HUMBOLDT-UNIVERSITÄT ZU BERLIN

ROSC:
Rubidium Optical Space Clocks

DLR 50 RK 1971

Laufzeit: 01.08.2019 – 31.03.2024

Abschlussbericht

Erstellt von:

Klaus Döringshoff, Julien Kluge, Daniel Kohl, Markus, Krutzik, Moritz Eisebitt

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 1
4. Wissenschaftlicher und technischer Stand bei Projektbeginn 2
5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen 3
II. Eingehende Darstellung 4
1. Verwendung der Zuwendung und des erzielten Ergebnisses im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele 4
AP 2: Konzeptentwicklung, Design und Aufbau eines 5S → 5D Zwei-Photonen Rubidium Spektroskopie Laboraufbau 4
AP 3: Entwicklung von integrierten Konzepten für Gaszellen-basierte Physics-Packages zur Rubidiumspektroskopie im Weltraum 15
AP 4: Anodisch gebondete Gaszellen mit Alkalimetall-Dispensern für die Rubidium-spektropskopie 19
2. Die wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises 25
3. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit 25
4. Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere der Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans 25
5. Während der Durchführung des Vorhabens dem ZE bekannt gewordenen Fortschritts auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen 26
6. Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen des Ergebnisses 27

I. Kurzdarstellung

1. Aufgabenstellung

Ziel des Verbundvorhabens ROSC war die Entwicklung von Schlüsselkomponenten für eine optische Uhr auf Basis der Zwei-Photonen Spektroskopie von Rubidium und einem Frequenzkamm für die Anwendung im Weltraum.

Im diesem Teilvorhaben des Antragstellers – der Humboldt-Universität zu Berlin (HUB) – sollten folgende Ziele erreicht werden:

1. Konzeptentwicklung, Design und Aufbau eines Laboraufbaus zur Zwei-Photonen Spektroskopie des 5S → 5D Übergangs in Rubidium
2. Entwicklung von integrierten Konzepten für Gaszellen-basierte Physics-Packages zur Rubidiumspektroskopie im Weltraum.
3. Anodisch gebondete Gaszellen für die Spektroskopie von Rubidium.

2. Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Das Teilvorhaben im Verbundprojekt ROSC wurde von der Humboldt-Universität zu Berlin (HUB) in Kooperation mit den u. g. Forschungseinrichtung und einem mittelständischen Unternehmen durchgeführt, welche unter anderem über umfangreiche Expertise auf dem Gebiet der mikrointegrierten Diodenlaser und der optischen Frequenzkämme, insbesondere mit Hinblick auf Anwendung im Weltraum, verfügen.

Die Entwicklungsschritte wurden im Rahmen der verfügbaren finanziellen Mittel durchgeführt. Die Verbundpartner waren:

1. Menlo Systems GmbH (Menlo)

2. Humboldt-Universität zu Berlin (HUB)

3. Ferdinand-Braun-Institut, Leibniz-Institut für Höchstfrequenztechnik (FBH)

Das Gesamtvorhaben wurde durch die Menlo Systems GmbH koordiniert.

Die Humboldt-Universität zu Berlin führte die Arbeiten im Rahmen von Bachelor-, Master- und Doktorarbeiten sowie unter Beschäftigung von Postdoktoranden und wissenschaftlichen Mitarbeitern durch.

3. Planung und Ablauf des Vorhabens

Der Ablauf des Teilvorhabens wurde in vier Arbeitspakete unterteilt, in denen die drei o. g. wissenschaftlich-technischen Arbeitsziele bearbeitet wurden.

AP 1. Projektmanagement

AP 2. Konzeptentwicklung, Design und Aufbau eines 5S → 5D Zwei-Photonen Rubidium Spektroskopie Laboraufbaus

AP 3. Entwicklung von integrierten Konzepten für Gaszellen-basierte *Physics-Packages* zur Rubidium-Spektroskopie im Weltraum

AP 4. Konzepte anodisch gebondeter Gaszellen für die Rubidium-Spektroskopie

Der Projektverlauf wurde anhand von Projektmeilensteinen überwacht.

Der Ablauf des Vorhabens wurde durch den Ausbruch der COVID-19-Pandemie erheblich beeinträchtigt. Insbesondere durch gestörte Lieferketten und Einschränkungen im Laborbetrieb zur Einhaltung der Hygienekonzepte an der Humboldt-Universität zu Berlin konnten die Arbeiten nicht im ursprünglich vorgesehenen Zeitrahmen durchgeführt werden. Der Projektzeitplan wurde daher in Abstimmung mit dem Mittelgeber angepasst.

4. Wissenschaftlicher und technischer Stand bei Projektbeginn

Die Humboldt-Universität zu Berlin entwickelte und betrieb zu Projektbeginn bereits verschiedene optische Frequenzreferenzen mittels Laserspektroskopie von Alkaliatomen und Molekülen. Die dabei verwendeten Spektroskopiezellen waren Glaszellen mit Längen von wenigen Zentimetern bishin zu mehreren zehn Zentimetern. Für die Integration von Spektroskopiemodulen mit besonders kleinem SWaP Budget, was insbesondere für die Raumfahrtanwendungen von Interesse ist, bieten sich MEMS Zellen mit nur wenigen Millimeter Kantenlänge in Verbindung mit Methoden der Zwei-Photonen-Spektroskopie an. Die vergleichsweise kleinen MEMS Zellen lassen sich besonders effizient auf die, für den notwenigen Rubidium-Dampfdruck erforderlichen, ca. 100 °C heizen und die Zwei-Photonenspektroskopie ermöglicht die Erzeugung von Spektren mit einem Signal-zu-Rauschverhältnis, welches die Frequenzstabilisierung des Anregungslaser auf einen optischen Übergang in Rubidium mit der angestrebten Frequenzstabilitäten und der daraus resultieren Uhrenstabilität erlaubt.

Im Jahr 2019 wurde bereits die Architektur einer photonischen Uhr auf Basis der Zwei-Photonen-Spektroskopie an Rubidium in einer MEMS Zelle mit einer Frequenzinstabilität von $4.4\times10^{-12}/\sqrt{\tau}$ demonstriert [1]. Dieser Demonstrator war allerding noch nicht für den Einsatz außerhalb von Laboren entwickelt. Die Entwicklung von Zwei-Photonen-Frequenzreferenzen für Anwendungen im Weltraum wurde am Air Force Research Laboratory der USA durchgeführt in denen eine Zwei-Photonen-Frequenzreferenz mit einer Frequenzinstabilität von $4\times10^{-13}/\sqrt{\tau}$ für Mittelungszeiten von 1 s bis 10.000 s demonstriert wurde [2], allerdings mit einer Glaszelle in einem Laboraufbau.

An der Humboldt-Universität zu Berlin wurden in der QUEEN Phase A/B Studie erste Untersuchungen zur Machbarkeit einer raumfahrttauglichen optischen Frequenzreferenz auf Basis der Zwei-Photonen-Spektroskopie von Rubidium durchgeführt [3]. Im Rahmen dieses Vorhabens wurden an der Humboldt-Universität zu Berlin erste Zwei-Photonen-Spektren an Rubidiumdampfzellen aus Glas erzeugt.

Ein raumfahrttaugliches Design einer Rubidium-Zwei-Photonen Frequenzreferenz existierte zu Beginn des Vorhabens noch nicht.

[1] Newman, Z. L., Maurice, V., Drake, T., Stone, J. R., Briles, T. C., Spencer, D. T., … Hummon, M. T. (2019). Architecture for the photonic integration of an optical atomic clock. *Optica*, *6*(5), 680.

[2] Martin, K. W., Stuhl, B., Eugenio, J., Safronova, M. S., Phelps, G., Burke, J. H., & Lemke, N. D. (2019). Frequency shifts due to Stark effects on a rubidium two-photon transition. *Physical Review A*, *100*(2), 023417.

[3] Dinkelaker, A. N., Kaparthy, A., Reher, S. E., Krutzik, M., Berlin, H., Bawamia, A., … Straße, G. (2019). Frequency Standards in Space Using Small Satellites OPTICAL QUANTUM TECHNOLOGIES for Compact Rubidium Vapor-cell, 72, 74–82.

5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Das Projekt ROSC wurde als Verbundvorhaben mit folgenden Verbundpartnern durchgeführt

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

Für die Entwicklung und Fertigung der MEMS Zellen wurde mit der Abteilung Prozesstechnologie, unter der Leitung von Dr. Olaf Krüger, des Ferdinand-Braun-Instituts Berlin zusammengearbeitet.

II. Eingehende Darstellung

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

Die wissenschaftlich-technischen Arbeiten des Teilvorhabens gliederten sich in die folgenden drei Arbeitspakete die im Folgenden dargestellt werden.

AP 2. Konzeptentwicklung, Design und Aufbau eines 5S → 5D Zwei-Photonen Rubidium Spektroskopie Laboraufbau

AP 3. Entwicklung von integrierten Konzepten für Gaszellen-basierte *Physics-Packages* zur Rubidium-Spektroskopie im Weltraum

AP 4. Konzepte anodisch gebondeter Gaszellen für die Rubidium-Spektroskopie

Arbeitspaket AP 1 umfasste die Administration des Vorhabens.

AP 2: Konzeptentwicklung, Design und Aufbau eines 5S → 5D Zwei-Photonen Rubidium Spektroskopie Laboraufbau

Design und Aufbau eines Breadboards für Zwei-Photonen- (5S→5D) und Ein-Photon (5S→6P) Übergänge in Rb

Es wurden Lasersysteme für die Zwei-Photonen-Spektroskopie von Rubidium bei 778.1 nm und ein Lasersystem für die Sättigungsspektroskopie von Rubidium bei 420.3 nm entworfen und realisiert.

Für die Zwei-Photonen-Spektroskopie von Rubidium bei 778.1 nm wurden zwei unterschiedliche Lasersysteme realisiert. Eines basiert auf einem *extended cavity diode laser* (ECDL) welches Licht bei einer Wellenlänge von 778.1 nm emittiert, und das zweite Lasersystem basiert auf einem Faserlaser, welcher Licht bei einer Wellenlänge von 1556.2 nm emittiert welches wiederum in einem Frequenzverdoppler auf 778.1 nm halbiert wird. Das Gesamtsystem mit beiden Laserquellen ist in Abbildung 1 dargestellt.
Weiter wurde ein kompaktes, fasergekoppeltes Spektroskopiemodul für die Zwei-Photonen Spektroskopie entwickelt und aufgebaut, siehe Abbildung 2. Das Spektroskopiemodul besteht aus einer geheizten Rubidium Dampfzelle, welche von einem Mu-Metallschild gegen Magnetfelder abgeschirmt wird. Das Spektroskopiemodul enthält die Optiken für die Führung des Spektroskopie-Laserstrahls bei 778.1 nm durch die Rubidiumzelle sowie ein Linsensystem zur Bündelung des Fluoreszenzlichts bei 420.3 nm auf einen Silizium Photomultiplier (SiPM).

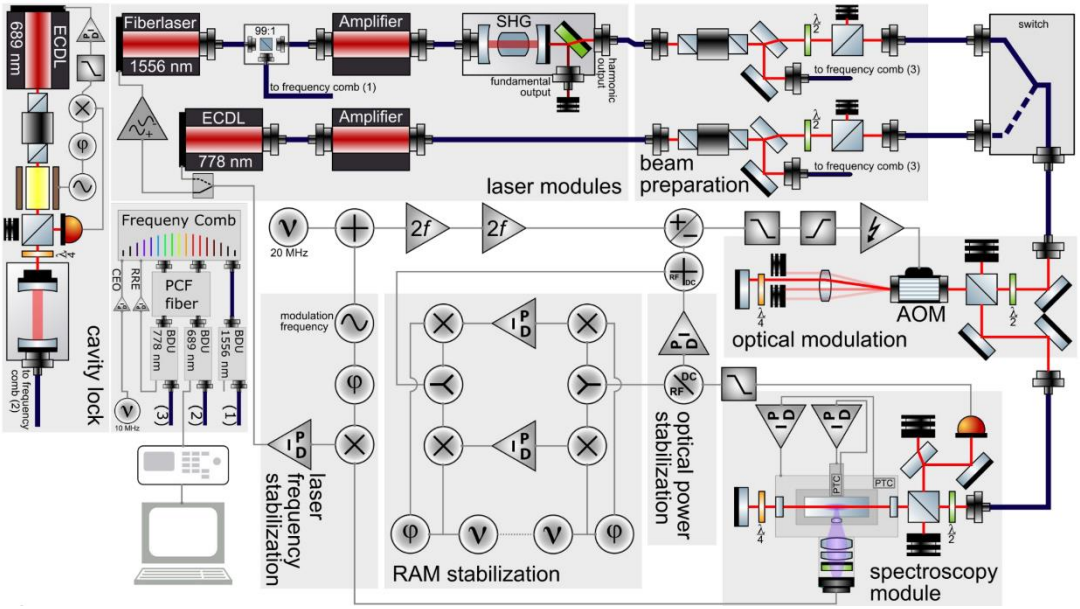


Abbildung 1: Schematische Darstellung des Lasersystems für die Zwei-Photonen-Spektroskopie von Rubidium bei 778.1 nm.

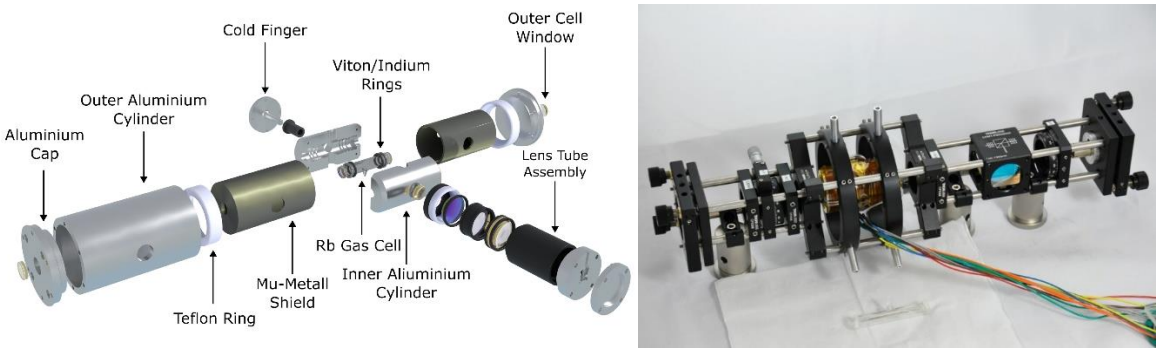


Abbildung 2: Zwei-Photonen Spektroskopiemodul. Links: Explosionszeichnung des 3D CAD Modells des Spektroskopiemoduls. Rechts: Foto des Spektroskopiemoduls.

Für die Sättigungsspektroskopie von Rubidium bei 420.3 nm wurde ein Lasersystem entworfen und aufgebaut, welches die Anwendung der Frequenzmodulationsspektroskopie von Rubidium erlaubt, siehe Abbildung 3. Das Lasersystem basiert auf einem Galliumnitrid *extended cavity diode laser* (ECDL), welcher Licht direkt bei einer Wellenlänge von 420.3 nm emittiert. Ein akusto-optischer Modulator wird in doppel-Pass Konfiguration verwendet um eine Frequenz-offset zwischen den beiden Laserstrahlen für die Spektroskopie – dem Pumplaserstrahl und dem Probelaserstrahl – zu erzeugen und um auf einem der beiden Laserstrahlen eine Phasenmodulation aufzuprägen. Die so präparierten Laserstrahlen werden dann gegenläufig durch eine geheizte Rubidiumdampfzelle gelenkt und auf Photodetektoren detektiert.

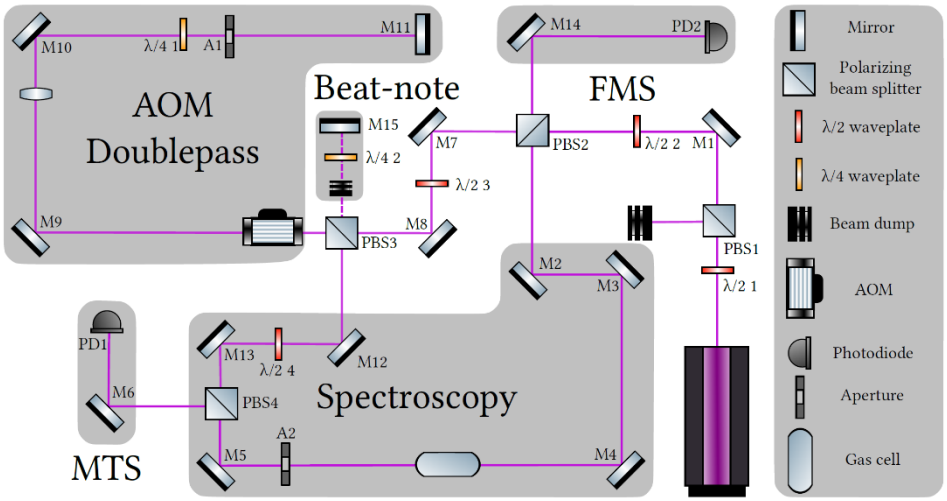


Abbildung 3: Schematische Darstellung des Lasersystems für die Sättigungsspektroskopie des 5S → 6P Übergangs in Rubidium. Abbildung aus der Bachelorarbeit von Moritz Eisebitt.

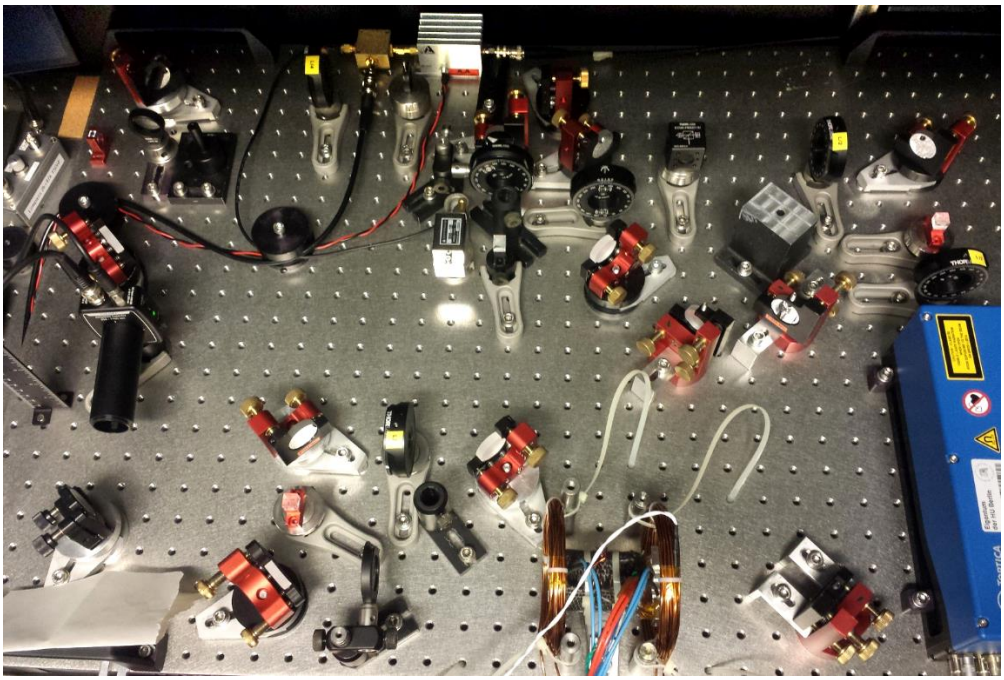


Abbildung 4: Aufbau zur Sättigungsspektroskopie des 5S → 6P Übergangs in Rubidium.

Mit diesen Ergebnissen konnten die Ziele des Arbeitspakets erreicht und erfolgreich abgeschlossen werden.

Spektroskopie des 5S → 5D Zwei-Photon- und 5S → 6P Ein-Photon Übergangs

Mit den o. g. Laboraufbauten wurden die Spektroskopie des 5S → 5D Zwei-Photon- und des 5S → 6P Ein-Photon-Übergangs durchgeführt. Die dabei adressierten Übergänge sind in Abbildung 5 und Abbildung 6 schematisch dargestellt.

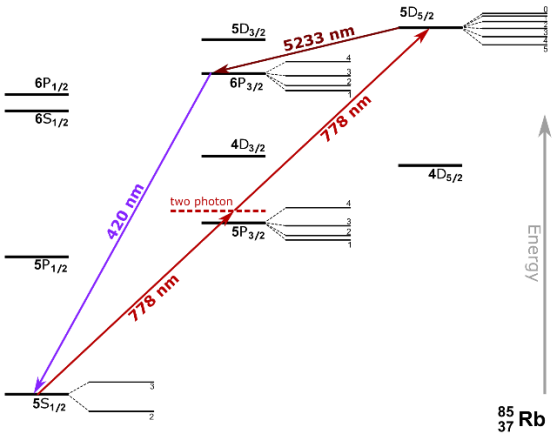


Abbildung 5: Energieschema der $^5S_{1/2}$ und $^5D_{5/2}$-Mannigfaltigkeiten von ^{85}Rb mit ihrer jeweiligen Hyperfeinstruktur-Aufspaltung.

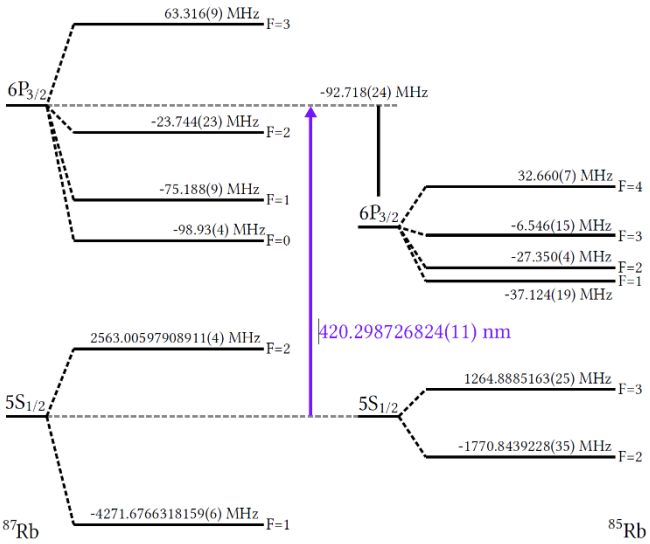


Abbildung 6: Energieschema der $^5S_{1/2}$ und $^6P_{3/2}$-Mannigfaltigkeiten von ^{87}Rb und ^{85}Rb mit ihrer jeweiligen Hyperfeinstruktur-Aufspaltung. Abbildung aus der Bachelorarbeit von Moritz Eisebitt.

5S → 5D Zwei-Photon Spektren

Die erzeugten Zwei-Photonen Spektren von Rubidium sind in Abbildung 7 gezeigt.

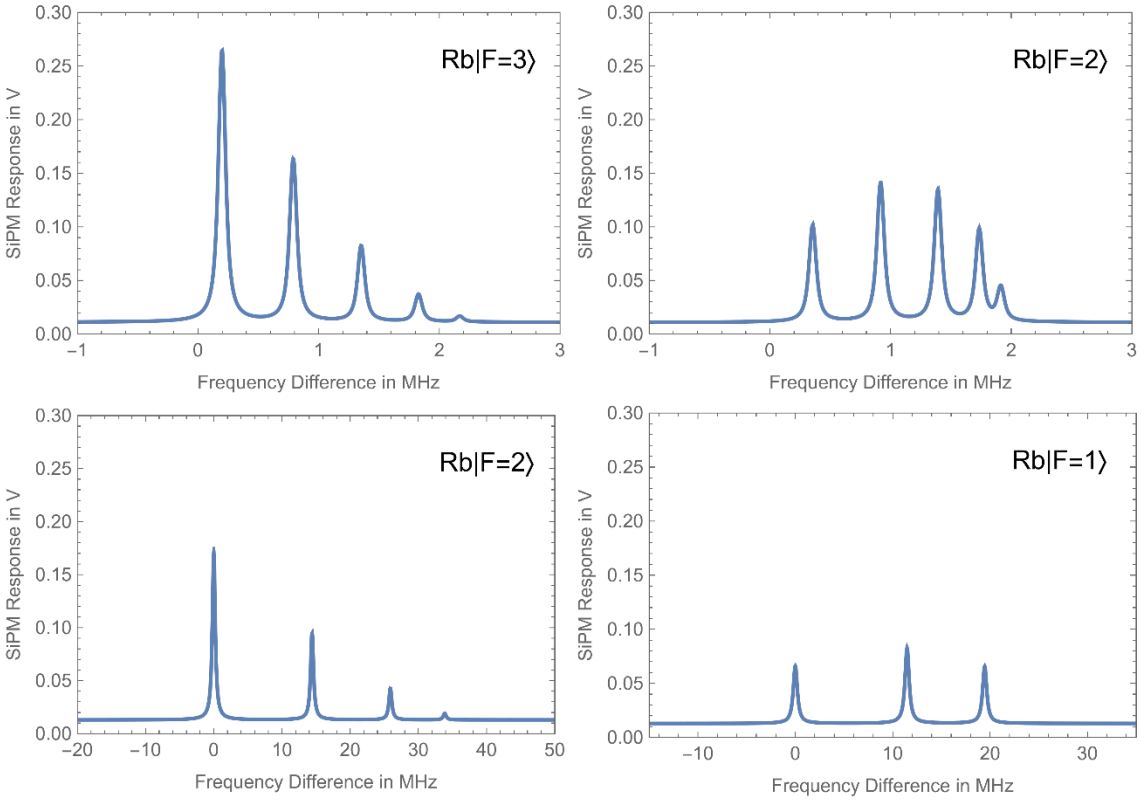


Abbildung 7: Rubidium Zwei-Photonen Spektren der verschiedenen $5S_{1/2} \rightarrow 5D_{5/2}$ Mannigfaltigkeiten.

5S → 6P Ein-Photon Spektren

Die 5S → 6P Ein-Photon Spektren sind in Abbildung 8 und Abbildung 9 gezeigt. Abbildung 8 zeigt das Absorptionsspektrum aller Übergänge vom Grundzustand in die $^6P_{3/2}$-Orbitale. Die durch den Pumpstrahl in die Dopplerprofile der Übergänge gebrannten Lamb-Dips sind deutlich zu erkennen. Abbildung 9 zeigt die einzelnen Übergänge im Detail, welche mit Hilfe von Modulations-Transfer Spektroskopie aufgenommen wurden.

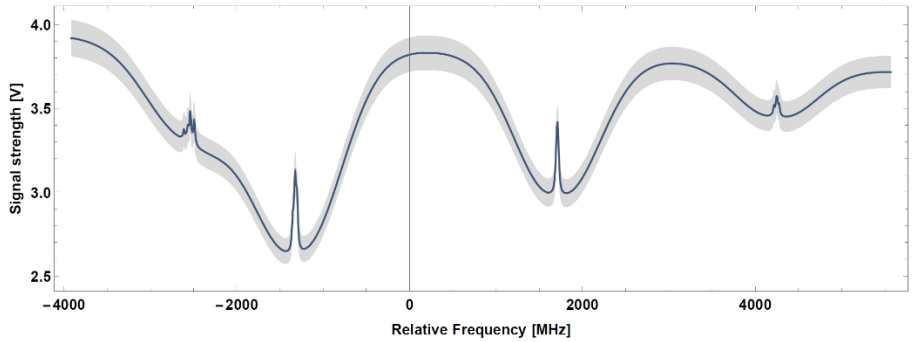


Abbildung 8: Absorptionsspektrum aller Übergänge vom Grundzustand in die $^6P_{3/2}$-Orbitale. Abbildung aus der Bachelorarbeit von Moritz Eisebitt.

Mit diesen Ergebnissen konnten die Ziele des Arbeitspakets erreicht und erfolgreich abgeschlossen werden.

Entwicklung von Konzepten für die Automatisierung von Frequenzstandards basierend auf ECDLs

Die Automatisierung des Rubidium-Zwei-Photon Frequenzstandards betrifft in erster Linie die *lock-Acquisition*, in welcher der freilaufende Laser zunächst den gewünschten optischen Übergang finden und identifizieren muss und dann der Regelkreis zur Stabilisierung der Emissionsfrequenz des Lasers auf die Übergangsfrequenz aktiviert werden muss. Hierzu wurde ein Algorithmus entwickelt, welcher ein ausgewähltes Spektrum identifizieren und die mittlere Frequenz des Lasers auf dem gewählten Übergang halten kann, während die Frequenz des Lasers den Übergang abtastet.

Aufbau einer Infrastruktur für Frequenzmetrologie der Rubidium Standards

Für die Charakterisierung der Frequenzinstabilität der optischen Frequenzreferenzen wurden mehrere elektro-optische Systeme zur Messung der Schwebungsfrequenz zwischen den Lasersystemen bei 778.1 nm aufgebaut. Durch die Messung der Schwebungsfrequenz zwischen zwei Lasern, welche auf unterschiedliche optische Frequenzreferenzen stabilisiert sind, können die differenziellen Frequenzschwankungen bestimmt werden. Die Schwebungsfrequenz wird dabei mit Frequenzzählern erfasst.

Weiter wurde ein optischer Frequenzkamm beschafft und in Betrieb genommen. Der Frequenzkamm ermöglicht den Vergleich von optischen Frequenzreferenzen bei verschiedenen Wellenlängen, hier: 778.1 nm (ECDL), 1556.2 nm (Faserlaser) und 689 nm (Resonator stabilisierter ECDL), sowie mit RF-Oszillatoren und Atomuhren.

Eine Übersicht des Aufbaus ist in Abbildung 1 gegeben.

Erzeugung von Fehlersignal, Frequenzstabilisierung und Optimierung der Güte der Frequenzstabilisierung des 5S→5D Zwei-Photon und 5S→6P Ein-Photon Standards

Die Frequenzstabilisierung von Lasern auf den Rubidium 5S → 6P Ein-Photon-Übergang wurde ein Aufbau auf Basis von Modulations-Transfer Spektroskopie realisiert. Bei phasensensitiver Detektion und geeigneter Wahl der Phase haben die dabei erzeugten Spektren einen Nulldurchgang in der Mitte der Ein-Photonenübergange, welche sich daher als Fehlersignale für die Stabilisierung der Emissionsfrequenz des Anregungslasers eignen, siehe Abbildung 9. Das Signal-zu-Rauschverhältnis des Spektroskopiesignals bestimmt die erreichbare Kurzzeitstabilität des Lasers. Das Signal-zu-Rauschverhältnis wurde durch, teilweise automatisierte, Variation der folgenden Parameter optimiert:

- Temperatur der Zelle (Rubidium Dampfdruck)
- Lichtleistung des Anregungslasers bei 420.3 nm
- Modulationsfrequenz und Modulationsindex
- Phase der phasensensitiven Detektion

Die so optimierten Betriebsparameter erlauben eine Kurzzeitinstabilität von etwa 2×10^{-13} bei 1 s Mittelungszeit. Diese wurde aus dem Signal-zu-Rauschverhältnis bestimmt.

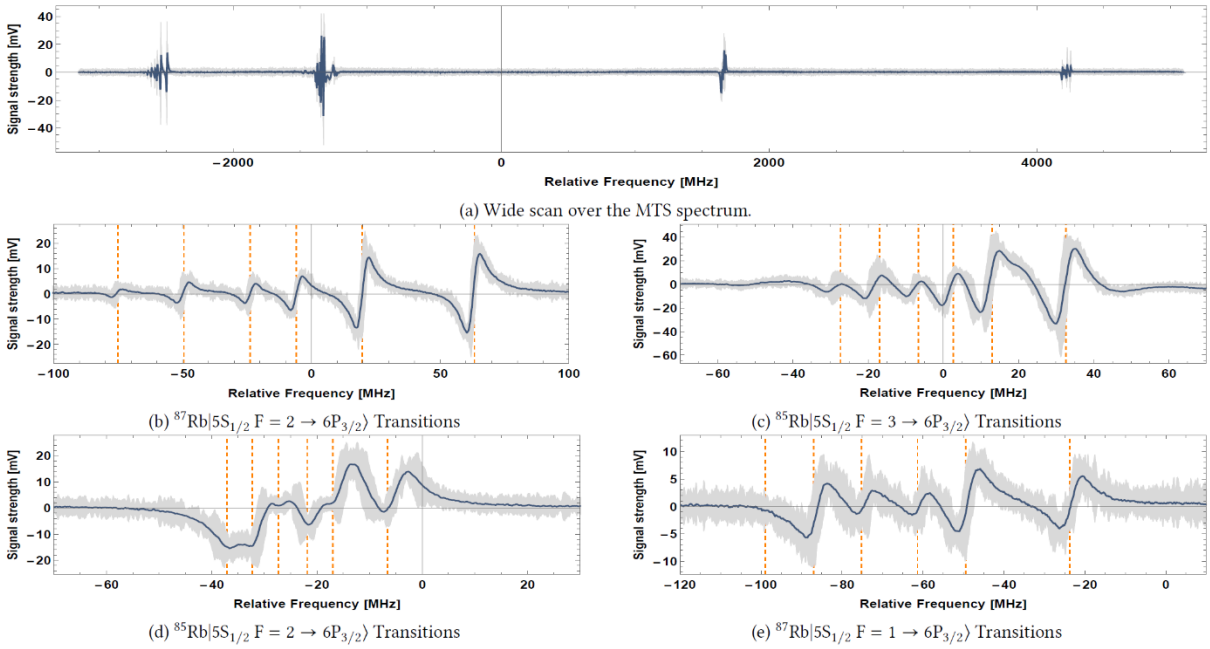


Abbildung 9: Spektren des 5S→6P Übergangs in Rubidium bei 420.3 nm. Die Spektren wurden mit der Methode der Modulations-Transfer Spektroskopie aufgenommen. (a) zeigt eine Abtastung über alle Übergänge vom Grundzustand in die $^6P_{3/2}$ Orbitale. In (b) bis (e) sind die jeweiligen Übergänge nach der Gesamtdrehimpulsquantenzahl des Grundzustands und adressierten Rubidium Isotopen gruppiert. Abbildung aus der Bachelorarbeit von Moritz Eisebitt.

Für die Frequenzstabilisierung von Lasern auf den Rubidium 5S→5D Zwei-Photon-Übergang wurde ein Aufbau unter Verwendung der Frequenzmodulationsspektroskopie realisiert. Bei phasensensitiver Detektion und geeigneter Wahl der Phase haben die dabei erzeugten Spektren einen Nulldurchgang in der Mitte eines Zwei-Photonenübergangs, welche sich daher als Fehlersignale für die Stabilisierung der Emissionsfrequenz des Anregungslasers eignen, siehe Abbildung 10. Das Signal-zu-Rauschverhältnis des Spektroskopiesignals bestimmt die erreichbare Kurzzeitstabilität des Lasers. Das Signal-zu-Rauschverhältnis wurde durch, teilweise automatisierte, Variation der folgenden Parameter optimiert:

- Temperatur der Zelle (Rubidium Dampfdruck)
- Lichtleistung des Anregungslasers bei 778.1 nm
- Modulationsfrequenz und Modulationsindex
- Phase der phasensensitiven Detektion

Die so optimierten Betriebsparameter erlauben eine Kurzzeitinstabilität von besser als $2 \times 10^{-13}/\sqrt{\tau}$.

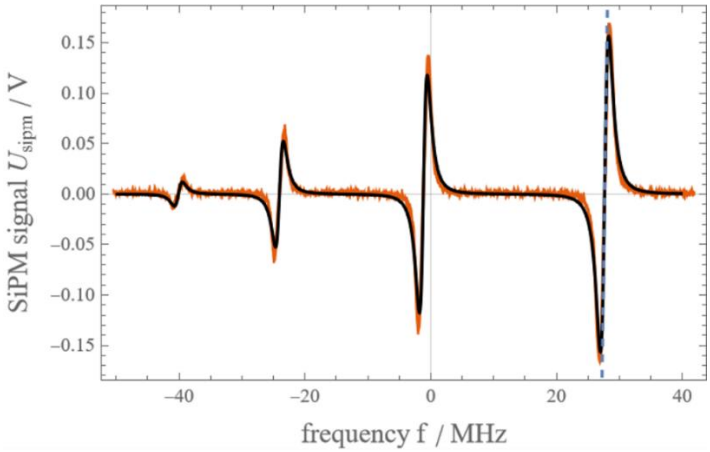


Abbildung 10: Spektrum eines 5S→5D Zwei-Photon Übergangs in Rubidium bei 778.1 nm.

Mit einem fasergekoppelten Prototypen eines kompakten Zwei-Photonen-Spektroskopiemoduls konnten erstmals Spektren mit dem, in diesem Verbundprojekt beim Verbundpartner FBH entwickelten, mECDL[1] erzeugt werden. Dazu wurde der mECDL auf einem C-mount in einen einem eigens gefertigten Halter montiert und auf einem kleinen Breadboard in eine Faser gekoppelt und zu dem Prototypen geleitet, siehe Abbildung 11. Ein exemplarisches Spektrum ist in Abbildung 12 gezeigt. Weiter konnte die Frequenz des mECDL auf einen optischen Zwei-Photonen-Übergang stabilisiert werden, wobei die in der Allan deviation (Abbildung 13) gezeigte Frequenzinstabilität erreicht werden konnte.

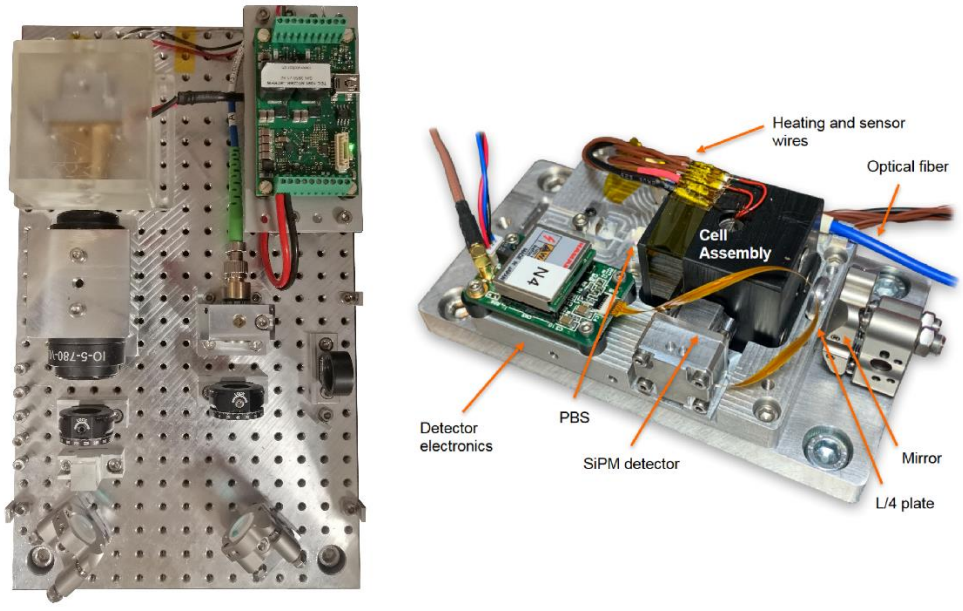


Abbildung 11: Links: Lasersystem mit mEDCL im C-mount mit Faserkopplung. Rechts: Zwei-Photonen Spektroskopie Prototyp.

[1]Wenzel, S., Brox, O., Casa, P. Della, Wenzel, H., Arar, B., Knigge, A., … Wicht, A. (2022). Monolithically Integrated Extended Cavity Diode Laser emitting at 778 nm. In Conference on Lasers and Electro-Optics (p. AW4M.5). Washington, D.C.: Optica Publishing Group. Wenzel, S., Brox, O., Casa, P. Della, Wenzel, H., Arar, B., Kreutzmann, S., … Tränkle, G. (2022). Monolithically Integrated Extended Cavity Diode Laser with 32 kHz 3 dB Linewidth Emitting at 1064 nm. Laser & Photonics Reviews, 16(12).

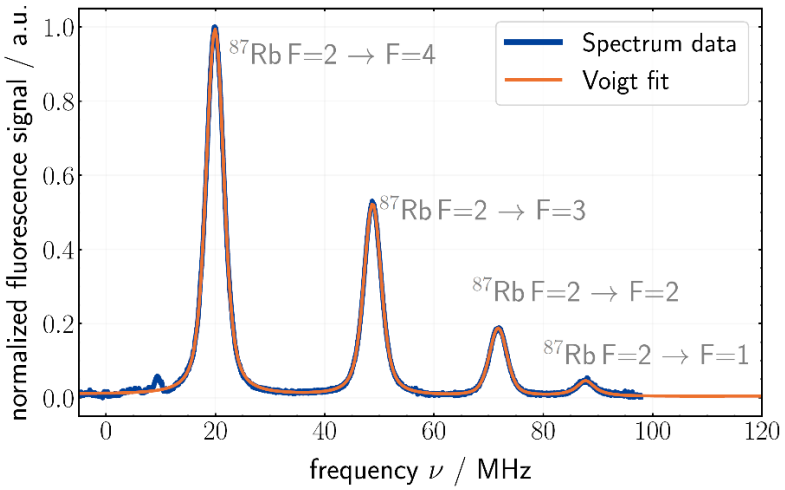


Abbildung 12: Spektrum eines 5S→5D Zwei-Photon Übergangs in Rubidium bei 778.1 nm aufgenommen mit einem monolithischen ECDL (mECDL).

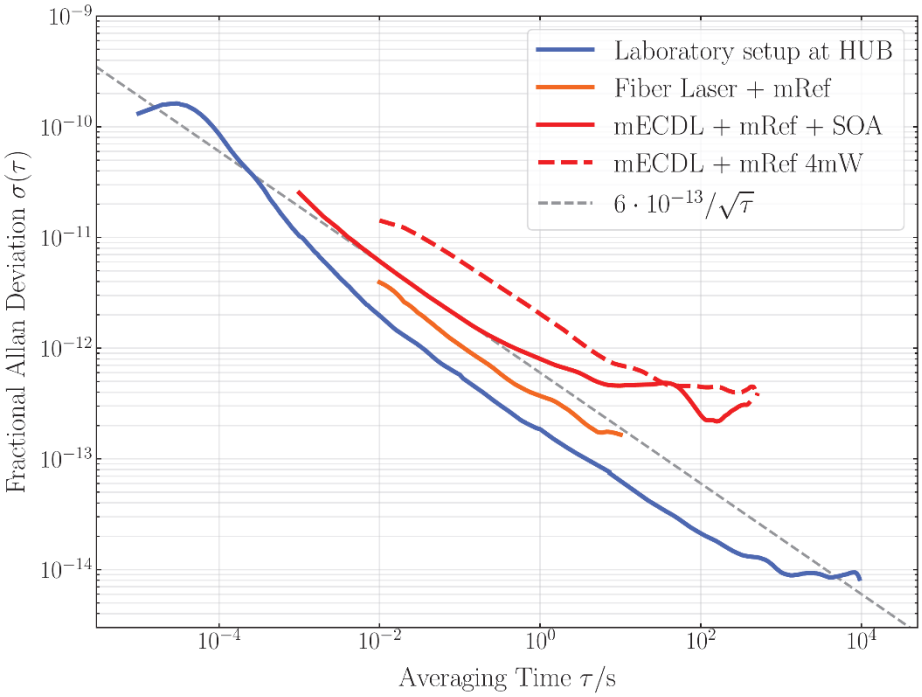


Abbildung 13: Allan Deviation der Zwei-Photonen Frequenzreferenz (Abbildung 11 (rechts)) unter Verwendung des mECDL in Vergleich zu den Laboraufbauten.

Evaluation und Vergleich der Standards über einen optischen Frequenzkamm mit beat detection unit (BDU) bei 420.3 nm und 778.1 nm. Optimierung der Beatparameter und Vorbereitung von qualifizierenden Langzeitmessungen; Durchführung der Messung

Zur Charakterisierung der Frequenzinstabilität der Rubidium-Zwei-Photonen-Referenz wurden Schwebungsmessungen zwischen den zwei Lasersystemen (ECDL und frequenzverdoppelter Faserlaser) sowie mit dem Frequenzkamm durchgeführt. Aus den, mit einem Frequenzzähler, aufgenommenen Zeitserien der Differenzfrequenz zwischen den einzelnen Referenzen wurde die Allan Deviation bestimmt. Abbildung 14 zeigt die Allan Deviation der Differenzfrequenz zwischen den, auf zwei baugleiche Spektroskopiemodule stabilisierte, Lasersysteme. Die Messungen zeigen eine Frequenzinstabilität von $2\times10^{-13}/\sqrt{\tau}$ für Mittelungszeiten τ von 1 s bis 1000 s mit einem Flickerrauschuntergrund von 1×10^{-14}.

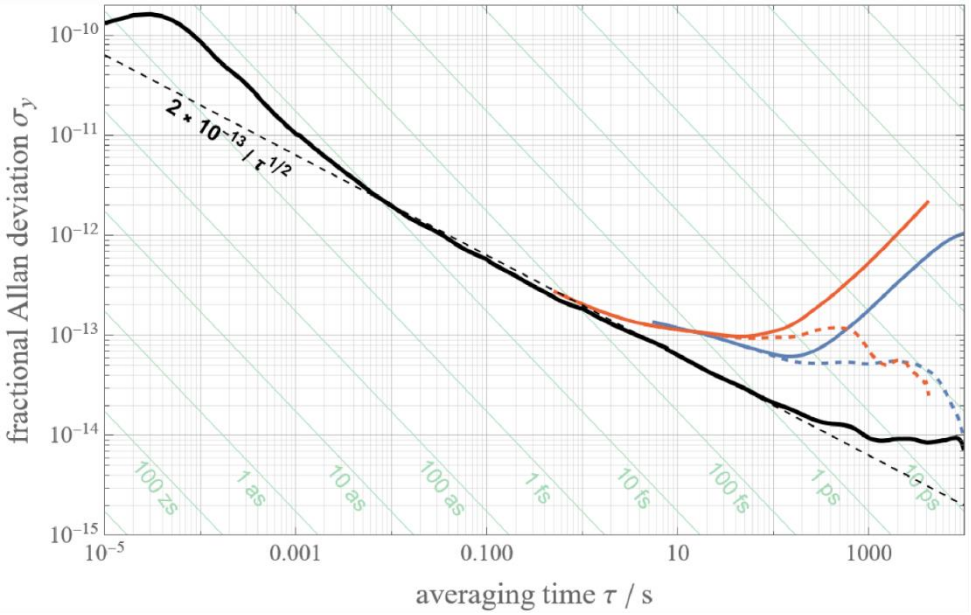
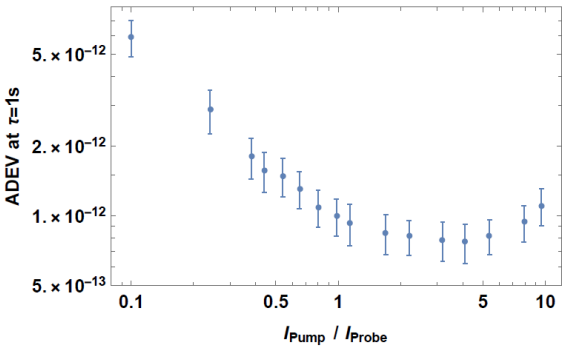
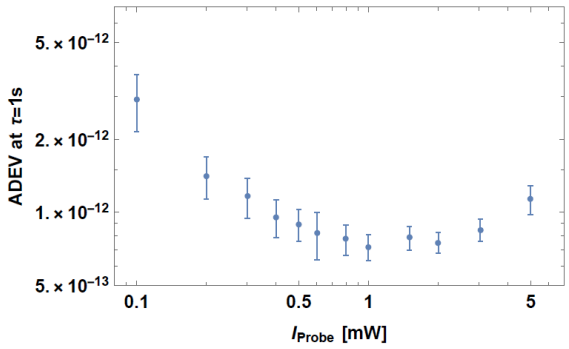


Abbildung 14: Allan Deviation der Zwei-Photon-Frequenzreferenz bei 778.1 nm. Die Allan Deviation zeigt weißes Rauschen von $2\times10^{-13}/\sqrt{\tau}$ für Mittelungszeiten τ von 1 s bis 1000 s mit einem Flickerrauschuntergrund von 1×10^{-14}.

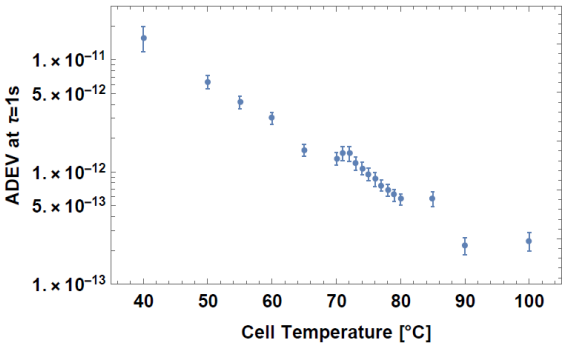
Zur Charakterisierung der Frequenzinstabilität der Rubidium-Referenz bei 420.3 nm wurde das Signal-zu-Rauschverhältnis des Spektroskopiesignals analysiert. Das Signal-zu-Rauschverhältnis des Spektroskopiesignals gibt Auskunft über die potentielle Kurzzeitstabilität des Spektroskopielasers, wenn dieser auf das Spektroskopiesignal stabilisiert werden würde. Die Analyse des Spektroskopiesignals in Abhängigkeit der Temperatur der Rubidumdampfzelle zeigt eine Frequenzinstabilität von 3×10^{-13} bei 1 s für Temperaturen über 90°C, siehe Abbildung 15.



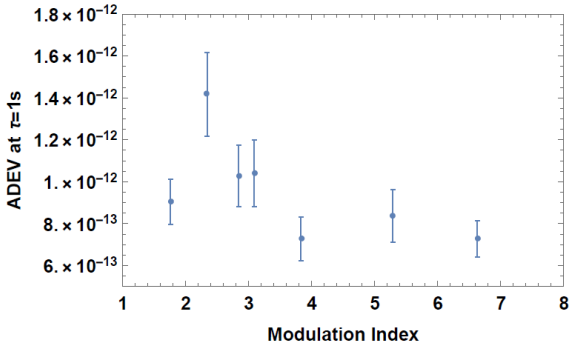
(a) Double logarithmic plot of the ADEV as a function of the intensity ratio of probe and pump beam at $I_{Pump} = 0.5\text{mW}$ and $T = 75°C$



(b) Double logarithmic plot of the ADEV as a function of the probe intensity at ratio of 3 and a temperature of $T = 75°C$



(c) Logarithmic plot of the ADEV as a function of the Temperature T



(d) Double logarithmic plot of the ADEV as a function of the modulation index

Abbildung 15: Allan Deviation der Ein-Photon-Frequenzreferenz bei 420.3 nm bei 1 s (a) in Abhängigkeit des Verhältnis der Pump- zu Probestrahlleistung, (b) in Abhängigkeit der Leistung des Probestrahls (c) in Abhängigkeit der Temperatur der Rubidium-Spektroskopiezelle, (d) in Abhängigkeit des Phasenmodulationsindex. Abbildungen aus der Bachelorarbeit von Moritz Eisebitt.

AP 3: Entwicklung von integrierten Konzepten für Gaszellen-basierte Physics-Packages zur Rubidiumspektroskopie im Weltraum

Spezifizierung von Anforderungen an kompakte Gaszellen für die Zwei-Photonen Spektroskopie.

Für die Zwei-Photonen Spektroskopie bei 778.1 nm wurde folgende Zellengeometrie für Glaszellen erarbeitet. Vorgesehen ist eine Zelle mit einem Außendurchmesser von 11 mm, einer Länge von 50 mm. Die Fenster werden mit einem Winkel von 11° zur optischen Achse, mit einem Keil von 2° zwischen Vorder- und Rückseite spezifiziert. Diese Anordnung soll stehende Wellen des Anregungslasers zwischen planparallelen Flächen vermeiden. Weiter sollen Vorder- und Rückseite der Fenster mit einer Antireflexbeschichtung versehen werden. Zur Kontrolle des Dampfdrucks des Rubidiums, soll die Zelle über einen *cold finger* mit 30 mm verfügen. Für noch kompaktere Aufbauten können Zellen mit 5 mm Länge ohne *cold finger* vorgesehen werden.

Weiter wurde die Befüllung der Absorptionszelle mit nur einem, angereicherten, Isotop von Rubidium vorgesehen.

Vergleich Detektorkonzepte

Es wurden zwei Konzepte zur Detektion der Fluoreszenz bei 420.3 nm in Betracht gezogen. Zum einen Photoelektronenvervielfacher (Photomultipier tubes, PMT), zum anderen Silicon photomultiplier (SiPM).

PMT sind für die Methode der Fluoreszenzspektroskopie die am häufigsten verwendeten Detektoren. Sie erlauben schrotrauschlimitierte Detektion des Fluoreszenzsignals bei 420.3 nm. PMTs wurden in der Raumfahrt beispielsweise in der amerikanischen Quecksilberionenuhr DSAC verwendet, sodass der Einsatz in einer Raumfahrtmission prinzipiell als möglich erscheint. Im Projekt QUEEN wurde im Laboraufbau eine PMT verwendet.

SiPMs erscheinen hinsichtlich der Integrierbarkeit in kompakte Systeme vielversprechend. Es wurden drei Modelle der Firma Hamamatsu verglichen. Die Weltraumtauglichkeit dieser Detektoren ist derzeit noch nicht geklärt. Es wurden drei kommerziell erhältliche SiPM Detektoren (vergleiche Tabelle 1) und für eine experimentelle Evaluierung wurden SiPMs vom Typ C13367-6050EA beschafft. Die SiPMs wurden in den Laboraufbauten (Abbildung 11 (rechts) & Abbildung 16) eingesetzt.

Der SiPM Detektor des Typs C13367-6050EA wurde erfolgreich einem TID Strahlungstest unterzogen, siehe Abbildung 18.

	MCCP (mounted SiPM)	MCCP (mounted SiPM)	MCCP (mounted SiPM)
	C13367-6050EA	C13852-3050GA	C14452-3050GA
Picture			
Price / Pcs	640 €	1.163,64 €	465,45 €
Photosensitive area	6 x 6 mm (36 mm^2)	3 x 3 mm (9 mm^2)	⌀ 3 mm (7.1 mm^2)
Pixel pitch	50 mum	50 mum	50 mum
Pixel count	14400 px	3600 px	2836 px
Cooling	None	Thermoelectric	None
Max operating temp.	-20 - 60 °C	-20 - 40 °C	-10 - 60 °C
Sensitivity @ 420 nm	8x10^8 V/W	8x10^8 V/W	3x10^8 V/W
Worst possible bandwith	DC - 2.5 MHz	DC - 3 MHz	DC - 1.4 MHz
Minimum detection limit	4.3 pW	0.35 pW	4.2 pW
Noise equivalent Power	2.3 fW/√Hz (0.73 pW @ 100 kHz)	0.15 fW/√Hz (0.05 pW @ 100 kHz)	3 fW/√Hz (0.95 pW @100kHz)
Rise time	/	9 ns	9 ns
Maximum output voltage	4.7 V (5.9 nW @ 420 nm)	4.7 V (5.9 nW @ 420 nm)	4.7 V (15.7 nW @ 420 nm)

Entwicklung von Konzepte**n **für die Realisierung kompakter, integrierter Physics Packages

Basierend auf den Erfahrungen der Entwicklung des kompakten Laboraufbaus aus AP 2 wurde ein fasergekoppeltes, kompaktes Spektroskopiemodul mit integrierter Detektionselektronik entwickelt und es wurden zwei dieser Module aufgebaut, siehe Abbildung 14. Die Integration in ein geschlossenes, kompaktes Gehäuse erhöht die thermische und mechanische Stabilität des Aufbaus.

Das fasergekoppelte Spektroskopiemodul enthält einen Faserkollimator für den Anregungslaser bei 778.1 nm, Polarisationsoptiken und die Laserstrahlführung durch die Rubidiumgaszelle. Ein Teil des Lichts wird vor der Gaszelle auf eine Photodiode für die Detektion der mittleren Lichtleistung und der Restamplitudenmodulation abgezweigt. Die Rubidiumzelle wird mit einem Heizdraht auf ca. 100°C erwärmt und ist von einem Mu-Metall-Schild zur Abschirmung von Magnetfeldern umgeben. Ein Kaltfinger an einer Seite des Zelle sorgt dafür, dass überschüssige Rubidium an einer Stelle an der Seitenfläche, und nicht auf den Fenstern, kondensiert. Das Fluoreszenzlicht wird auf einen SiPM Detektor gebündelt. Die elektrischen Signale der Photodetektoren werden gefiltert und über ein patch-panel ausgegeben.

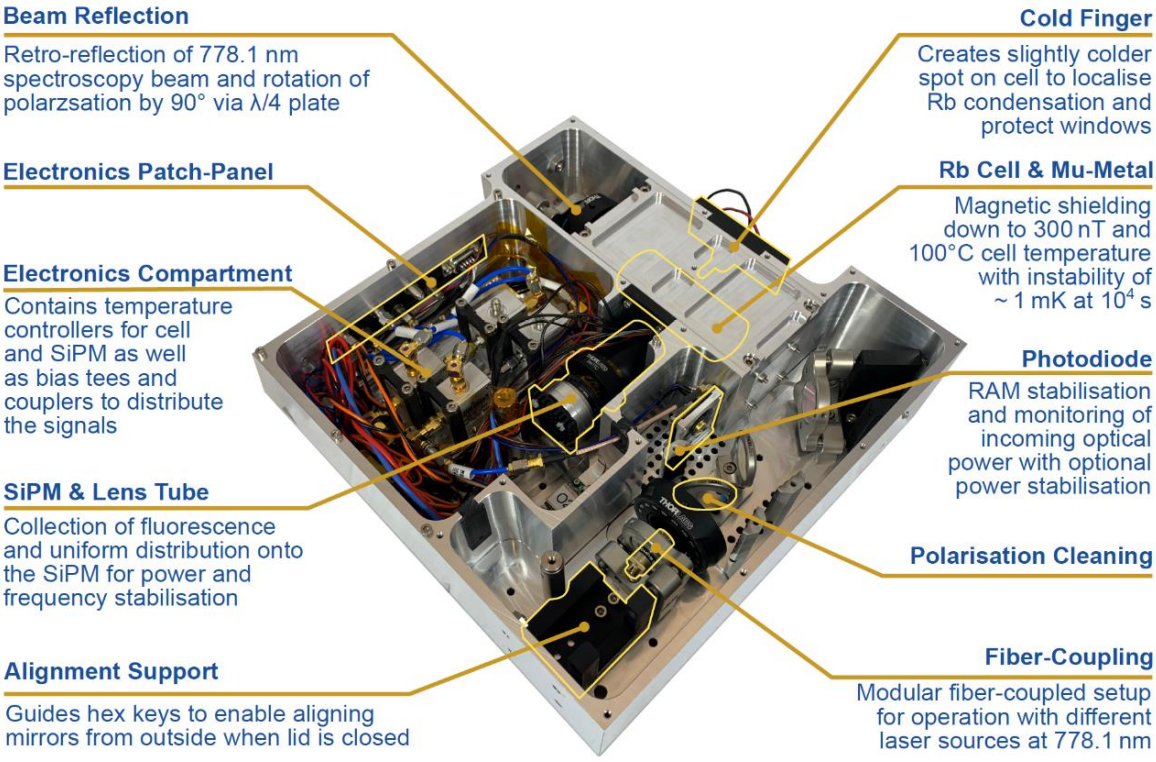


Abbildung 16: Photographie eines integrierten, fasergekoppelten Spektroskopiemoduls für die Zwei-Photonen Frequenzmodulationsspektroskopie.

Für die weitere Miniaturisierung des Spektroskopiemoduls wurde ein kompakter Aufbau für die Verwendung von MEMS Spektroskopiezellen entwickelt und aufgebaut. Ein CAD Bild und ein Foto dieses Aufbaus sind in Abbildung 17 gezeigt.

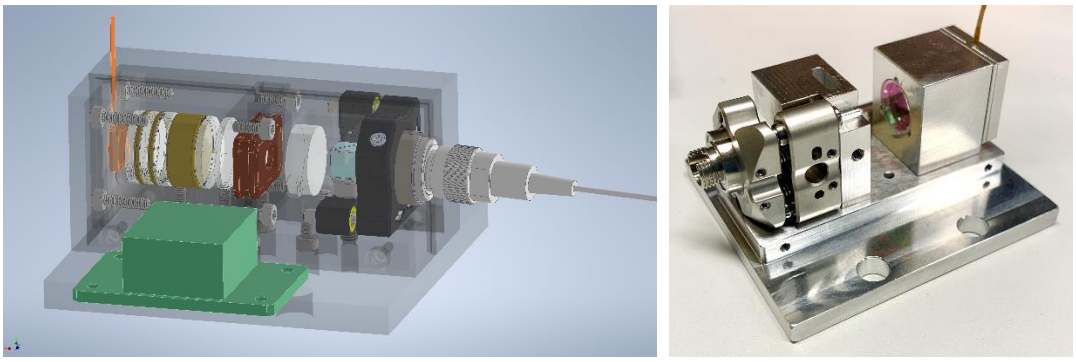


Abbildung 17: Miniaturisiertes Spektroskopiemoduls für die Rubidium-Zwei-Photonen Spektroskopie mit einer MEMS Zelle. Links: CAD Modell. Rechts: Foto des Prototypen.

Durchführung und Auswertung von Umwelttests für Gaszellen und physics packages

Zum Test von kompakten Detektoren für die Fluoreszenzdetektion von 420.3 nm bei der Zwei-Photonenspektroskopie wurde ein SiPM Detektor einem TID (Total Ionisation Dose) Test unterzogen, siehe Abbildung 18. Bei starker Bestrahlung zeigt der Detektor einen deutlichen Anstieg des Hintergrundrauschens, die in einer Satellitenmission zu erwartenden Strahlungsdosen würden allerdings nur zu einer Erhöhung des Hintergrundrauschens von 0,1 dB führen. Nach dem Strahlungstest zeigte der Detektor das gleiche Rauschverhalten wie vor dem Strahlungstest.

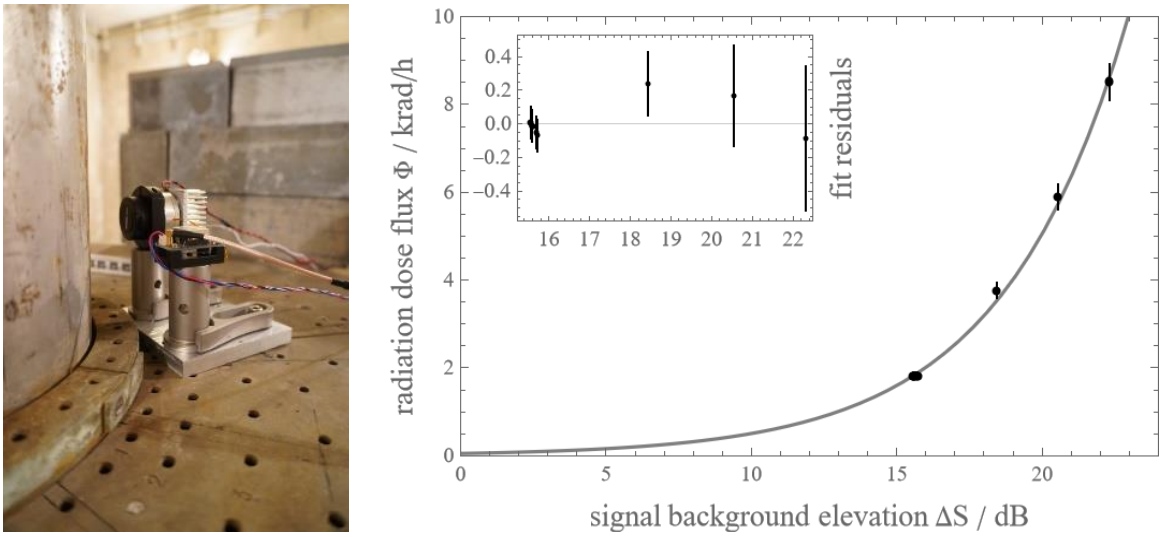


Abbildung 18: TID Strahlungstest des SiPM Detektors an einer ^{60}Co Quelle. Rechts: Photo des Detektors vor der ^{60}Co Quelle. Rechts Messergebnis zum Hintergrundrauschen des SiPM Detektors in Abhängigkeit der Strahlendosis.

AP 4: Anodisch gebondete Gaszellen mit Alkalimetall-Dispensern für die Rubidium-spektropskopie

Untersuchung und Vergleich verschiedener Bondingverfahren

Zu Beginn des Vorhabens wurden verschiedene Bondingverfahren zur Herstellung von Spektroskopiezellen aus Silizium- und Glaswafern evaluiert. Im Ergebnis versprach die Methode des anodischen Bonden die saubersten und langlebigsten MEMS Zellen. Allerdings stellt diese Methode auch hohe Anforderungen an die Qualität der Oberflächen der Silizium- und der Glaswafer und damit an die einzelnen Fertigungs- und Prozesschritte.

Als zweite Methode, die sich mit den gegebenen Mitteln realisieren lässt, wurde das eutektische Bonden (Gold-Zinn) in Betracht gezogen, welches sich auch auf rauen, unebenen Flächen anwenden lässt. Aufgrund der Reaktivität von Rubidium mit Gold und Zinn scheint dieses Verfahren nur bedingt tauglich für die Herstellung von langzeitstabilen MEMS Zellen mit Alkaliatomen.

Design und Aufbau für einer Apparatur für anodisches Bonden in Hochvakuum

Für das anodische und eutektische Bonden wurde ein kommerzieller Bonder der Abteilung Prozesstechnologie, unter der Leitung von Dr. Olaf Krüger, des Ferdinand-Braun-Instituts Berlin verwendet. Das war wie gegenüber dem ZG berichtet die vielversprechendste Methode, um die im Vorhaben gesetzten Ziele zu erreichen und den höchstmöglichen Qualitätstandards zu genügen.

Entwicklung eines Benchmarks für Prozessführung

Es wurden durch die FBH Prozesstechnologie (Dr. Andreas Thies) in Zusammenarbeit mit dem Joint Lab Integrierte Quantensensoren Prozesse zur Fertigung von MEMS Zellen definiert und getestet. Dazu gehört die Entwicklung von Masken für den Ätzprozess von Silizium Wafern, die Anwendung eines Ätzprozess zur Formung von Durchlöchern in Siliziumwafer für die Spektroskopiezellen und für die Freisetzung von atomarem Rubidium in den Spektroskopiezellen, sowie das anodische Bonden von Glasfenstern auf den Siliziumwafer zum Verschluss der Spektroskopiezellen unter Vakuum. Weiter wurde an der HU Berlin eine Anlage zur Freisetzung von atomarem Rubidium Dampf in den MEMS Spektroskopiezellen und dessen qualitativer Analyse entworfen und aufgebaut.

Entwurf der Maske

Es wurden Fotolackmasken für den Ätzprozess entworfen und hergestellt. Diese Masken werden für die Abscheidung von Dünnfilm-Maskenmaterialien auf Silizium verwendet, um gewünschte Bereiche wie Löcher und Mikrokanäle selektiv zu ätzen. Sowohl Kontakt- als auch Steppermasken wurden für verschiedene Versuche zur Optimierung des Ätzprozesses hergestellt. Ein Beispiel für ein Maskendesign-Layout ist in Abbildung 19 (a) dargestellt.

Vorformung von Si-Wafern

Als Haupttechnik für die Formung der gewünschten Geometrien (der Spektroskopiekammer und der Mikrokanäle) auf dem Silizium-Wafer der MEMS-Zelle wurde *Deep Reaction Ion Etching* (DRIE) erforscht. Es wurden mehre experimentelle Ätzversuche durchgeführt, mit dem Ziel herauszufinden, welche Art von Maske sich am besten für das Bosch-Verfahren eignet. Es wurde festgestellt, dass das Ätzen durch die gesamte Dicke des Si-Wafers mit einem einfachen dicken Polymer-Fotoresist (10 µm) aufgrund von Rissen im Photoresist und dessen leichter Zersetzung nicht möglich war, siehe Abbildung 19 (b). Mit einer zusätzlichen Al_2O_3-Hartmaske konnte der Ätzprozess durch einen Standard-Silizium-Wafer von 525 µm erfolgreich durchgeführt werden. Eine Rasterelektronenmikroskop-Aufnahme einer erfolgreich geätzten Zelle ist in Abbildung 19 (c) und Abbildung 20 zu sehen, ein Bild des gesamten Wafers ist in Abbildung 19 (d) gezeigt.

Weiter wurde der Prozess des Laserschneidens der Geometrien auf Silizium-Wafern untersucht. Obwohl diese Methode sehr einfach ist und nur wenig Aufwand, Zeit und Ressourcen erfordert, waren die Kanten teilweise rau, was zu Problemen bei folgenden Prozessen zur Fertigung der MEMS-Zellen führen könnte.

Anodisches Bonden

Es wurden Versuche zum anodischen Bonden von Glas sowohl auf lasergeschnittenen als auch auf glatten Silizium-Wafer durchgeführt. In beiden Fällen wurde eine erfolgreiche Bindung erzielt, siehe Abbildung 19 (e, f). Die Reproduzierbarkeit war bei den lasergeschnittenen Proben aufgrund der hohen Rauheit und des Vorhandenseins von Ablagerungen nicht befriedigend. Die Optimierung der Parameter, die an glatten Silizium-Wafern durchgeführt wurde, führte zu einer relativ niedrigen Bondtemperatur von 200 ºC.

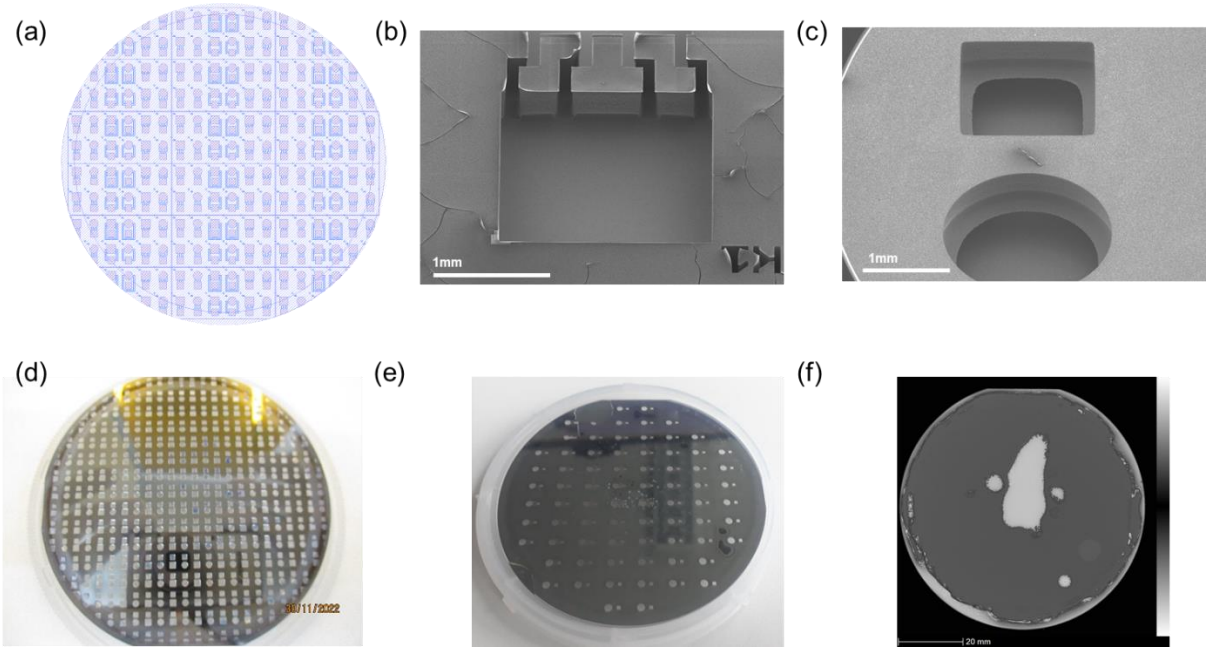


Abbildung 19: (a) Layout der Photoresistmaske. FBH Abbildung: REM-Bild eines geätzten Si-Wafers mit (b) einer dicken Polymerresistmaske und (c) einer Al2O3-Hartmaske. (d) Bild des gesamten geätzten Wafers. Versuche zum anodischen Bonden an (e) lasergeschnittener Probe und (f) glattem Si-Wafer.

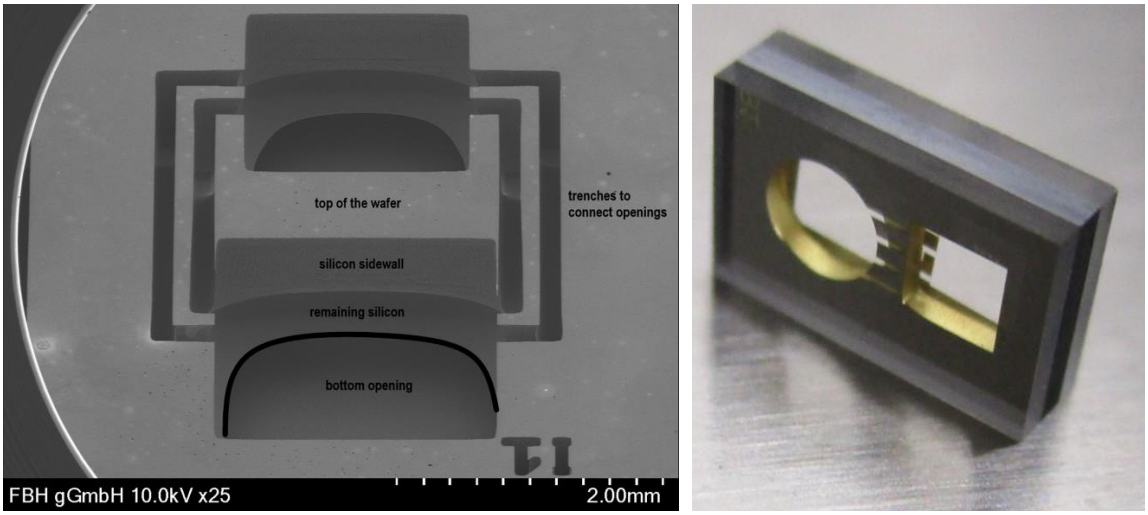


Abbildung 20: Links: Rasterelektronenmikroskop-Aufnahme einer erfolgreich geätzten Zelle bestehend aus einer Kammer für die Laserspektroskopie und einer Kammer für den Rubidiumdispenser welche über Mikrokanäle miteinander verbunden sind. Abbildung des FBH[2]. Rechts: Foto einer leeren MEMS Zelle mit einer Kammer für die Spektroskopie von Rubidiumdampf und einer Zelle für die Unterbringung einer Rubidium Dispenserpille. Die beiden Kammern sind durch Mikrokanäle miteinander verbunden, sodass das von einer Rubidiumdispenserpille freisetzte Rubidium in die Spektroskopiekammer diffundieren kann.

Anlage zur Aktivierung der MEMS Zellen.

Der für die Spektroskopie notwendige Rubidiumdampf soll in der Zelle durch Aktivierung einer, in der MEMS Zelle eingeschlossenen, Rubidium-Dispenserpille freigesetzten werden. Dazu wird die Dispenserpille mit einem starken Laserstrahl bei 1064 nm auf eine Temperatur von >600°C aufgeheizt wodurch in einer chemischen Reaktion atomarer Rubidiumdampf freigesetzt wird. Der Rubidiumdampf kann dann durch die eingeätzten Mikrokanäle in die Spektroskopiekammer der MEMS Zelle diffundieren. Der Rubidiumdampf soll dabei spektroskopisch untersucht werden. Zu diesem Zweck wurde der in Abbildung 21 dargestellt Aufbau entworfen und realisiert.

Abbildung 22 zeigt MEMS Zellen nach der Aktivierung der Rubidium Dispenserpille durch einen Laserstrahl bei 1064 nm mit verschiedenen Leistungen und Aktivierungsdauern. Nach der Freisetzung des atomaren Rubidiums in der MEMS Zelle bei der Aktivierung können die charakteristischen, in Abbildung 23 gezeigten, FMS-Spektren von ^{85}Rb und ^{87}Rb in der Spektroskopiekammer der MEMS Zelle gemessen werden.

Nach Integration der aktivierten MEMS Zellen in das in Abbildung 17 gezeigte Spektroskopiemodul konnten Zwei-Photonen-Spektren von Rubidium in den MEMS Zellen aufgenommen werden, siehe Abbildung 24.

[2] https://www.fbh-berlin.de/en/research/research-news/extended-processing-capabilities-through-silicon-substrate-etching-at-cryogenic-and-room-tempera-tures

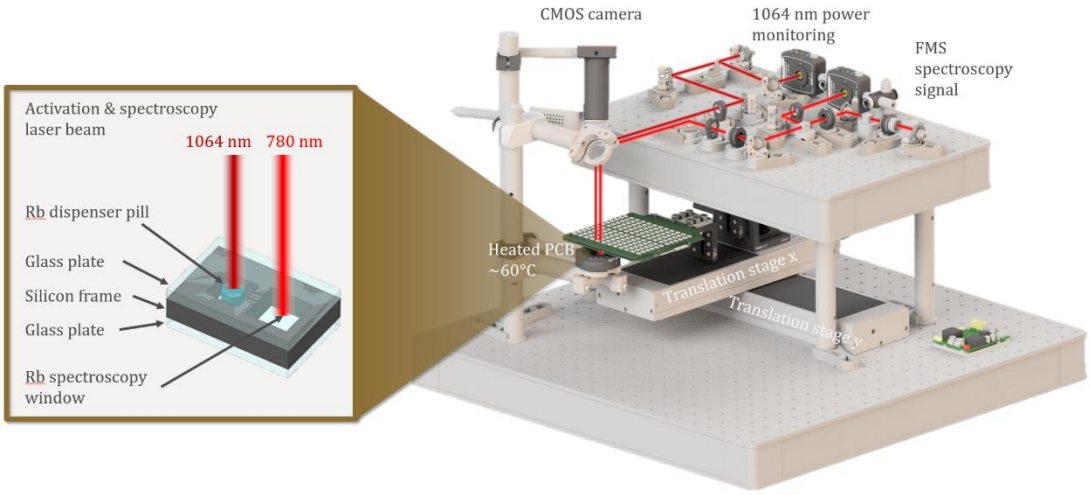


Abbildung 21: Schematische Darstellung des Aktivierungsprozess zur Freisetzung von atomaren Rubidiumdampf in der Spektroskopiezelle und 3D CAD Zeichnung des experimentellen Aufbaus. Die zu aktivierenden MEMS Zellen befinden sich in einer geheizten Aufnahme, welche auf einer motorisierten X-Y-Stage befestigt ist. Die Zellen lassen sich so einzeln in die Laserstrahlen für die Aktivierung bei 1064 nm und für die Charakterisierung der Spektren bei 780 nm (Frequenz-Modulations-Spektroskopie der D2 Linie) fahren, aktivieren und charakterisieren.

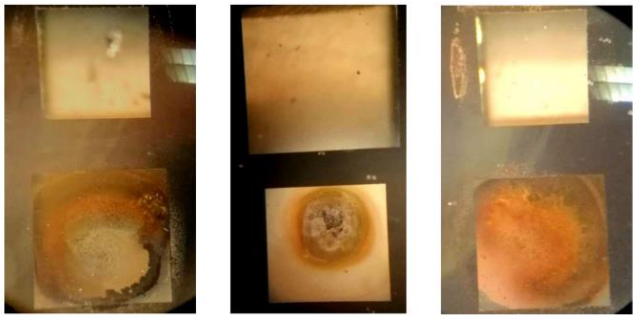


Abbildung 22: Photographien von MEMS Zellen in denen eine Rubidium Dispenser-Pille in der unteren Kammer mit einem Laserstrahl bei 1064 nm aktiviert wurden. Links: 4.5 W für 5 min. Mitte: 3 W für 1 min. Rechts: 3 W für 6 min.

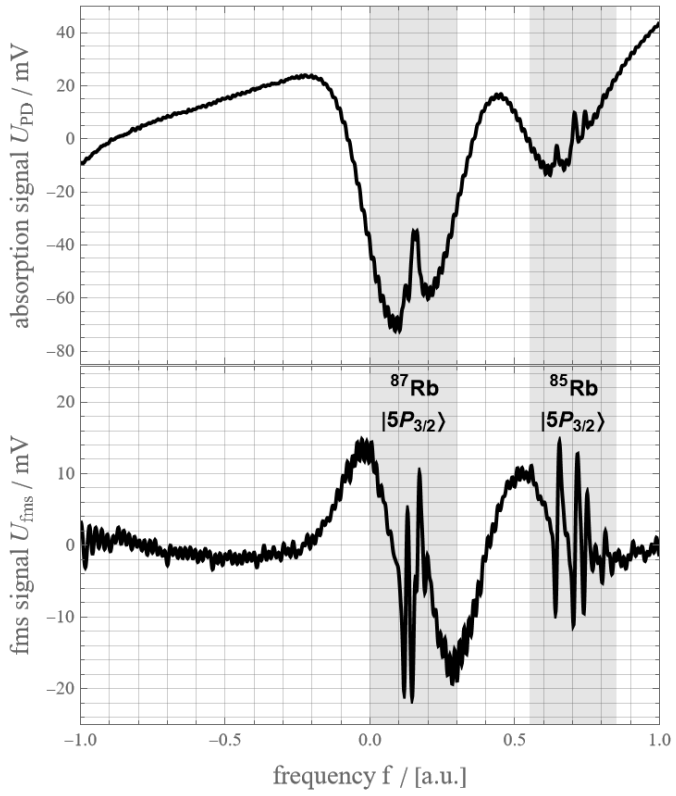


Abbildung 23: Spektren der D2 Linie von ^{85}Rb und ^{87}Rb bei 780 nm gemessen in einer MEMS Zelle. Oben: Absorptionssignal mit dem den Lamb-Dips im Dopplerprofil. Unten: Doppler-freie Frequenz-Modulations-Spektroskopie-signale der D2 Linie.

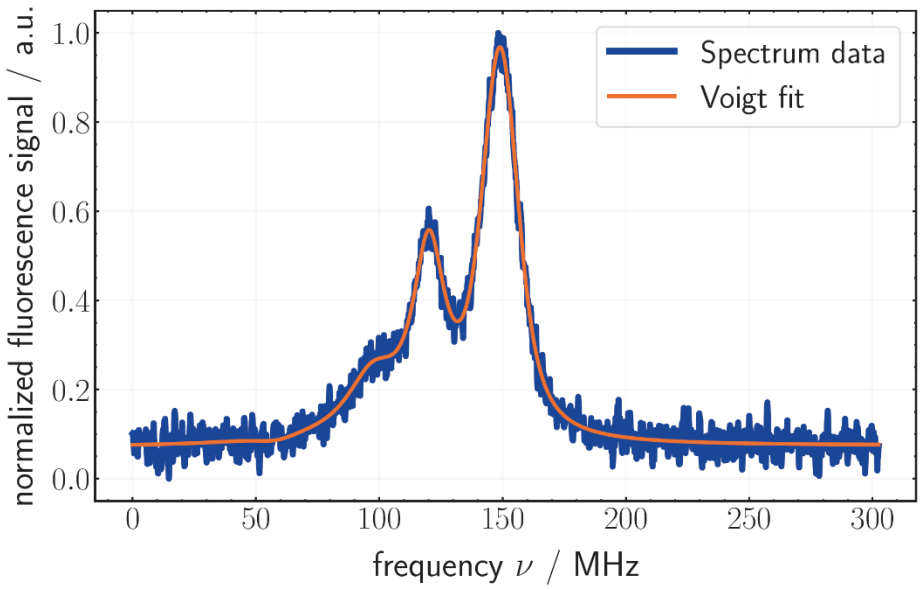


Abbildung 24: Zwei-Photonen Spektrum von Rubidium, aufgenommen mit einer in diesem Vorhaben gefertigten MEMS Spektroskopiezelle.

HUMBOLDT-UNIVERSITÄT ZU BERLIN

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. Für Details sei hier auf den ZN verwiesen.

3. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

In diesem Vorhaben wurden Schlüsselkomponenten für die Realisierung einer optischen Atomuhr auf Basis der Zwei-Photonenspektroskopie von Rubidium in MEMS Zellen mit Hinblick auf Anwendungen im Weltraum entwickelt und erprobt. Atomuhren spielen eine zentrale Rolle in der Raumfahrt, beispielweise in der satellitengestützten Navigation (GPS, Galileo). Optische Atomuhren haben das Potential die Genauigkeit der aktuell im Raumfahrtsegment verwendeten RF-Atomuhren um mehrerer Größenordnungen zu übertreffen. Der steigende Anspruch an Navigationssysteme für die Erde, aber auch Raumfahrtmissionen im weitern Sonnensystem erfordern die Weiterentwicklung weltraumtauglicher, hochstabiler Atomuhren.

In diesem Teilvorhaben wurden folgende Ziele erreicht:

- Aufbau und Charakterisierung einer kompakten, fasergekoppelten optischen Zwei-Photonen Frequenzreferenz mit geringem Leistungsverbrauch.
- Aufbau eines Laborsystems zur Charakterisierung der Frequenzstabilität von optischen Zwei-Photonen Frequenzreferenzen.
- Fertigung von MEMS Zellen für die Laserspektroskopie von Rubidium.
- Zwei-Photonen Spektroskopie von Rubidium in Glas- und MEMS-Zellen.
- Design und Aufbau von kompakten Spektroskopiemodulen (*physics packages*).
- Frequenzstabilisierung von Lasern mittels Zwei-Photonen-Spektroskopie von Rubidium mit einer Frequenzinstabilität von $2\times10^{-13}/\sqrt{\tau}$ für Mittelungszeiten τ von 1 s bis 1000 s

Diese Ergebnisse bilden die Grundlage für weiterführende Arbeiten zur Verbesserung der Uhrenstabilität sowie der Miniaturisierung der Spektroskopiemodule unter Verwendung von MEMS Zellen mit einhergehender Reduktion des SWaP (Volumen-, Masse- und Leistungs-) Bedarfs.

Aus Sicht des ZE waren die geleisteten Arbeiten ohne Ausnahme notwendig und der Aufwand angemessen.

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. Es konnten mehrere Schlüsselkomponenten zur Realisierung einer hochstabilen Frequenzreferenz basierend auf der Zwei-Photonen Spektroskopie mit MEMS Zellen aufgebaut und getestet werden, welche als Grundlage für die Integration einer hochkompakten und Leistungseffizienten optischen Uhr genutzt werden können.

Die im Projekt gesammelten wissenschaftlich-technischen Ergebnisse und Erfahrung bilden die Grundlage für die Entwicklung einer optische Zwei-Photonen Uhr als Nutzlast (CRONOS) für eine Kleinsatellitenmission (QUEEN) zur In-Orbit Demonstration einer optischen Uhr im niedrigen Erdorbit. In Bezug auf optische Uhren ermöglichen die erzielten Ergebnisse so

den Antragstellern die Technologiereife von hochstabilen Diodenlasersystemen, Frequenzkämmen und gaszellenbasierten *physics packages* für den künftigen Einsatz auf modernen Satellitensystemen in einem Vorhaben mit hoher (inter-) nationaler Sichtbarkeit zu demonstrieren.

Im Allgemeinen stärken die Ergebnisse die Rolle der beteiligten Institutionen und der Industrie dadurch auch auf internationaler Ebene, z.B. bei der wettbewerblichen Antragstellung zu Vorhaben der NASA, der ESA, oder in Kooperationen mit Partnern in Asien.

Das technologische Anwendungspotential von robusten, miniaturisierten gaszellenbasierten *physics packages* geht über das in optischen Uhren hinaus. So lassen sich die im Vorhaben erzielten Ergebnisse zur Fertigung von MEMS Zellen beispielweise für die Entwicklung von atombasierten Magnetometern und Gyroskopen nutzen.

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

Folgende Fortschritte sind auf dem Gebiet des Vorhabens bekannt geworden:

- Es wurden absolute Frequenzmessungen der 5S→6P Übergansfrequenzen bei 420.3 nm durchgeführt:
    - C. Glaser, F. Karlewski, J. Kluge, J. Grimmel, M. Kaiser, A. Günther, H. Hattermann, M. Krutzik, and J. Fortágh, „Absolute frequency measurement of rubidium 5𝑆−6𝑃 transitions“ Phys. Rev. A 102, 012804 – Published 7 July 2020
- Es wurde eine miniaturisierte optische Frequenzreferenz auf Basis von Zwei-Photonen-Spektroskopie an Rubidium in MEMS Zellen entwickelt.
    - Maurice, V., Newman, Z. L., Dickerson, S., Rivers, M., Hsiao, J., Greene, P., Johnson, C. (2020). Miniaturized optical frequency reference for next-generation portable optical clocks. Optics Express, 28(17), 24708.
    - Newman, Z. L., Maurice, V., Fredrick, C., Fortier, T., Leopardi, H., Hollberg, L., … Hummon, M. T. (2021). High-performance, compact optical standard. Optics Letters, 46(18), 4702.
- Es wurde eine neue Methode zur Befüllung von MEMS Zellen mit Alkaliatome entwickelt, welche es erlaubt die Spektroskopiezelle von der Dispenserkammer zu trennen.
    - Bopp, D. G., Maurice, V. M., & Kitching, J. E. (2021). Wafer-level fabrication of alkali vapor cells using in-situ atomic deposition. JPhys Photonics, 3(1), 15002.
- Es wurde eine alternative Technik für den hermetischen Verschluss von, mit Alkaliatomen befülle, MEMS Zellen entwickelt
    - Karlen, S., Haesler, J., Overstolz, T., Bergonzi, G., & Lecomte, S. (2020). Sealing of MEMS Atomic Vapor Cells Using Cu-Cu Thermocompression Bonding. Journal of Microelectromechanical Systems, 29(1), 95–99.
- Eine australische Firma (QuantX Labs) bietet eine kompakte optische Rubidium Atomuhr an.
- Aus arbeiten am *National Institute of Standards and Technology* der *United States of America* ist die Firma *Vapor Cell Technologies* hervorgegangen.
- Im Jahr 2021 wurde bekannt, dass die Firma Vescent Photonics, LLC ein Projekt über fünf Jahre mit einem Budget von $16.2 M zur Entwicklung eine optischen Rubidium

Atomuhr für Feldanwendungen mit TRL 6 und einer Frequenzinstabilität von besser als $3\times10^{-14}/\sqrt{\tau}$ gestartet hat.

6. Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen des Ergebnisses

Folgende Konferenzbeiträge wurden präsentiert:

- DPG Frühjahrstagung 2022, Erlangen: Julien Kluge, „Rubidium vapor-cell frequency reference based on 5S to 5D two-photon transition for space applications“
- DPG Frühjahrstagung 2022, Erlangen: Daniel Kohl, “Characterization of a Laser System for a Rubidium Two Photon Frequency Reference”
- DPG Frühjahrstagung 2023, Hannover: Daniel Kohl, “Development of a Miniaturized Two-photon Frequency Reference Towards Application on a Small Satellite Mission”
- DPG Frühjahrstagung 2023, Hannover: Julien Kluge, “Towards a Spaceborne Two-Photon Rubidium Frequency Reference”
- DPG Frühjahrstagung 2023, Hannover: Moritz Eisebitt, “Development of Two Laboratory Two-Photon Frequency References”
- European Quantum Technologies Conference 2023, Hannover: Daniel Kohl, “Towards a Spaceborne Two-Photon Rubidium Frequency Reference”
- DPG Frühjahrstagung 2024, Freiburg: Moritz Eisebitt, “Two-Photon Frequency References for Optical Clocks and Hyperfine Spectroscopy”
- DPG Frühjahrstagung 2024, Freiburg: Janice Wollenberg, “Implementation of a laser system for alkali vapor MEMS cell activation”
- DPG Frühjahrstagung 2024, Freiburg: Daniel Kohl, „Towards a Miniaturized Spaceborne Rubidium Two-Photon Frequency Reference“

Folgende Abschlussarbeiten wurden abgeschlossen:

- Bachelorarbeit: Daniel Kohl „Characterization of a Diode Laser System for a Rubidium Two-Photon Frequency Reference“ (17.12.2021)
- Bachelorarbeit: Moritz Eisebitt „Towards a 420 nm Frequency Reference for Space applications“ (16.10.2020)
- Masterarbeit: Moritz Eisebitt „Characterisation of a Rubidium Two-Photon Frequency Reference and High Precision Spectroscopy of the 5□1/2 to 5□5/2 Hyperfine Structure“ (15.08.2023)

Folgende Manuskripte befinden sich in Bearbeitung:

- Doktorarbeit: Julien Kluge
- Bachelorarbeit: Janice Wollenberg
- Masterarbeit: Daniel Kohl