschaftlicher und technischer Stand bei Projektbeginn	2
5.	Zusammenarbeit mit anderen Stellen	3
II.	Eingehende Darstellung	3
1.	Verwendung der Zuwendung und des erzielten Ergebnisses im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele	3
2.	Die wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises	16
3.	Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit	16
4.	Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere der Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans	17
5.	Während der Durchführung des Vorhabens dem ZE bekannt gewordenen Fortschritts auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen	17
6.	Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen des Ergebnisses	18

I. Kurzdarstellung

1. Aufgabenstellung

Im Vorgängervorhaben OPUS-I wurden die Grundlagen für eine Frequenzreferenz auf Basis von Atomstrahlen und Frequenzkämme als optische Uhren für die Anwendung im Weltraum gelegt.

Das Ziel des Vorhabens OPUS-2 war es, eine flugfähige, integrierte Frequenzreferenz basierend auf Ramsey-Bordé Interferometrie mit Strontium Atomen bereitzustellen, welche z.B. im Rahmen einer TEXUS Mission erprobt werden kann. In Absprache mit ZG wurde entsprechend des Änderungsantrages vom 16. November das Ziel angepasst. Statt einer Höhenforschungsrakete als Zwischenschritt sollte direkt der Fokus hin zu einer permanenten Plattform gelegt werden.

Es handelte sich um ein Verbundprojekt, welches von folgenden Projektpartnern durchgeführt wurde:

1. Menlo Systems GmbH (Menlo) - Koordination
2. Humboldt-Universität zu Berlin (HUB)
3. Ferdinand-Braun-Institut, Leibniz-Institut für Höchstfrequenztechnik (FBH)

Die Performance der Frequenzreferenz soll die derzeitige Stabilität und Genauigkeit derzeitiger weltraumqualifizierter Uhren (GPS, Galileo) übertreffen. Im Einzelnen stehen im Teilvorhaben der HUB folgende wissenschaftlich-technische Arbeitsziele im Fokus:

- Aufbau einer kompakten, robusten, high-flux Strontiumquelle
- Konzepte zur kompakten Integration von Ramsey-Bordé (RB) Optiken in einem Vakuum-System entwickeln und testen.
- Stabilisierung des Lasers auf eine High Finesse Cavity
- Stabilisierung des Lasers an das Ramsey-Bordé Interferometrie Signals
- Fraktionelle Frequenz-Instabilität des Laboraufbaus von $<1e-14$ @1s und $<2e-15$ @100s und @1000s nachweisen
- Realisierung einer blauen 3D-MOT zur Analyse des RB Setups und als Basis für eine zukünftige optische Gitteruhr als Vergleichsreferenz. Ohne Rückpump-Laser soll die Atomzahl in der blauen MOT $>10^6$ betragen

2. Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

OPUS-2 wurde von der Humboldt-Universität zu Berlin in Kooperation mit einer Forschungseinrichtung und einem mittelständischen Unternehmen durchgeführt, die unter anderem über Expertise auf dem Gebiet der Frequenzkämme, Mikrogravitationsexperimente und mikointegrierter Diodenlaser besitzen, s.o. Die Entwicklungsschritte wurden im Rahmen der verfügbaren finanziellen Mittel durchgeführt. Die dabei involvierten Gruppen waren:

- Markus Krutzik, Institut für Physik Humboldt-Universität zu Berlin
- Andreas Wicht, Ferdinand-Braun-Institut, Leibniz-Institut für Höchstfrequenztechnik
- Ronald Holzwarth, Menlo Systems GmbH

Die HU Berlin führte die Arbeiten im Rahmen von Bachelor-, Master- und Doktorarbeiten sowie unter Beschäftigung von Postdocs und wissenschaftlichen Mitarbeitern durch.

3. Planung und Ablauf des Vorhabens

Die Aufgaben wurden zum großen Teil parallel bearbeitet. Die Arbeit an Atomofen und Stabilisierung auf eine High Finesse Cavity erbrachte frühzeitig erfolgreiche Resultate. Die Demonstration von kohärenten Ramsey-Bordé Fringes dauerte länger als geplant, da viele dafür notwendigen Details und Entwicklungsschritte zu Vorhabenbeginn nicht bekannt waren.

Neben organisatorischen und technischen Verzögerungen aufgrund der Corona-Pandemie, Lieferketten und Ausfall von kritischen Laserquellen wurden auf wissenschaftlicher Seite nach langer Fehlersuche eine unsaubere RF-Quelle für den Seitenband-Lock auf die Cavity sowie eine unsaubere Wellenfront aufgrund Defekte der eingesetzten Kollimatoren hierfür als Ursache ausgemacht.

Im Laufe des Vorhabens wurde ersichtlich, dass eine Höhenforschungsrakete als Plattform aus projekt-planerischer und wissenschaftlicher Sicht nicht sinnvoll wäre. Dementsprechend wurde gemäß des Änderungsantrages vom 16. November der Fokus auf Verbesserung der Labor-Performance und Vorbereitungen auf eine permanente Plattform gelegt.

Die Arbeiten an einer blauen 3D-MOT wurden wie geplant bearbeitet. Die Demonstration der blauen MOT steht zu Projektende noch aus, alle geplanten Vorbereitungen hierzu sind allerdings bereits abgeschlossen. Es wurden bereits Atome in der Sektion der Atomquelle gesehen und auch erste Signale in der Kammer untersucht.

4. Wissenschaftlicher und technischer Stand bei Projektbeginn

Relevante Arbeiten zu Atomstrahl-Frequenzreferenzen wurden am NIST [Olson2019], an der University of Western Australia [McFerran2010] und an der Peking University [Shang2017] durchgeführt. Hierbei wurde durchgehend Calcium verwendet und Instabilitäten von 2×10^{-16} erreicht [Olson2019].

Durch diese Vorarbeiten konnten mehrere kritische Parameter identifiziert werden. Das Signal-zu-Rausch Verhältnis kann um mehrere Größenordnungen verbessert werden durch die Verwendung der *Elektron-Shelving* Detektion. Diese liest den Atomzustand nach der Interrogation über einen zweiten Laser resonant zu einem breiten (\sim MHz) Übergang aus.

Da die Interrogation kohärenter Natur ist, stellen Phasenfluktuationen einen großen Beitrag zur Instabilität. Phasenrauschen durch Luftfluktuation konnte durch Integration der Ramsey-Bordé Optiken in ein Vakuumsystem minimiert werden. Temperaturschwankungen induzieren über Längenänderungen ebenfalls Phasenrauschen. Dieses konnte durch Temperaturstabilisierung minimiert werden. Verbleibendes Phasenrauschen konnte durch gegenläufige Atomquellen und symmetrische Signalauslese weiter minimiert werden.

Für den Aufbau einer robusten und langlebigen Atomquelle stehen eine Vielzahl von Publikationen zur Verfügung. In [Schioppo2012] wurde ein kompakter Strontiumofen ($\sim 70\text{mm} \times 70\text{mm} \times 85\text{mm}$) demonstriert mit einer Lebenszeit von 10 Jahren bei einem Fluss von 3.1×10^{14} Atomen pro Sekunde und Steradian. Die Heizleistung belief sich auf 36W.

In OPUS-I wurden Schlüsseltechnologien für optische Frequenzstandards auf Basis von Strontium-Atomstrahlen für den Einsatz auf einer Höhenforschungsrakete entwickelt.

Laserquellen für den Uhrenübergang bei 689nm und für den Ausleseübergang bei 461nm wurden charakterisiert. Der Uhrenlaser wurde auf eine High-Finesse Cavity vorstabilisiert. Mehrere Generationen von kompakten Dispenser-basierten Spektroskopiezellen wurden aufgebaut. An dem erzeugten Atomstrahl wurde Doppler-freie Spektroskopie bei 461nm und

689nm durchgeführt. Für letzteres konnte die *Electron-Shelving* Detektion demonstriert werden. Durch Modulationstechniken konnten beide Laser simultan auf die jeweiligen Übergänge in einem Atomstrahl stabilisiert werden. Die Stabilität des Uhrenlasers konnte im Rahmen einer Messkampagne bei dem Projektpartner Menlo Systems mit einem Frequenzkamm gegen eine GPS-Referenz auf 4×10^{-12} bei 10s bis 80s bestimmt werden. Eine kommerzielle High-Flux Strontium Quelle zur Erzeugung eines kalten Atomstrahls wurde in Betrieb genommen.

Ramsey-Bordé Interferometrie konnte in OPUS-1 noch nicht demonstriert werden.

5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen

OPUS-2 war ein Verbundvorhaben der Humboldt-Universität Berlin, dem Ferdinand- Braun-Institut, Leibniz-Institut für Höchstfrequenztechnik sowie Menlo Systems GmbH.

Die Projektleitung und Koordination lagen bei Menlo Systems GmbH:

- Dr. Ronald Holzwarth, Menlo Systems GmbH

Folgende universitäre Gruppen und Forschungseinrichtungen waren Projektpartner:

- Dr. Andreas Wicht, Ferdinand-Braun-Institut, Leibniz-Institut für Höchstfrequenztechnik, Abteilung Lasermetrologie (FBH)
- Dr. Markus Krutzik, Humboldt-Universität zu Berlin, Institut für Physik, Integrated Quantum Sensors (HUB)

II. Eingehende Darstellung

1. Verwendung der Zuwendung und des erzielten Ergebnisses im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele

Die eingehende Darstellung gliedert sich nach Verbundvorhabenbeschreibung in

- 2202 & 3202 Atomquelle
- 2201 & 3201 Optisches Setup
- 2203 & 3203: Atom- und Cavity Lock
- 4200 & 5200 Flugfähiges Physics-Package
- 6200 Aufbau blaue MOT

1. AP 2202 & 3202: Langlebige und robuste Atomquelle

Martin Jutisz hat im Rahmen seiner Masterarbeit ein Design ausgearbeitet, welches aufgebaut und getestet wurde. Aufbauend auf bestehender Literatur [Schioppo2012, Staub2019] konnte insbesondere der Leistungsverbrauch verbessert werden und liegt bei $<10\text{W}$ bei 500°C .

Der Atomfluss wurde durch Fluoreszenz-Spektroskopie für verschiedene Temperaturen des Reservoirs und der Kapillaren vermessen und liegt bei 500°C in der Größenordnung von 10^{14} Atomen pro Sekunde und ist ausreichend für die Projektziele.

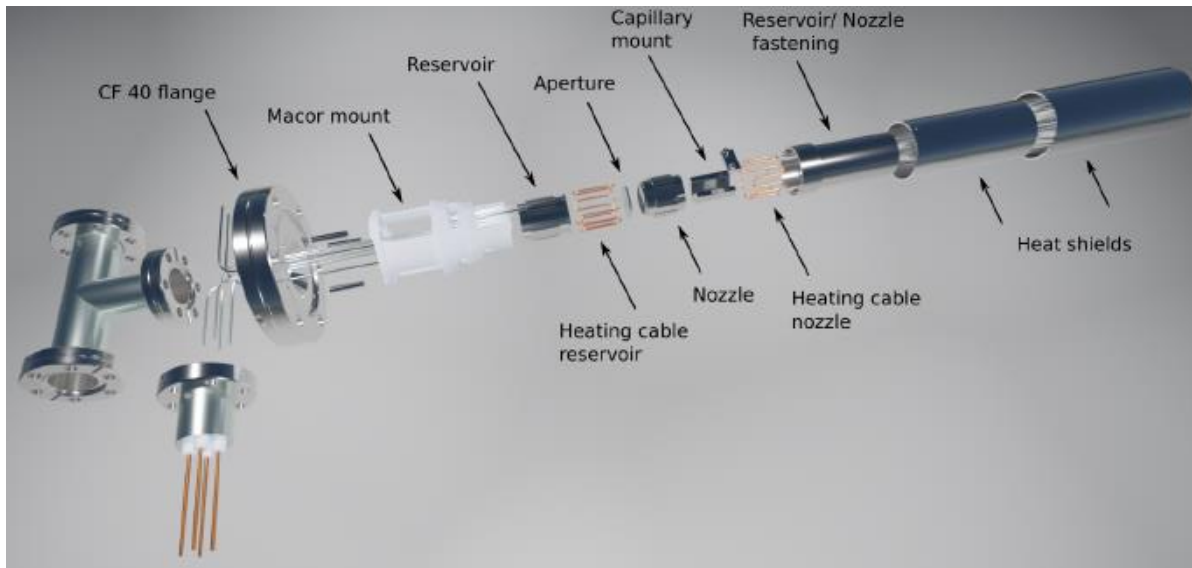


Abbildung 1: Explosionszeichnung des kompakten Strontiumofens mit den einzelnen Komponenten

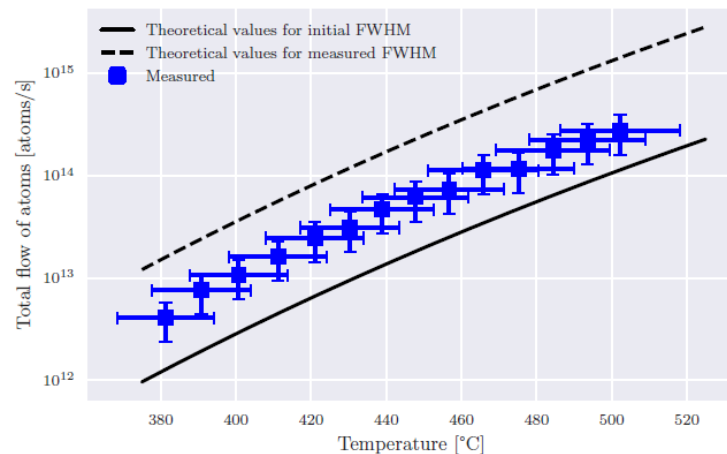
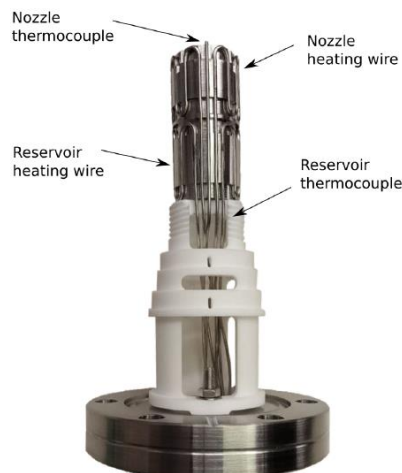


Abbildung 2: Kompakter Strontium-Ofen für die Ramsey-Bordé Spektroskopie in OPUS-2 (links). Theoretische und gemessene Werte des atomaren Flusses über die Temperatur (rechts).

Es wurde ein Skript geschrieben, welches die Ofenansteuerung übernimmt und die Fluoreszenz- und Absorptionsspektren bei 461nm in Echtzeit automatisch auswerten kann. Die gewonnenen Daten werden in einer Datenbank abgespeichert und können später genutzt werden, um bspw. langfristige Änderungen des Atomflusses quantitativ auszuwerten (siehe Abbildung 3). Bisher wurden hierdurch keine Hinweise für eine Entleerung des Ofens gefunden, allerdings wird vermutet, dass die Abnahme des Flusses relativ abrupt erfolgen würde. Daher wird der Ofen bei vergleichsweise niedrigen Ofentemperaturen (510° Nozzle / 430°C Reservoir) betrieben, bis der neue Ofen einsatzbereit ist.



Abbildung 3: Temperatur, Fluoreszenz und Absorption des Atomofens werden in Echtzeit ausgewertet und können wie in der Abb. ersichtlich abgerufen werden.

Als ein Schwachpunkt der aktuellen Version ist die mechanische Stabilität zu nennen. Insbesondere die Verbindungsstellen zwischen der Macor-Halterung und den hieran befestigten Teilen würden starke Vibrationen (bspw. eines Raketenstarts) in der jetzigen Form nicht überstehen.

Eine weitere Generation von Atomöfen ist momentan in einem anderen, thematisch anschließenden Vorhaben im Aufbau. Neben anderen Verbesserungen soll hierbei die mechanische Stabilität unter anderem durch Ersatz des Macor-Mounts durch einen Titan-Mount erhöht werden.

Alternative Atomquellen wurden in Erwägung gezogen. Rückführende Designs wurden nach Literatur-Recherche als komplex und aufwendig eingestuft. Da Kollimation über Kapillaren als ausreichend für die notwendige Lebensdauer eingeschätzt wird, wurden keine weiteren rückführenden Designs geplant. Realisierungen von komplexeren Kapillar-Geometrien (unterbrochene Kapillaren, fokussierende Kapillaren) sind mit konventionellen Fertigungsmethoden nicht zu realisieren. Mit Hilfe eines Metall- und Keramik-Druckers können in einem Nachbar-Projekt solche Geometrien in Zukunft realisiert und getestet werden. Erste Partikelsimulationen wurden durchgeführt.

2. AP 2201 & 3201: Optisches Setup zur Atom-Interrogation

Die Arbeiten an dem optischen Setup sind wie folgt gegliedert:

- Strahlengang Labor
- Strahlengang integriertes Setup
- Detektion
- Frequenz-Modulations-Spektroskopie
- Laserleistungs-Stabilisierung
- Spektroskopie & Ramsey fringes
- Systematiken

Optischer Strahlengang Labor

Aufbauend auf Ergebnissen in OPUS-1 wurde ein neues Spektroskopie-Setup aufgebaut. Dieses beinhaltet eine größere Spektroskopie-Zelle, um genug Platz für RBI zu bieten, eine

Ionenpumpe und die Möglichkeit den oben beschriebenen Atomofen anzubauen. Weiterhin ist die Möglichkeit der Leistungsstabilisierung beider Wellenlängen vorgesehen, die Laserstrahl-Geometrien sind entsprechend Simulationen zu RB optimiert und das Signal kann über Fluoreszenz statt Absorption ausgelesen werden, was weiter das Signal-zu-Rausch Verhältnis verbessert.

An diesem Setup wurden die Strahlführung der RB-Strahlen mithilfe von Cat-Eyes als auch Hollow-Roof-Prismen getestet, wobei letztere aufgrund der einfacheren Justage sowie stabilerer optische Phase in Verwendung sind.

Es wurden Spulen in Helmholtz-Konfiguration mit Hilfe von 3D-gedruckten Spulenhaltern an das Vakuum-System angebracht. Eine ausreichende Zeeman-Aufspaltung, um nur den magnetisch insensitiven Übergang $(1S_0) \rightarrow (3P_1 \text{ mf}=0)$ anzusprechen, ist bereits mit 2A Spulenstrom möglich.

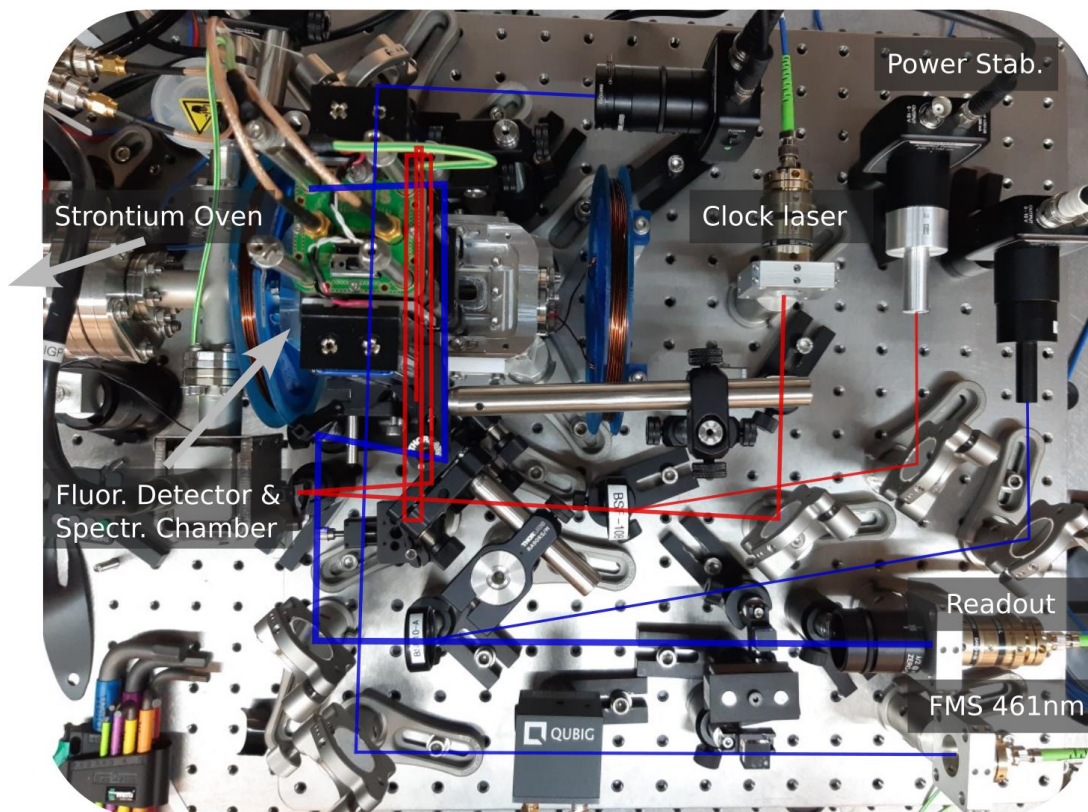


Abbildung 4: Spektroskopie-Setup mit neuem Strahlengang. Unten mittig ist der Freistrahl-EOM (Qubig) ersichtlich.

Im Laufe des Vorhabens wurde der Strahlengang des Spektroskopie-Setups mehrfach überarbeitet. Hierbei wurde das Setup deutlich kompakter. Die Strahldistanzen können leichter eingestellt werden, weiterhin kann ein geringerer Abstand zwischen letztem RB-Strahl und Auslese-Strahl realisiert werden. Die Optiken zur Laserstrahl-Formung wurden ersetzt, um eine homogenere Strahlform und Wellenfront an den verschiedenen Interaktionen zu gewährleisten. Ein kürzerer Abstand der Retroreflektoren und damit ein kürzerer Strahlengang zwischen den Interaktionen erlaubt einen geringeren Strahldurchmesser in Richtung des Atomstrahls.

Eine Einhausung des Setups erhöht die thermische Stabilität und verringert den Einfluss von Luftdruckschwankungen auf den Strahlengang und die Lichtphase

Optischer Strahlengang integriertes Setup

Es wurden erste Rechnungen und Modelle erstellt, um die mögliche Größe eines integrierten Setups einzuschätzen. Erste Gespräche mit AIRBUS zur Akkommodation auf einem TEXUS Flug wurden geführt. Es wurden Konzepte zu einem Design von In-Vakuum Optiken erstellt. Diese bietet neben der Verkleinerung des Gesamtsystems auch den Vorteil, deutlich insensitiver auf äußere Einflüsse wie Luftdruck- und Temperaturschwankungen zu sein¹. Hierzu wurden mehrere Möglichkeiten der Einkopplung sowie der Konzeptionierung des Strahlengangs evaluiert.

Signaldetektion

Die aufgesammelte Fluoreszenz-Lichtleistung des Fluoreszenz-Detektors wurde optimiert. Für eine weitere Optimierung müsste die Spektroskopie-Kammer neu geplant werden, da momentan die Fenstergrößen den möglichen Raumwinkel limitiert. Die Planung einer neuen Kammer und eines hierfür neuen optischen Setups wurden Ende 2023 begonnen.

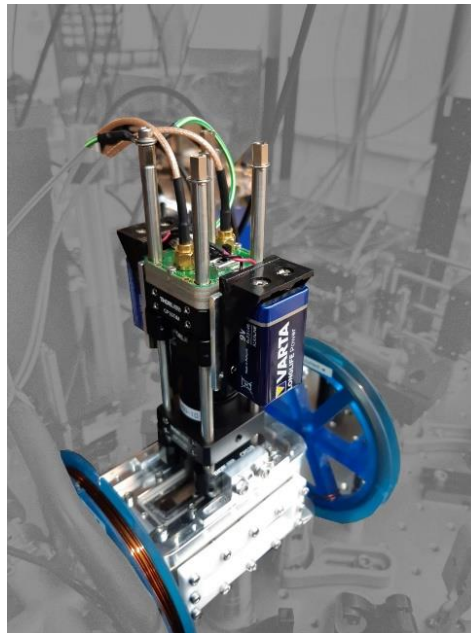


Abbildung 5: Der Fluoreszenz-Detektor ist oberhalb der Spektroskopie-Kammer angebracht. Zwei bewegbare Linsen ermöglichen die Fokussierung auf eine Photodiode. Diese sowie der nachfolgende Transimpedanz-Verstärker sind durch einen faradayschen Käfig von externen elektrischen Feldern geschirmt. In der Abbildung sind außerdem Spulen in Helmholtz-Konfiguration zu sehen.

Frequenz-Modulations Spektroskopie (FMS) für 461nm

Der Detektionslaser bei 461nm wurde über Frequenz-Modulations-Spektroskopie (FMS) auf die Atomresonanz gelockt. Hierbei wurde die Modulation zunächst über den Laserstrom realisiert. Dies führt neben der Frequenzmodulation auch zu starker Amplitudenmodulation, welche sich bei dem demodulierten Fehlersignal als statischer Offset zeigt (siehe Abbildung

¹ Olson, Judith, NIST (2019). *PhD Thesis*.

6). Der 461nm Atomlock mit Hilfe von Minicircuits-Komponenten sowie der bereits erwähnten Software „Linien“¹⁶ optimiert

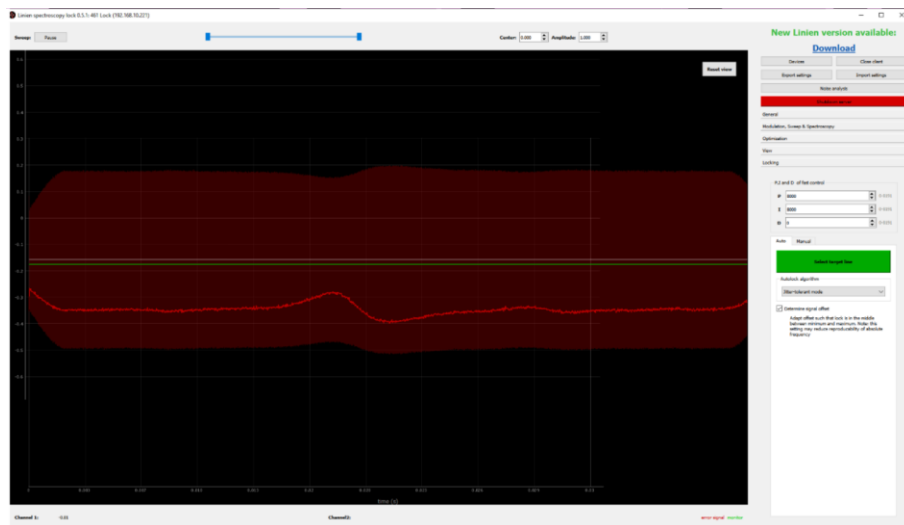


Abbildung 6: FMS-Signal bei 461nm. Das demodulierte Fehlersignal (rote Linie) kann genutzt werden, um den Laser auf Atomresonanz zu halten.

Um das Problem der Amplituden-Modulation zu reduzieren, wurde die Modulation über einen EOM realisiert. Dies ermöglicht außerdem eine höhere Modulationsfrequenz. Die Modulation und Demodulation wurde nun über eine rauscharme Elektronik von Qubig zgh. zum EOM realisiert, für die PID-Regelung wurde weiterhin ein RedPitaya verwendet. Mehrere Etalons im Strahlengang wurden beseitigt. Eine Photodiode mit geringerem Rauschen (Koheron PDX10, NEP=4pw/sqrt(Hz)) wurde eingebaut. Die residuelle Amplituden-Modulation (RAM) des EOMs, welches offenbar durch interne Etalons entsteht, wurde weitgehend beseitigt, indem der EOM schräg gestellt wurde. Außerdem wurde der Laserstrahl auf 3.5x3.5 mm² aufgeweitet, um eine höhere Laserleistung ohne Atomsättigung zu ermöglichen. Als Gesamtergebnis all dieser Maßnahmen konnte das Fehlersignal, welches durch FMS erzeugt wird, deutlich verbessert werden (siehe Abbildung 7). Dieses ist nicht mehr limitierend für das Signal-zu-Rausch Verhältnisses bei der Auslese des Uhrenübergangs.

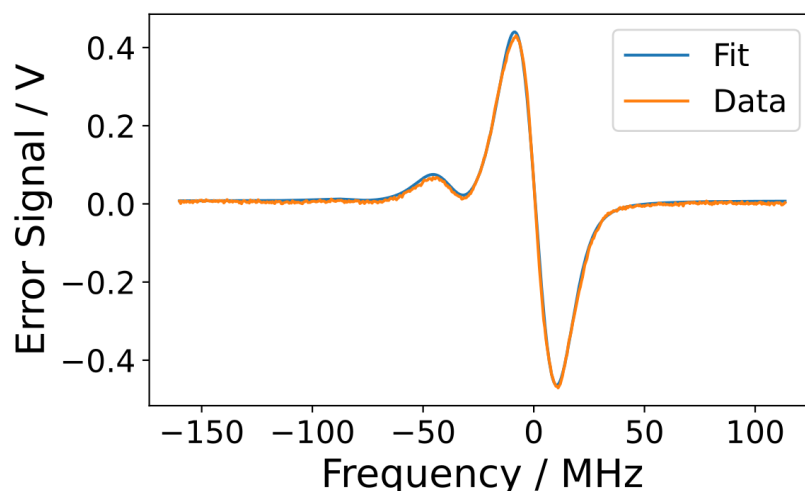


Abbildung 7: Optimierte FMS-Signal bei 461nm. Vergleiche mit Abbildung 6.

Laserleistungsstabilisierung

Die Leistungsstabilisierung wurde zunächst über die kommerzielle Elektronik implementiert, die die akusto-optischen Modulatoren treibt (Moglabs QRF). Da die Bit-Auflösung hiervon nicht ausreichend war, wurde die Leistungsstabilisierung anschließend über einen Mixer realisiert. Hierbei wird über den Eingangs-Strom am IF-Port des Mixers die Durchlässigkeit des RF-Signals geregelt.

Das Setup zur Leistungsstabilisierung ist in **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** zu sehen. Ein Teil des Laserstrahls wird auf dem Spektroskopie-Setup auf eine Photodiode gebracht. Durch einen Polarisator und einen steilen Winkel des Beamsamplers wird die Abhängigkeit von Polarisationschwankungen unterdrückt. Ein FPGA-basierter RedPitaya regelt über einen Mixer die RF-Leistung des AOMs und somit die Laserleistung, die in die Faser eingekoppelt wird. Zur Erhöhung der effektiven Bit-Auflösung wurde ein elektronischer Schaltkreis entworfen und aufgebaut, der auf das genannte STEMLab 125-14 aufgesetzt werden kann.

An Stelle der Spektroskopie kann eine zweite ‚Out-of-loop‘-PD eingesetzt werden, um die Stabilität der Laserleistung im Lock zu vermessen und hinsichtlich ihrer PID-Parameter zu optimieren. Der genannte Schaltkreis zur Erhöhung der effektiven Bit-Auflösung wurde letztendlich aus dem Setup herausgenommen. Aufgrund der hohen Abtastrate des RedPitayas von 125MS/s ist der Quantisierungsfehler ausreichend gering. Die Allan Deviation der Laserleistung mittelt bei relevanten Zeitskalen auf 3×10^{-5} herunter (siehe Abbildung 9).

Es wurden Rechnungen angestellt, wie sich Amplituden-Schwankungen bei der Auslese des Uhrensinals auf die Uhrenstabilität auswirken. Hierfür muss unter anderem die Frequenz-Abhängigkeit der Lock-In Detektion und des Servo-Loops berücksichtigt werden. Weiterhin werden Amplituden-Schwankungen der Auslese durch die Verwendung von einer hohen Laserleistung des Auslese-Lasers bei 461nm durch Sättigung der Atome unterdrückt.

Damit lässt sich der Einfluss der Leistungsstabilität auf die Uhrenstabilität quantifizieren, wie in Abbildung 9 dargestellt. Hieran ist zu sehen, dass diese zwei Größenordnungen unter dem Stabilitätsziel liegt.

Ein analoges Setup zur Stabilisierung des 689nm Lasers wurde aufgebaut.

Die Elektronik wurde gegen Ende des Vorhabens ausgetauscht durch einen Moku Pro, da dies das System vereinfachte und aufgrund der höheren Auflösung die verbleibenden Leistungsfluktuationen weiter reduziert.

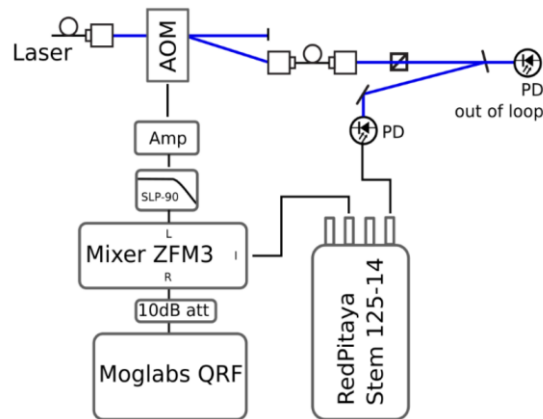


Abbildung 8: Setup zur Laserleistungs-Stabilisierung.

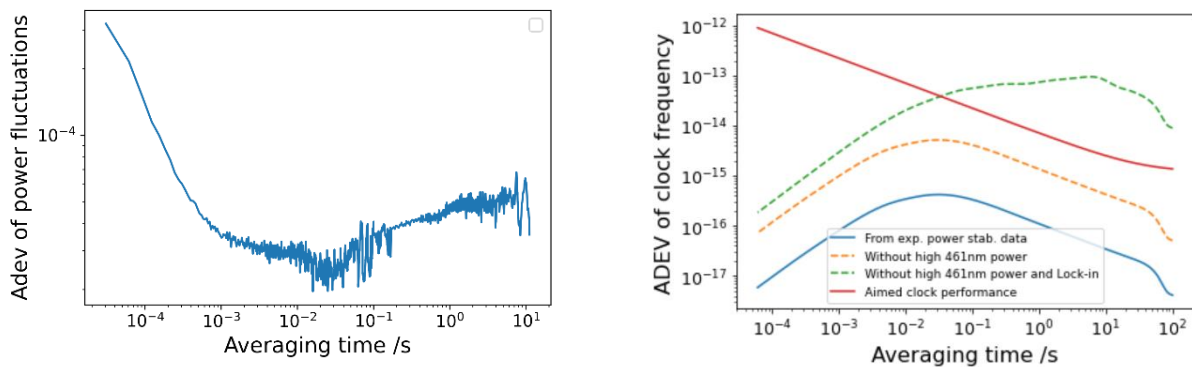


Abbildung 9: Links: Allan Deviation der Laserleistung, vermessen mit einer out-of-loop Photodiode. Rechts: Extrapolierte Allan Deviation der Uhreninstabilität, falls diese durch Laserleistungsschwankungen limitiert wäre und Vergleich mit der Zielstabilität.

Spektroskopie-Ergebnisse

Das Doppler-freie Signal bei 689nm konnte durch die Integration des High-Flux Ofens, der Signal-Auslese über Fluoreszenz sowie der Implementierung der Leistungsstabilisierungen des Auslese-Lasers stark verbessert werden.

Mit Hilfe der zuvor beschriebenen Verbesserungen an dem Strahlengang, des FMS-Locks bei 461nm sowie der Leistungsstabilisierung konnte das Signal-zu-Rausch Verhältnisses der Spektroskopie bei 689nm deutlich gesteigert werden.

Es konnte über längere Zeit nur ein Doppler-freies Signal demonstriert werden, offenbar gab es Effekte die zur Dekohärenz der Fringes führten. Es wurden unter anderem folgende Verbesserungen durchgeführt.

- Einbau von Retroreflektoren mit besserer Parallelität (<3 arcsec)
- Vermessung der Kollimatoren und Austausch für gleichmäßigere Wellenfront
- Umbau der RF-Elektronik, die die Seitenband-Frequenz des Cavity-Locks steuert. Es konnte gezeigt werden, dass diese bei der verwendeten Quelle QRF von Moglabs bei Modulation mehrere 100kHz breit wurde.

Insbesondere der Umbau RF-Quelle und Austausch der Kollimatoren haben dazu geführt, dass ein kohärentes Fringe-Signal demonstriert werden konnte (siehe Abbildung 10).

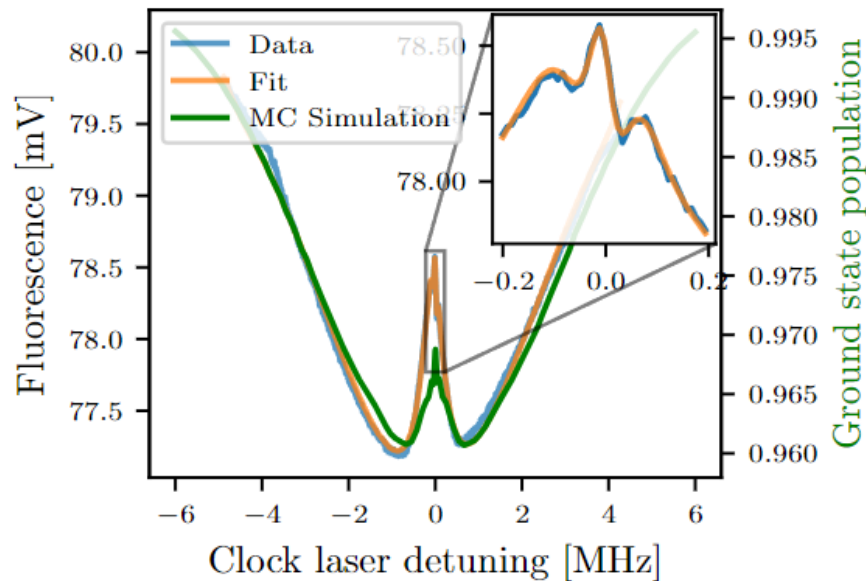


Abbildung 10: Gemessene Ramsey-Bordé Fringes. Vergleich mit Fit und einer Monte-Carlo Simulation.

Lock-In des roten Signals + Feedback auf Cavity-Offset

Um später ein Fehlersignal zu erzeugen, welches insensitive insbesondere auf Amplitudenschwankungen der Detektion ist, wird eine Modulationstechnik verwendet. Hierbei wird die Frequenz des Uhrenlasers bei der Spektroskopie moduliert und das Fluoreszenz-Signal demoduliert. Dieses Prinzip wurde mit Hilfe des Dopplerfreien Signals demonstriert (siehe Abbildung 11), indem die Frequenz über einen AOM und einer Lock-In Elektronik eines Moku:Pros moduliert und anschließend demoduliert wurde. Dieses Signal konnte anschließend als Feedback auf die Seitenband-Frequenz des Cavity-Locks verwendet werden, um den Cavity-Drift auszugleichen.

Als nächstes soll diese Methode auch für das Fringe-Spektrum angewandt werden und anschließend die Uhrenstabilität gegen eine 2-Photonen Uhr vermessen werden.

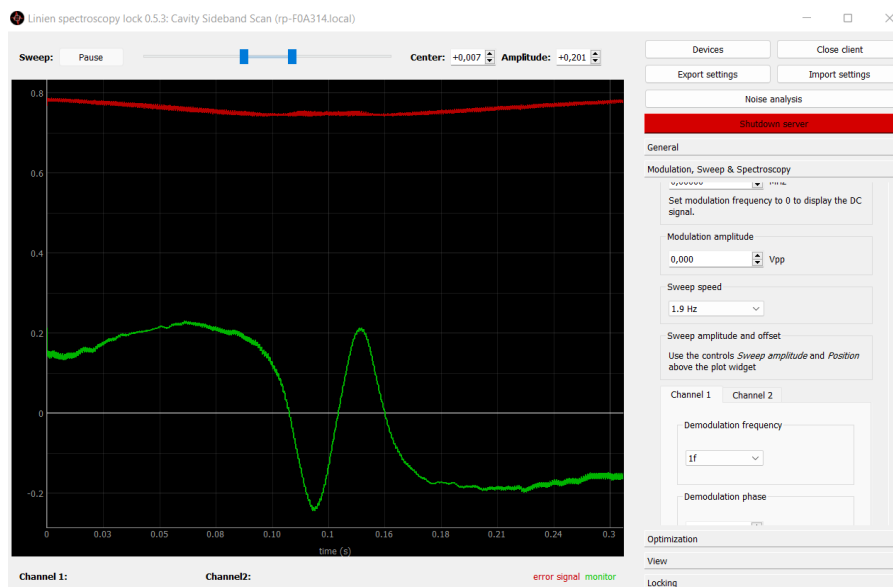


Abbildung 11: Fehlersignal des Uhrenübergangs durch Modulationstechnik

Systematiken

Es wurden Überlegungen zu systematischen Effekten auf die Uhrenstabilität angestellt. Amplitudenrauschen kann durch Einsatz von Modulationstechniken auch im Lock von Frequenzrauschen unterschieden werden, allerdings nur auf längeren Zeitskalen als die der Modulation. Im geplanten Ramsey-Bordé Interferometer wird eine Modulationsfrequenz von 100-1000Hz angestrebt. Hierbei wird zwischen zwei Flanken des Ramsey-Fringe Signals gewechselt.

Auf kürzeren Zeitskalen muss Amplitudenrauschen unterdrückt werden. Hierzu gehörten auf technischer Seite insbesondere Leistungs- und Frequenzfluktuationen des Ausleselasers, elektronisches Rauschen des Detektors und nachfolgender Elektronik. Da die Detektion des angeregten Zustands über einen Übergang bei 483nm im Vergleich zu 461nm Hintergrundfrei erfolgt, sollte dies das technische Amplitudenrauschen weiter reduzieren. Hierfür wurde ein hauseigener Extended-Cavity-Diode-Laser (ECDL) bei 483nm aufgebaut. Es wurde außerdem in dem QUASENS Projekt ein kommerzieller 483nm Laser beschafft. Ende 2023 konnte Spektroskopie bei diesem Übergang erstmals nachgewiesen werden.

Auf fundamentaler Seite trägt atomares und photonisches Shotnoise zum Amplitudenrauschen bei, diese liegen nach momentanen Rechnungen bei $< 2 \times 10^{-15} / \sqrt{\tau}$ und sind somit nicht limitierend.

Phasenrauschen durch Wellenfrontschwankungen (Luftdruckschwankungen) sowie durch Änderung des optischen Weges innerhalb des Interferometers durch thermische Effekte und mechanische Vibrationen führen zu einer Frequenz-Instabilität der Uhr. Diese Effekte können wie bereits erwähnt durch In-Vakuum Optiken minimiert werden. Weiterhin ist die aufgeprägte Phase auf das Signal anti-symmetrisch bei Umkehrung des Atom-Weges. Durch Nutzung von zwei entgegen gerichteten Atomöfen, die die gleiche Laser-Interaktion durchlaufen, kann somit das Phasenrauschen unterdrückt werden.

Eine Auswahl an untersuchten Effekten ist in Tabelle 1 dargestellt.

Tabelle 1: Auswahl an Effekten auf die Uhrenstabilität.

EFFECT	MITIGATION & MAGNITUDE
ATOMIC SHOT NOISE	Collimation of atomic beam & elliptical Laser beams $4e-16 / \sqrt{\tau}$
PHOTONIC SHOT NOISE	Large fluorescence solid angle / $\sim 2e-15 / \sqrt{\tau}$
VIBRATIONS	Suitable mounting / $2e-13/g$
READOUT AMPLITUDE FLUCTUATION	Freq. instab. scaling: 7×10^{-11} (483nm) & 2×10^{-9} (461nm) Readout power stabilized to $< 5e-5$ [1ms – 1s] Readout frequency stabilized to $< 200\text{kHz}$ Readout laser power well above saturation Lock-In of clock laser to distinguish from frequency fluct.
PHASE FLUCTUATIONS	In-vacuum optics remove air fluctuations Dual-Oven technique (antisymmetric phase dependence) Temperature stabilized zerodur board Low deformation interface to vacuum chamber
RESIDUAL DOPPLER	Angle RB-beams $< 50\mu\text{rad}$, later $< 10\mu\text{rad}$
RELATIVISTIC DOPPLER	Oven temp stabilized to $< 10\text{mK}$
SAGNAC	Keep orientation of setup Earth's rotation leads to 2Hz shift for 90° orientation
LOCAL OSCILLATOR NOISE	Limits short term stability and coherence of interaction $< 10^{-13}$ at 10ms
MAGNETIC FIELDS	Insensitive to first order ($f_m=0$ to $f_m=0$) Quadratic 0.179Hz/Gs^2 , $\sim 10\text{Gs}$ used in setup
TECHNICAL NOISE	Readout with 483nm Low-Noise Electronics
CONTRAST	Equal distance between outer RB-beams Angle RB-beams $< 50\mu\text{rad}$, later $< 10\mu\text{rad}$

3. AP2203/3203: Atom-Lock und Cavity-Lock

Bei dem kommerziellen Toptica-Laser bei 461nm sind während des Vorhabens ein weiteres Mal Probleme aufgetreten. Es konnte gezeigt werden, dass dies an der Nutzung von Standard-PBS von Thorlabs in dem optischen Isolator des Lasers liegt. Bei diesen PBS sind die Prismen geklebt statt optisch kontaktiert, welches eine höhere Anfälligkeit für Schäden durch zu hohe Laserleistung mit sich bringt. Der Laser wurde mit optisch kontaktierten PBS repariert.

Im Rahmen seiner Masterarbeit hat Conrad Ludwig Zimmermann einen ECDL bei 689nm auf eine High-Finesse Cavity gelockt. In OPUS-2 wurde der Seitenband-Lock optimiert, der es ermöglicht, ein variables Offset zwischen Laserfrequenz und Cavity-Resonanz einzustellen. Außerdem wurden Rechnungen zu fundamentalen Limits wie Shotnoise und Thermisches Rauschen angefertigt. Die Stabilität des Cavity-Locks ist besser als nötig, sodass die angestrebte Performance des Gesamt-Setups nicht vom Cavity-Lock limitiert sein sollte.

Allerdings hatte der verwendete Sacher Laser ungelockt eine hohe Linienbreite sowie ein schlechtes Wellenlängen-Tuning Verhalten. Daher wurde im Rahmen vom BMWK geförderten Projekt QUASENS ein neuer Laser bei 689nm von Toptica beschafft. Im Zuge dessen wurde auch die Lock-Elektronik des Cavity-Locks aufgewertet. Insgesamt ist der Cavity-Lock nun weniger anfällig gegenüber Modensprüngen und eine automatisierte Ansteuerung ist möglich.

Es wurde im Rahmen von SOLIS eine Vergleichsmessung gegen einen weiteren Cavity gelockten Laser bei 689nm aufgebaut. Die Auswertung dieser Messung steht noch aus.

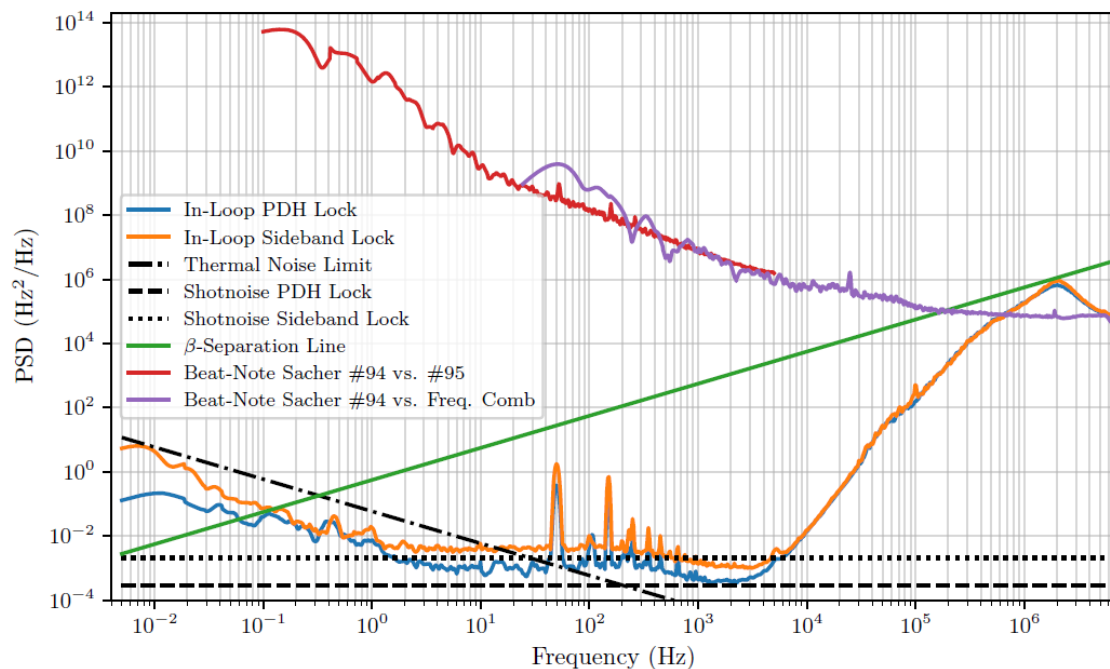


Abbildung 12: In-Loop Messung des Rauschens des stabilisierten Lasers bei 689nm. Zum Vergleich sind das Rauschen des freilaufenden Lasers sowie fundamentale Rauschlimits aufgeführt.

Es wurde eine Faser zwischen zwei Laboren verlegt, um einen Beat zwischen dem 689nm Licht und einem Frequenzkamm zu ermöglichen. Dies wurde bereits genutzt, um eine zweite optische Uhr basierend auf einem 2-Photon Übergang in Rubidium bei 778nm gegen das Cavity-stabilisierte 689nm Licht zu vermessen. Unter der Annahme, dass der hieraus gemessene Drift von der Cavity herrührt, konnte eine Drift-Rate der Cavity von 1.17kHz/h abgeleitet werden. Diese ist etwas höher als der spezifizierte Wert von 0.54kHz/h.

4. AP 5200: Integration Flugfähiges Physics-Package (10 PM)

Dieses Arbeitspaket entfällt nach Absprache mit ZG entsprechend des Änderungsantrages vom 16.November 2022 bzw. 13.02.2023. Die freigewordene Kapazität wurde in Abstimmung mit dem ZG genutzt für den Test der neuen Retroreflektoren, Weiterführung der Monte-Carlo Simulationen, weiteren Berechnungen zu Systematiken sowie Optimierung der Labor-Spektroskopie.

5. AP 6200: Erweiterte Konzepte: Kaltes Strontium (12 PM)

Es wurde ein Lasersystem zum Kühlen entworfen in Hinblick auf Detuning der verschiedenen Pfade (2D-MOT, 3D-MOT, Zeeman-Slower). Es wurden ECDLs bei 679nm und 707nm zum Rückpumpen aufgebaut und charakterisiert. Es wurde ein Setup zum Injection Lock bei 461nm aufgebaut, um die nötige Leistung zum Laserkühlen bereitzustellen. Weiterhin konnte ein Laser bei 689nm basierend auf einem Interferenz-Filter-Design aufgebaut werden.

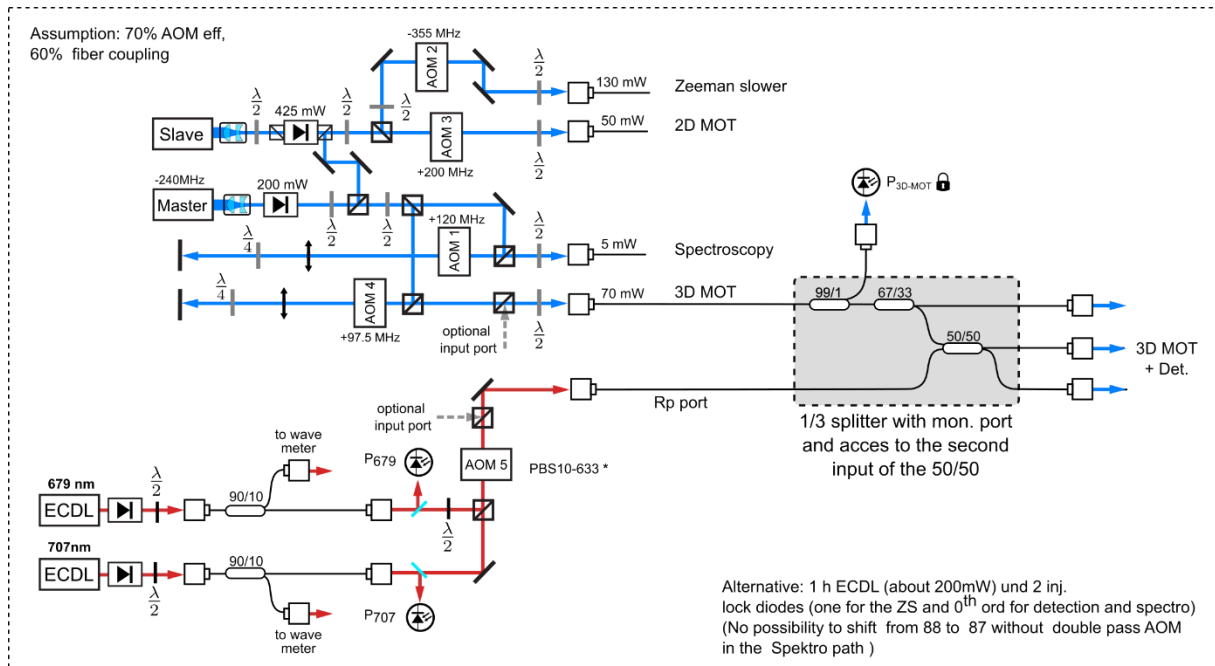


Abbildung 13: Lasersystem zum Erzeugen einer blauen 3D-MOT

Es wurde Licht für den Zeeman-Slower in das Vakuum-System eingekoppelt (siehe Abbildung 144).

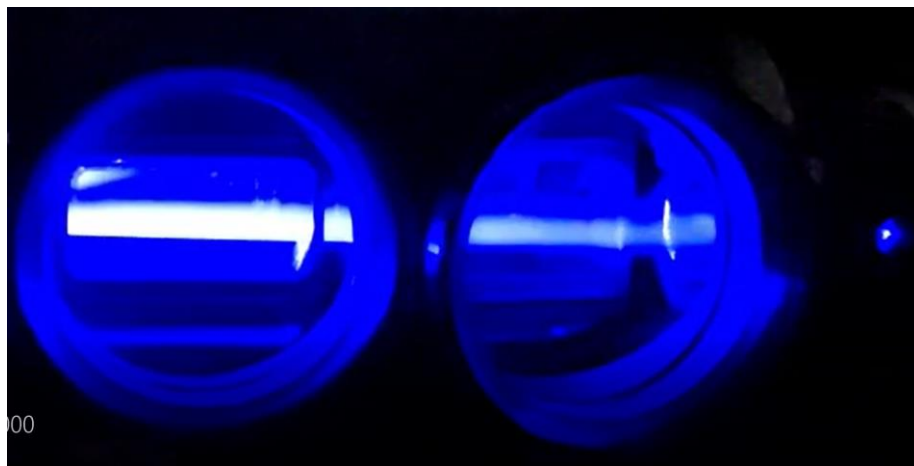


Abbildung 14: Fluoreszierende Atome bei Einstrahlen des Zeeman-Slowers.

Das AP sieht die Erweiterung der AOSense Apparatur, bestehend aus einem Strontium Ofen sowie einem Zeeman Slower, um eine 3D-MOT Kammer vor. Dazu wurde in starker Synergie mit dem Vorhaben SOLIS ein Design für die 3D MOT Kammer finalisiert, die Kammern gefertigt, Komponenten beschafft und gegenwärtig experimentell erprobt. Abb. 9 zeigt ein CAD Modell des Designs des kompletten Vakuumsetups sowie der hergestellten 3D-MOT Kammer.

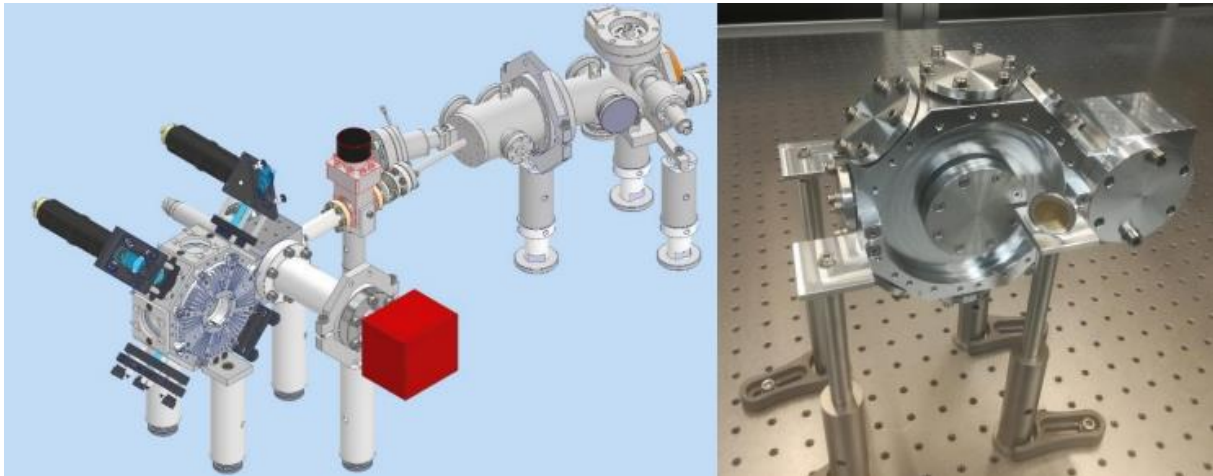


Abbildung 15: CAD Modell des gesamten Vakuum Designs (links) und Foto der hergestellten 3D-MOT Kammer mit montierten Fenstern unmittelbar vor dem Ausheizen (rechts)

2. Die wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Die beantragten Mittel wurden für die involvierten Mitarbeiter, für Investitionen, Komponenten- und Verbrauchsmaterial sowie für Dienstreisen entsprechend der Bewilligung und bewilligter Umwidmungen eingesetzt.

3. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Mit diesem Vorhaben wurde erstmals Ramsey-Bordé Interferometrie mit Strontium demonstriert. Dies bildet die Grundlage für weiterführende Arbeiten zur Charakterisierung und Verbesserung der Uhrenstabilität sowie anschließender Miniaturisierung des Systems und Demonstration in-Orbit.

In OPUS-2 wurden folgende Ziele erreicht:

- Aufbau und Charakterisierung einer langlebigen, kompakten Atomquelle mit niedrigem Leistungsverbrauch.
- Aufbau eines Spektroskopie-Aufbaus zur Erzeugung paralleler Laserstrahlen zur Atominterrogation.
- Laserleistungs-Stabilisierung für den Uhren- und den Ausleselaser.
- Frequenzstabilisierung des Ausleselasers über FMS.
- Weiterführung von Monte-Carlo Simulationen des Atominterferometers.
- Optimierung der Vorstabilisierung des Uhrenlasers auf eine High-Finesse Cavity.
- Berechnungen zu Systematiken und äußeren Einflüssen auf die Uhrenstabilität.
- Demonstration von Ramsey-Bordé Fringes
- Erzeugung eines Fehlersignals und Lock des Lasers.
- Design eines Lasersystems für kalte Atome
- Inbetriebnahme einer kommerziellen Atomquelle und Aufbau eines Zeeman-Slowers

4. Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere der Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans

Das Vorhaben war aus organisatorischer, technischer und wissenschaftlicher Sicht ambitioniert und mit hohem Erfolgsrisiko verbunden. Durch den erfolgreichen Projektabschluss wurden mehrere Schlüsselkomponenten zur Realisierung einer hochstabilen Frequenzreferenz basierend auf Strontium-Atomstrahlen aufgebaut und getestet.

Die Konzepte der Lasersystemtechnologie lassen sich übertragen und weiterentwickeln in OPUS-3 und QUASENS. Kompakte, robuste und zuverlässige Strahlaufteilung und – Schaltung und finden weiterführend auch Anwendung in Experimenten, die mit kalten Atomen arbeiten. Die Arbeiten an kompakten Lasersystemen sind damit essentiell nicht nur im Rahmen von OPUS und den vom DLR und BMBF geförderten Projekten im Bereich der Atominterferometrie (QUANTUS, MAIUS), und optischen Uhren (ROSC, SOLIS, QUASENS) sowie für andere Anwendungen stabiler und kompakter Frequenzreferenzen.

Die Arbeiten an integrierten optischen Systemen und Atomquellen bieten weiterhin Anknüpfungspunkte zu den DLR geförderten Projekten zu Mikrointegration (KACTUS, Q-CHIP, CAPTAIN-QT).

Das Vorhaben stärkt zudem nicht nur die nationale, sondern auch regionale Kompetenz auf dem Gebiet kompakter und zuverlässiger Lasersysteme und Frequenzreferenzen für Weltraumanwendungen. Es sichert damit den Institutionen für zukünftige europäische und internationale Projekte sehr gute Ausgangspositionen für Technologiedemonstrationen in diesem Bereich.

Insbesondere bildet dieses Vorhaben die Grundlage für die Weiterentwicklung hin zu eines weltraumqualifizierten Frequenzstandards (OPUS-3) sowie eines kompakten Frequenzstandards für industrielle Zwecke, bspw. der Datensynchronisation (QUASENS, BMBF-gefördert).

Überdies kann die Weiterentwicklung der Subkomponenten für verwandte Missionen und Experimente genutzt werden. Insbesondere das Design eines kompakten Ofens mit einer Heizleistung von <10W ist attraktiv für Experimente mit (ultra-)kaltem Strontium und anderen Atomspezies mit vergleichbarem Dampfdruck, die in den letzten Jahren eine hohe Priorität eingenommen haben. Die entwickelten kompakten Laserquellen sind ebenfalls interessant für Experimente mit kaltem Strontium.

Zudem werden Ergebnisse aus OPUS verwertet, in dem sie als Designvorlage für Ofensysteme und Laserbenches aus Keramik dienen, die im Vorhaben CAPTAIN-QT entwickelt werden sollen.

5. Während der Durchführung des Vorhabens dem ZE bekannt gewordenen Fortschritts auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

- Sheerin, PhD Thesis über kompakte Calcium RB Uhr am Draper Institute / MIT
- CalciumClock project startete ~2022 in Bonn (Gruppe um Simon Stellmer)
- Gruppe um T. M. Stace in Adelaide: Theoretische Berechnungen zu Wellenfronten (Strathearn2022)
- Gruppe um A. N. Luiten in Adelaide: Aufbau lasergekühlte Ytterbium RB Uhr (Poster bei ,9th Symposium on Frequency Standards and Metrology')

Keine der genannten Arbeiten forscht allerdings hierbei direkt auf dem Gebiet der Anwendbarkeit im Weltraum.

6. Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen des Ergebnisses

Folgende Vorträge wurden gehalten

- Fartmann, BOS-QT Graduate School Retreat, Berlin, Poster
- Fartmann, DPG-Herbsttagung 2021, Online, Poster
- Tietje, DPG Frühjahrstagung 2022, Erlangen, Poster
- Fartmann, Les Houches School of Physics, Les Houches, Poster
- Tietje, Les Houches School of Physics 2022, Les Houches, Poster
- Fartmann, DPG Frühjahrstagung 2023, Hannover, Poster

Folgende Manuskripte wurden veröffentlicht:

- Zimmermann, Masterarbeit "A cavity-stabilized laser system for Ramsey-Bordé spectroscopy of thermal strontium" (2021)
- Jutisz, Masterarbeit "Development of a compact and efficient Ramsey-Bordé spectroscopy unit" (2021)
- Schkolnik et al. 'Optical atomic clock aboard an Earth-orbiting space station 2023 *Quantum Sci. Technol.* 8 014003

Folgende Manuskripte befinden sich in Bearbeitung:

- Fartmann et al., Ramsey Bordé Atom Interferometry on a thermal strontium beam
- Fartmann, Doktorarbeit