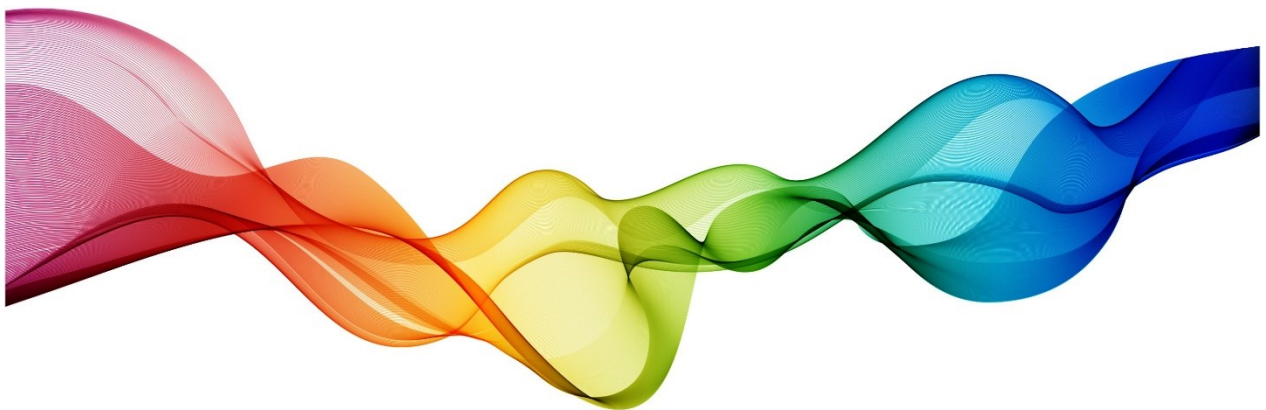

OPUS-II: Optische Uhren unter Schwerelosigkeit

Schlussbericht

28.06.2024

DLR-RPT-MSG-OPUS-10004



Projekt und Dokumenten Angaben

Projektinformationen

<i>Vorhabenbezeichnung</i>	OPUS-II: Optische Uhren unter Schwerelosigkeit
<i>Zuwendungsempfänger</i>	Menlo Systems GmbH Bunsenstraße 5 D-82152 Martinsried
<i>Förderkennzeichen</i>	50WM2051
<i>Laufzeit des Vorhabens</i>	01.08.2020 - 31.07.2023
<i>Projektleiter</i>	Ronald Holzwarth

Dokumentinformationen

<i>Titel</i>	Schlussbericht
<i>Dokumenten ID</i>	DLR-RPT-MSG-OPUS-10004
<i>Ausgabe</i>	2
<i>Status</i>	Final
<i>Veröffentlichungsdatum</i>	28.06.2024
<i>Vertraulichkeitsstufe</i>	Zur Veröffentlichung freigegeben. Alle Inhalte sind urheberrechtlich geschützt.
<i>Schlagwörter</i>	Click or tap here to enter text.

Autoren

<i>Name</i>	<i>Organisation</i>	<i>Kontakt</i>
Deepak Pandey	Menlo Systems GmbH	Telephone: +49 89 189 166-0
Frederik Böhle	Menlo Systems GmbH	Telephone: +49 89 189 166-0

Dokumentenfreigabe

	<i>Name</i>	<i>Organisation</i>	<i>Datum</i>
<i>Angefertigt von</i>	Deepak Pandey Frederik Böhle	Menlo Systems GmbH	28.06.2024
<i>Überprüft von</i>	Matthias Lezius	Menlo Systems GmbH	28.06.2024
<i>Freigegeben von</i>	Marc Fischer	Menlo Systems GmbH	28.06.2024

Änderungsverzeichnis

<i>Ausgabe</i>	<i>Date</i>	<i>Autor</i>	<i>Änderungen</i>
1	15.03.2024	D. Pandey	Initiale Version
2	28.06.2024	F. Böhle	For public release

Inhaltsverzeichnis

Projekt und Dokumenten Angaben.....	2
Projektinformationen.....	2
Dokumentinformationen	2
Autoren	2
Dokumentenfreigabe	2
Änderungsverzeichnis	2
Inhaltsverzeichnis.....	3
1. Kurzdarstellung.....	5
1.1. Aufgabenstellung.....	5
1.2. Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde.....	6
1.3. Planung und Ablauf des Vorhabens.....	6
1.4. Wissenschaftlicher und technischer Stand zur Zeit der Antragsstellung	7
2. Eingehende Darstellung	11
2.1. Verwendung der Zuwendung und erzielte Ergebnisse.....	11
2.1.2. Beschleunigungsempfindlichkeit.....	15
2.1.3. Zusammenfassung und Ausblick	16
2.2. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit	16
2.3. Voraussichtlicher Nutzen.....	17
2.4. Bekannt gewordener Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens	17
2.5. Erfolgte und geplanten Veröffentlichungen.....	17
3. Literaturverzeichnis.....	18

Abkürzungen und Akronyme

Tabelle 1: Abkürzungsverzeichnis

Akronym	Definition
<i>AP</i>	Arbeitspaket
<i>BDU</i>	Beat-Detection-Unit (dt. Schwebungs-Detektions-Einheit)
<i>CEO</i>	Carrier-Envelope Offset (dt. Träger-Einhüllenden-Phase)
<i>CW</i>	Continuous Wave (dt. Dauerstrich)
<i>DLR</i>	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V.
<i>EPFL</i>	École Polytechnique Fédérale de Lausanne
<i>F&E</i>	Forschung und Entwicklung
<i>FBG</i>	Faser-Bragg-Gitter
<i>FBH</i>	Ferdinand-Braun-Institut
<i>FMS</i>	Frequenzmodulierte Spektroskopie
<i>GNSS</i>	Global Navigation Satellite System (dt. globales Satellitennavigationssystem)
<i>GPS</i>	Global Positioning System (dt. globales Positionsbestimmungssystem)
<i>HNLF</i>	Highly Nonlinear Fiber (dt. stark nichtlineare Faser)
<i>HTCC</i>	High Temperature Cofired Ceramics (dt. Hochtemperatur-Mehrlagenkeramik)
<i>HUB</i>	Humboldt-Universität zu Berlin
<i>LBX</i>	Lockbox
<i>LIDAR</i>	Light Detection and Ranging
<i>LTCC</i>	Low Temperature Cofired Ceramics (dt. Niedertemperatur-Einbrand-Keramiken)
<i>MEN</i>	Menlo Systems GmbH
<i>MLI</i>	Multilayer Insulation
<i>NIST</i>	National Institute of Standards and Technology
<i>NPL</i>	National Physical Laboratory
<i>PCB</i>	Printed Circuit Board (dt. Leiterplatte)
<i>PID</i>	Proportional-Integral-Differential
<i>PTB</i>	Physikalisch-Technische Bundesanstalt
<i>RAFS</i>	Rubidium Atomic Frequency Standard (dt. Rubidium-Atomuhr)
<i>RF</i>	Radio-Frequenz
<i>SHG</i>	Second-Harmonic Generation (dt. Frequenzverdopplung)
<i>SI</i>	Système International d'Unités (dt. Internationales Einheitensystem)
<i>TRP</i>	Temperatur Referenz Punkt
<i>UV</i>	Ultraviolettstrahlung

1. Kurzdarstellung

Hochstabile und genaue optische Frequenzreferenzen bieten großes Potential für bestehende und neuartige Anwendungen sowohl auf der Erde als auch im Weltraum. Sie verbessern die allgemeine Genauigkeit, mit den Frequenzen und damit abgeleitete Größen wie Zeit, Entfernung und Wellenlänge gemessen werden können. Bei einem Global Navigation Satellite System (GNSS) wie Galileo oder NAVSTAR GPS kann eine optische Uhr die Präzision und Ausfallsicherheit erhöhen. Darüber hinaus können optische Referenzen für eine Reihe von wissenschaftlichen Missionen, wie z.B. den Test der allgemeinen Relativitätstheorie, die Detektion von Gravitationswellen, hochgenaue Spektroskopie und weitere Anwendungen in der Quantenphysik eingesetzt werden.

OPUS erforscht die zentralen Bestandteile einer optischen Uhr. Die optische Spektroskopie stellt dabei das Schwungrad der Uhr dar, und der Frequenzkamm fungiert quasi als Uhrwerk. In OPUS-I wurden die Grundlagen für eine Frequenzreferenz auf Basis von Atomstrahlen und Frequenzkämmen als optische Uhren für den Einsatz auf einer Höhenforschungsrakete gelegt. Optische Uhren basierend auf dieser Technologie konnten bereits eine relative Frequenzstabilität zeigen, die um eine Größenordnung besser ist als die von Uhren basierend auf Gaszellen. Trotz des komplexeren Aufbaus besteht das Potential, mittel- bis langfristig kompakt, robust und zuverlässig genug zu werden, um einen Weltraumeinsatz zu ermöglichen.

Ziel des Vorhabens von Menlo in OPUS-II war die Entwicklung eines robusten und kompakten, schmalbandigen Lasersystems basierend auf einer Fabry-Perot-Cavity, also einer optischen Referenz, um die Kurzzeitstabilität der Uhr zu gewährleisten. Im Anschluss sollten die einzelnen Module der optischen Uhr vom Verbund in ein Gesamtsystem integriert werden.

1.1. Aufgabenstellung

Menlo Systems untersuchte und entwickelte zusammen mit der Humboldt-Universität zu Berlin und dem Ferdinand-Braun-Institut im Verbundprojekt OPUS-II die technische Grundlage für eine hochstabile Frequenzreferenz auf Basis von Atomstrahlspektroskopie und Frequenzkamm als optische Uhr für den Einsatz auf Höhenforschungsraketen.

Menlo Systems sollte hierfür ein kompaktes und robustes Optisches Referenz System (ORS), genannt Mini-Cavity, mit sehr hoher Kurzzeitstabilität entwickeln. Als optische Referenz wird die absolute Frequenz eines CW-Lasers bezeichnet. Das System besteht aus einem optischen Resonator, auf den dieser CW-Laser frequenzstabilisiert wird. Der optische Resonator bestimmt maßgeblich die Stabilität dieser optischen Referenz durch seine Längenstabilität.

Im Vorhaben sollten zunächst die verschiedenen Technologien bewertet werden. Je nach Anforderungen könnte ein optischer Resonator aus einer massiven ULE (oder Quarzglas) Substrat-Cavity mit verspiegelten Endfacetten oder einer verkleinerten Cavity, basierend auf den üblichen ULE-Spacern im Vakuum mit optisch kontaktierten Endspiegeln, gebaut werden. Hierbei sollte unter anderem geprüft werden, ob eine kontaktierte Cavity die Beschleunigungen während des Raketenflugs aushalten kann.

Während des Starts einer Höhenforschungsrakete treten starke Beschleunigungen und Vibrationen auf. Anschließend muss das System innerhalb weniger Minuten einsatzbereit sein und die Stabilität der Uhr demonstrieren. Der Einfluss der kurzen, aber starken Beschleunigungen auf die Driftgeschwindigkeit der Cavity wurde bisher nicht untersucht und sollte daher besonders berücksichtigt werden. Es ist möglich, dass sich zu Beginn der Schwerelosigkeit eine erhöhte Driftgeschwindigkeit bemerkbar macht. Zwar bietet der Flug auf einer Texas-Mission die einmalige Gelegenheit zur Demonstration der Technologiereife, die Missionsbedingungen sind jedoch nicht typisch für das künftige Einsatzfeld. In einem zukünftigen Missionszenario, beispielsweise als optische Uhr auf Satelliten, würde die Uhr erst lange nach dem Start

kommissioniert, das heißt angeschaltet werden. Daher wäre dieser Drifteffekt nicht missionskritisch, und benötigt keine dedizierte Unterdrückung des Phänomens.

Als mögliche Alternative zu Cavity-stabilisierten Systemen sollte auch eine Stabilisierung über ein faserbasiertes Mach-Zehnder-Interferometer mit einer Glasfaserspule in einem Interferometerarm geprüft werden. Diese Lösung hätte große Vorteile beim SWaP-Budget (Size, Weight, and Power).

Kritisch für die Performance des Referenzlasers ist vor allem eine niedrige Vibrations sensitivität der Mini-Cavity. Deshalb musste zuerst eine passende Substratform ausgewählt bzw. neu designt werden.

1.2. Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Menlo Systems verfolgte bereits kurz nach seiner Ausgründung das Ziel, die Frequenzkamm-Technologie auch dem Einsatz im Weltraum zur Verfügung zu stellen. In einer Reihe von öffentlich geförderten Projekten (FOKAL, IRASSI, FOKUS, FOKUS II, OPUS I, ROSC) wurde geforscht, um sukzessive die Technologiereife zu erhöhen. Zeitlich gliederte sich das Projekt OPUS I und das Anschlussvorhaben OPUS-II für Menlo Systems im Anschluss an FOKUS II (50WM1343) an. In diesem vorhergehenden Projekt wurden bereits Frequenzkämme auf Höhenforschungsraketen geflogen und dabei optische Referenzen vermessen, allerdings basierend auf einer Jod-Molekülspektroskopie.

Das unter OPUS-II beantragte Projekt wurde im Verbund mit der Humboldt-Universität zu Berlin und dem Ferdinand-Braun-Institut durchgeführt, um auf diese Weise sowohl die Kompetenzen in der Bereitstellung der optischen Referenzen als auch des Frequenzkamms zu bündeln. Menlo Systems übernahm darüber hinaus die Funktion des Verbundkoordinators.

Die in solchen Forschungsvorhaben erzielten Ergebnisse liefern dabei auch regelmäßig wertvolle Beiträge zu den Menlo Standardprodukten, da die Erhöhung der Technologiereife immer auch mit einer verbesserten Robustheit verbunden ist. Dadurch werden dann auch neuartige Anwendungen auf der Erde in harschen Umgebungen möglich.

1.3. Planung und Ablauf des Vorhabens

Die Arbeiten in OPUS-II wurden thematisch getrennt und in 3 Arbeitspaketbereiche eingeteilt, wie in Abbildung 1 gezeigt. Die getrennten Arbeitsbereiche konnten parallel begonnen werden, da zunächst für die ersten Arbeiten keine Abhängigkeiten zwischen den Bereichen bestand. Erstmals befasste sich Menlo Systems mit dem Aufbau einer Cavity für Weltraumanwendungen, welcher sich in die Arbeitspakete 2101, 3101, 4101 und 5101 gliederte.

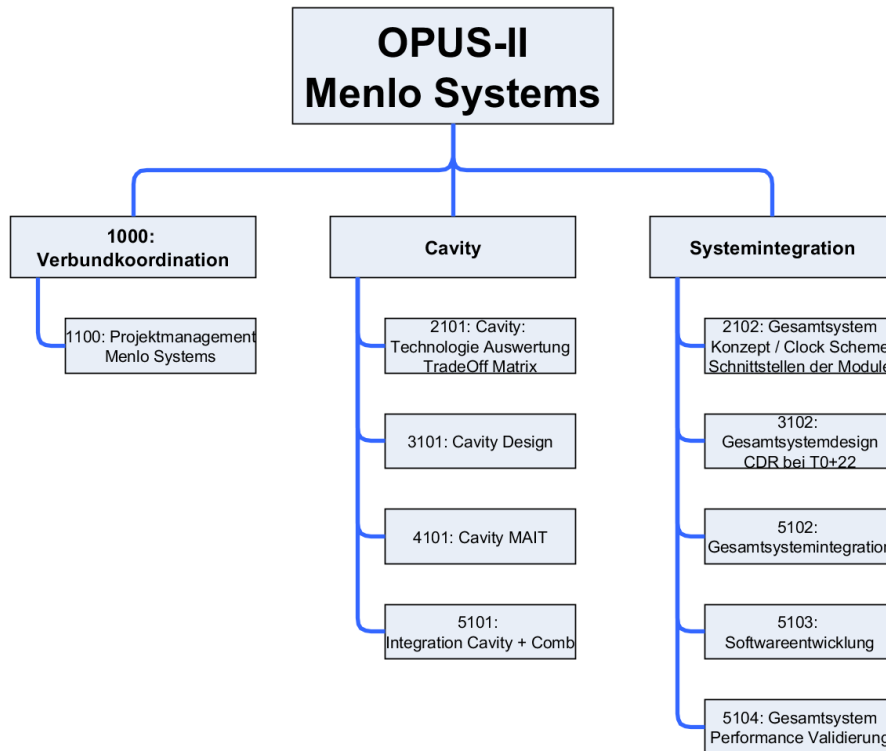


Abbildung 1: Strukturplan des Vorhabens OPUS-II.

1.4. Wissenschaftlicher und technischer Stand zur Zeit der Antragsstellung

Strontium-basierte optische Uhren zählen derzeit zu den besten Frequenzstandards der Welt. Sie werden an unterschiedlichen nationalen Metrologie-Instituten wie PTB, NPL und NIST mit großem Aufwand experimentell untersucht. In OPUS-I wurden vom Verbund bereits die Grundlagen einer optischen Uhr basieren auf die höchstauflösende Spektroskopie an Strontium-Atome gelegt. Nicht Teil davon war jedoch ein hochstabile optische Referenzsysteme mit geringer Linienbreite, welches auch ein wesentlicher Grundbaustein von optischen Zeit- und Frequenzstandards [i] ist und für höchstauflösende Spektroskopie an Atomen oder Ionen benötigt wird. Im Zusammenspiel mit der Frequenzkammtechnologie [ii] dienen sie u.a. als optischer Lokaloszillator für die Synthese hochstabiler Mikrowellensignale [iii]. Sie finden Anwendung als Mastersystem zur Charakterisierung und Entwicklung rauscharmer Lasersysteme und sind ein unverzichtbarer Bestandteil bei der Verteilung optischer Frequenzen über Glasfasernetze [iv].

Der rasante Fortschritt in diesen Bereichen hat auch die Anforderungen an resonatorstabilisierte Laser-Referenzsysteme sukzessive erhöht und zu verstärkten Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten auf diesem Gebiet geführt. Die hierbei eingesetzten Technologien werden im Folgenden kurz erläutert.

Das Herzstück der optischen Referenz ist ein Fabry-Perot-Resonator. Die Frequenz eines CW-Lasers wird mittels der Pound-Drever-Hall (PDH) Technik [v] auf eine Eigenfrequenz des Resonators stabilisiert. Treten keine weiteren Störgrößen im Regelkreis auf, folgt die Laserfrequenz stets der Eigenfrequenz des Resonators. Seine Längenstabilität bestimmt damit unmittelbar die erreichbare Frequenzstabilität und Linienbreite des angekoppelten Lasers. Die erforderliche Längenstabilität unterhalb von 10^{-16} m bei ‚state of the art‘ Systemen kann nur durch bestmögliche Entkopplung des Resonators von äußeren Umwelteinflüssen und Auswahl geeigneter Resonatormaterialien und -geometrien erreicht werden.

Zur Minimierung thermischer Längenänderungen sind gängige Resonatoren aus Ultra-Low-Expansion Glas (ULE) gefertigt. Darüber hinaus ist eine Temperaturstabilität im Bereich weniger Millikelvin erforderlich,

- Zur Veröffentlichung freigegeben. Alle Inhalte sind urheberrechtlich geschützt. -

werden, kann die Frequenz jeder einzelnen Zinke (mit einer ganzzahligen Modenzahl n) des Frequenzkammes bestimmt werden: Die Frequenz der Zinke mit der Modenzahl n ist gegeben durch $f_n = n \cdot f_R + f_0$. Der Vergleich einer optischen Frequenz mit der nächstliegenden Zinke des Frequenzkammes erfolgt über eine Schwebungsmessung. Alle zu messenden Frequenzen liegen im RF-Bereich und können mit RF-Standardelektronik ausgewertet werden.

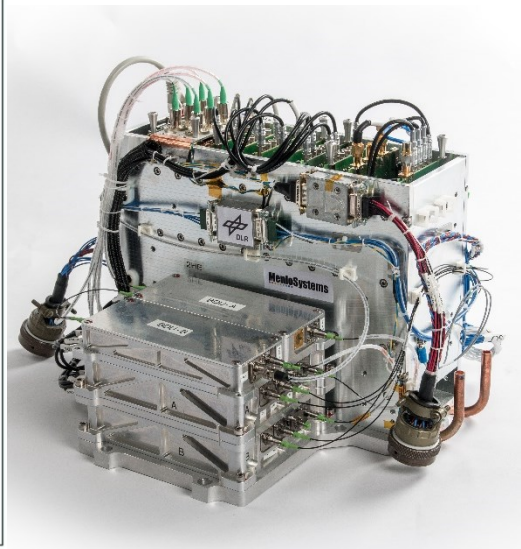
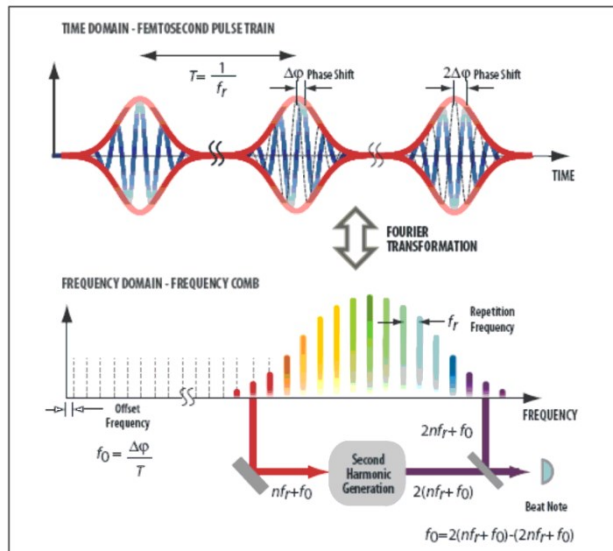


Abbildung 2: Schema des Frequenzkammes und Abbildung des in FOKUS 2 entwickelten flugtauglichen Doppelkamm-Systems.

Menlo hat bereits in verschiedenen Förderprojekten raketentaugliche Frequenzkämme mit dem langfristigen Ziel von Weltraumanwendungen entwickelt. In den Jahren 1997 und 1998 fanden die Gründer der Firma Menlo Systems, damals am Max-Planck-Institut für Quantenoptik, heraus, dass ein kommerzieller modengekoppelter Ultrakurzpuls laser einen hinreichend stabilen Frequenzkamm erzeugt, bei dem die „Zinken“ mittels Schwebungssignalen mit Dauerstrichlasern untersucht werden können. In einem weiteren Experiment wurde untersucht, ob die Moden einen gleichmäßigen Abstand aufweisen. Nachdem auch diese Frage auf dem Niveau von etwa 10^{-18} mit ja beantwortet werden konnte, war der optische Frequenzkamm geboren und in rascher Folge kamen neue Forschergruppen hinzu, die die Frequenzkämme untersuchten und einsetzten. Dieser Trend hält bis heute an. Zum Beispiel wurde der Kamm erstmals zu Messungen eines Frequenzabstandes zur Messung der Cs-D1-Linie verwendet und kurze Zeit später wurde am MPQ die erste absolute optische Frequenzmessung mit einem Frequenzkamm gezeigt, hier am 1S-2S-Übergang in atomarem Wasserstoff. Ausgehend von der Erfindung des Kamms durch die Gründer wurde im Sommer 2001 die Firma Menlo Systems GmbH gegründet, mit dem Ziel die Frequenzkammtechnologie zu kommerzialisieren. Seitdem wurde in enger Kooperation mit Forschungsinstituten die Frequenzkammtechnologie immer weiter ausgebaut und verbessert. In jüngster Zeit wurden besonders rauscharme Frequenzkämme entwickelt, die völlig ohne motorisierte Aktoren auskommen. Diese sogenannten ultra-low noise Kämme konnten zusammen mit den besten Uhren der Welt in Japan und USA eine hervorragende Funktion demonstrieren, bei der die Umsetzung von optischen Frequenzen in Radiofrequenzen mit einer Phasengenauigkeit von Zeptosekunden erfolgt ^{xiv}.

Die Firma Menlo Systems entwickelt und produziert als mittelständisches Technologie-Unternehmen innovative Lösungen zur Messung der Frequenz optischer Strahlung im sichtbaren und nahinfraroten Spektralbereich. Menlo Systems ist Weltmarktführer auf dem Gebiet optischer Femtosekunden-Frequenzkämme und verfügt über weitreichende Erfahrungen und wichtige Patente auf dem Gebiet der Frequenzkamm-Metrologie und dem Einsatz neuer nichtlinearer Materialien wie Mikrostrukturfasern. Mit

- Zur Veröffentlichung freigegeben. Alle Inhalte sind urheberrechtlich geschützt. -



dem ORS1500 (1542 nm) konnte Menlo Systems eines der ersten kommerziellen resonatorstabilisierten Lasersysteme am Markt anbieten. Mittlerweile bietet Menlo Systems auch resonatorstabilisierte Lasersysteme (basierend auf Diodenlasern) bei diversen Wellenlängen zwischen 400 - 1100 nm an. Menlo Systems hat eine langjährige Erfahrung auf dem Gebiet der Systemintegration von komplexen optoelektronischen Aufbauten für Forschungs- und Entwicklungsprojekte.

Ab 2009 wurde mit dem DLR-Vorhaben FOKUS ein Frequenzkamm für eine μ -g-Raketenmission (TEXUS-Programm) entwickelt. Der FOKUS-Kamm wurde mittlerweile zweimal auf einer Forschungsrakete geflogen und hat dabei ohne Probleme funktioniert und wissenschaftliche Daten generiert. Die Ergebnisse wurden 2016 publiziert [xv] und stießen auf hohes Interesse von Wissenschaftlern der Space-Community.

Danach wurde im Rahmen von FOKUS 2 ein Doppelkamm entwickelt, der 2018 erfolgreich auf der Mission TEXUS 54 geflogen wurde und eine Jod-Spektroskopie der Humboldt-Universität Berlin untersuchte. Mit diesen Projekten konnte viel Erfahrung im Bereich der Systementwicklung für Höhenforschungsraketen gewonnen werden [xvi].

2. Eingehende Darstellung

2.1. Verwendung der Zuwendung und erzielte Ergebnisse

Optische Resonatoren sind eines der stabilsten Frequenzreferenzsysteme, die für die kurzfristige Frequenzreferenzierung verwendet werden. Die Frequenzstabilität eines Lasers, der auf die Resonanzfrequenz eines optischen Resonators abgestimmt ist, hängt ausschließlich von der Längenänderung des Resonators ab ($\frac{\Delta L}{L} = \frac{\Delta \nu}{\nu}$). Daher ist die Entwicklung eines optischen Resonators mit der höchstmöglichen Längenstabilität gegenüber externen Störungen wie Temperatur, Druck und Beschleunigung eine der Hauptaufgaben bei der Entwicklung eines optischen Referenzsystems.

Beim OPUS-2-Experiment liegt der Schwerpunkt auf einem sehr kompakten optischen Resonator, der ohne ein Ultrahochvakuumssystem betrieben werden kann. Bei der ursprünglichen Planung des Systems wurden zwei verschiedene Ansätze in Betracht gezogen. Der erste ist ein monolithischer Glasresonator und der zweite ein optisches Interferometer auf Basis einer Faser-Delay-Line. In den folgenden Abschnitten wird zuerst eine kurze Beschreibung des monolithischen Glasresonators gegeben. Auf den Faser-Delay-Line-Ansatz wird in Abschnitt 2.1.2.1 eingegangen.

In den Arbeiten wurde ein kompaktes optisches Resonator-Referenzsystem aufgebaut. Die Optik zur Einkopplung des Lichts in den Resonator wurde in einem kompakten, fasergekoppelten optischen System integriert. Insgesamt haben wir in diesem Teil des Arbeitspakets ein optisches Referenzsystem entwickelt, das ohne Vakuum arbeiten kann und eine Frequenzstabilität von etwa $1 \cdot 10^{-13}$ bis $3 \cdot 10^{-13}$ für eine Integrationszeit zwischen 1-100 ms erreichen kann, wobei einige kHz lineare Drift entfernt werden.

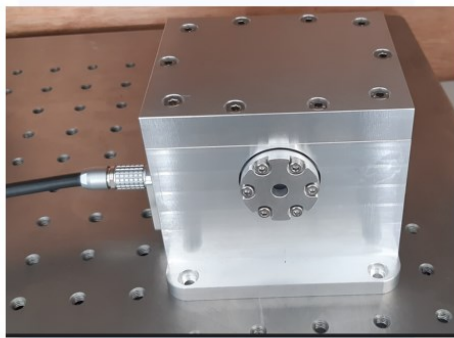


Abbildung 3: Kompakter optischer Referenzresonator.

Wie in Abbildung 3 dargestellt, besteht das monolithische Resonatorsystem aus einem monolithischen Quarzglaszylinder und dem Gehäuse für den Resonator.

Zylindrischer Resonator: Der Glaszylinder besteht aus hochwertigem Quarzglas (wie in Abbildung 4). Die beiden Enden des Zylinders sind die beiden Spiegelflächen des Resonators, eine ebene und die andere konvex. Beide Enden sind mit einer hochreflektierenden Beschichtung versehen, um einen Lichteinschluss zwischen den Spiegeln zu erreichen. Da das zwischen den Spiegeln eingeschlossene Licht innerhalb des Glasmaterials hin und her reflektiert wird, ist es wichtig, Quarzglas mit sehr geringen optischen Verlusten zu verwenden. Die Auswahl des richtigen Glasmaterials ist neben dem hochpräzisen Glaspolieren ein sehr wichtiger Aspekt, um eine sehr geringe Rauheit der Spiegeloberflächen zu erreichen und damit erfolgreich

einen Resonator mit hoher Finesse zu erhalten, wobei die Finesse die Anzahl der Hin- und Rückläufe von Photonen/Licht vor dem Austritt aus dem Resonator definiert.

Gehäuse: Für die Frequenzstabilität eines optischen Resonators müssen die Auswirkungen externer Faktoren wie Temperatur, Druck und externe Vibrationen minimiert werden. Wie in Abbildung 3 dargestellt, ist ein Aluminiumgehäuse mit zwei Schichten Wärmedämmung so konzipiert, dass die Auswirkungen thermischer Schwankungen minimiert werden. Darüber hinaus wird durch eine aktive Temperaturregelung mittels Peltier-Elementen und einer PID-Schleife eine thermische Stabilität von wenigen Millikelvin erreicht.

Der Glaskörper wird mithilfe von nur wenige Millimeter dicken Halteklammern in einem Teflonwürfel mit geringer Leitfähigkeit gehalten. Ein kleiner Oberflächenkontakt der Klemme trägt zur Reduzierung der Wärmeleitung bei, und die Positionen der Klammern sind optimiert, um die Empfindlichkeit gegenüber externen Vibrationen zu verringern. Der Teflonwürfel ist über PEEK-Kunststoffabstandshalter mit geringer Leitfähigkeit mit einem weiteren Hitzeschild aus Aluminium verbunden. Schließlich wird das gesamte System in einer Aluminiumkammer und auf einem Peltier-Element platziert. Um die Auswirkungen externer Druckänderungen zu minimieren, ist die Aluminiumkammer mit Viton-O-Ringen an der Position der Glasfenster und an der für das Peltier und den Temperatursensor erforderlichen elektrischen Durchführung luftdicht abgedichtet.

2.1.1.1. Charakterisierung des monolithischen Glasresonators

Ein optischer Resonator wird typischerweise durch seine Finesse charakterisiert. Unser zylindrischer Resonator hat eine Länge von 2,5 cm, was einem freien Spektralbereich (FSR) von 4 GHz entspricht. Um die Finesse (FSR/Linienbreite) des Resonators zu bestimmen, messen wir die Resonatorlinienbreite mithilfe der Cavity-Ring-Down-Messtechnik, wie unten beschrieben.



Abbildung 4: Zylindrische Cavity von 2,5 cm Länge

Ein Laser mit einer Wellenlänge von 1542 nm wird mithilfe der standardmäßigen Pound-Drever-Hall-Technik frequenzsynchron mit der Cavity verbunden. Die Fotodiodenausgabe wird überwacht, während das Licht am Resonatoreingang abrupt gestoppt wird, indem der Laser aus dem Resonanzzustand entriegelt wird. Wie in Abbildung 5 dargestellt, ergibt eine Exponentialkurve des Transmissionslichts des Resonators die Linienbreite des Resonators. Für diesen speziellen Resonator erhalten wir eine Finesse von 90.000. Diese Messung weist trotz der Verluste im Glasmaterial auf einen Resonator von sehr hoher Qualität hin.

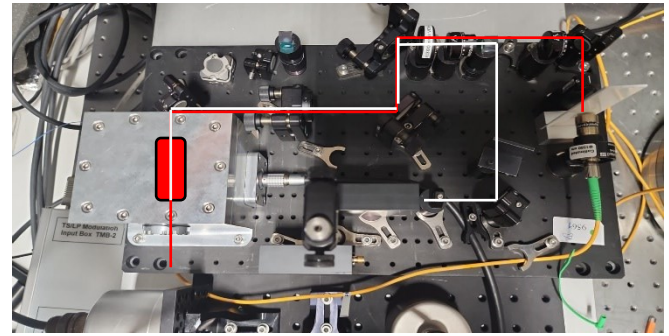
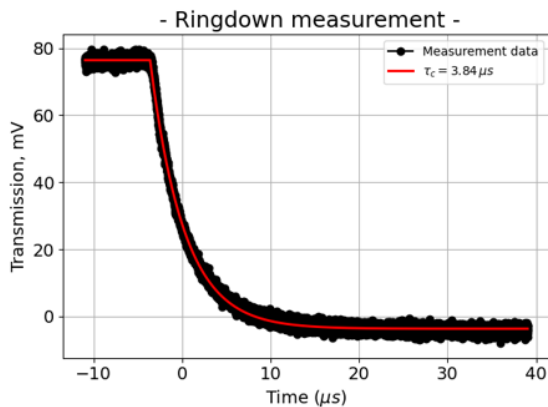


Abbildung 5: Resonatorabklingzeitspektroskopie

2.1.1.2. Charakterisierung von Cavity-Abschirmungen

Es wird erwartet, dass die Resonatorverkleidung die Auswirkungen externer Temperaturänderungen auf den Resonator minimiert. Die im Inneren des Gehäuses verwendeten Wärmeabschirmungen wirken als Tiefpassfilter für Temperaturänderungen außerhalb der Abschirmung. Wir charakterisieren die thermische Reaktion des Resonatorgehäuses, indem wir die thermische Zeitkonstante am Ort des Resonators für eine Sprungantwort einer Temperaturänderung am Peltier-Element messen. Das experimentelle Ergebnis wird auch mit der FEM-Simulation (Finite-Elemente-Methode) in COMSOL verglichen (Abbildung 6). Mit einer thermischen Zeitkonstante von 20 Minuten konnte eine Frequenzstabilität von $1e-13$ bei einer Integrationszeit von 1-100 ms erreicht werden, wenn die Temperaturstabilität des Peltier-Elements etwa einige mK beträgt.

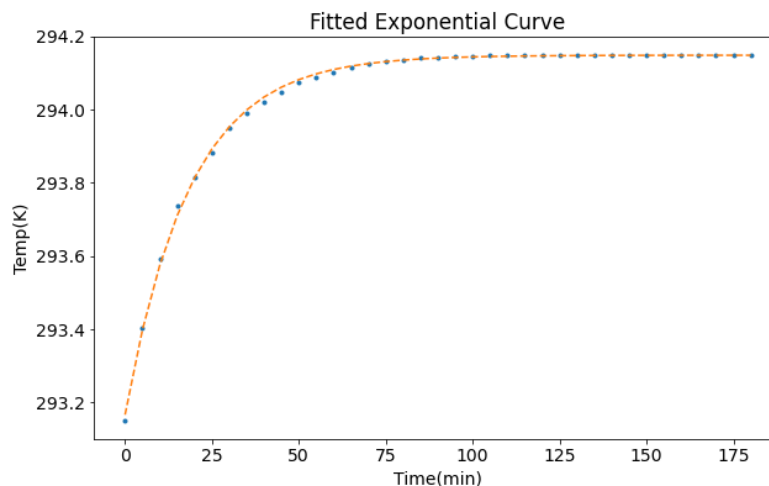


Abbildung 6: Simulierte thermische Reaktion des Cavity-Gehäuses

2.1.1.2.1. Charakterisierung der Frequenzstabilität des Resonators

Die Frequenzstabilität eines Resonators steht in direktem Zusammenhang mit seiner Längenstabilität. Um die Frequenzstabilität der monolithischen Cavity zu charakterisieren, stabilisieren wir die Frequenz eines Lasers in der Cavity mithilfe der PDH-Locking-Technik. Ein Teil der stabilisierten Laserleistung wird mit einem anderen ultrastabilen Laserreferenzsystem bei Menlo verglichen. Ein Schwebungssignal zwischen

- Zur Veröffentlichung freigegeben. Alle Inhalte sind urheberrechtlich geschützt. -

den beiden Lasern wird mit einer schnellen Fotodiode aufgezeichnet und einem Frequenzzähler zur Analyse des Frequenzrauschens zugeführt. Da das Referenzsystem ein um zwei Größenordnungen besseres Frequenzrauschen aufweist, stehen etwaige Drifts im aufgezeichneten Schwebungssignal in direktem Zusammenhang mit dem Frequenzrauschen des monolithischen Resonators. Wir berechnen die modifizierte Allan-Abweichung (MADEV) aus der Schwebungssignalaufzeichnung, um die Stabilität des monolithischen Resonators zu quantifizieren. Abbildung 7 zeigt die MADEV für die monolithische Kavität. Die Schwebungsfrequenz für die Messung wird mit einer Integrationszeit von 1 ms aufgezeichnet. Der MADEV-Wert ist $< 1e-13$ zwischen 2-40 ms und bleibt unter $5e-13$ bis zu 100 ms nach einer linearen Frequenzdriftentfernung von 4.4 kHz (Abbildung 7).

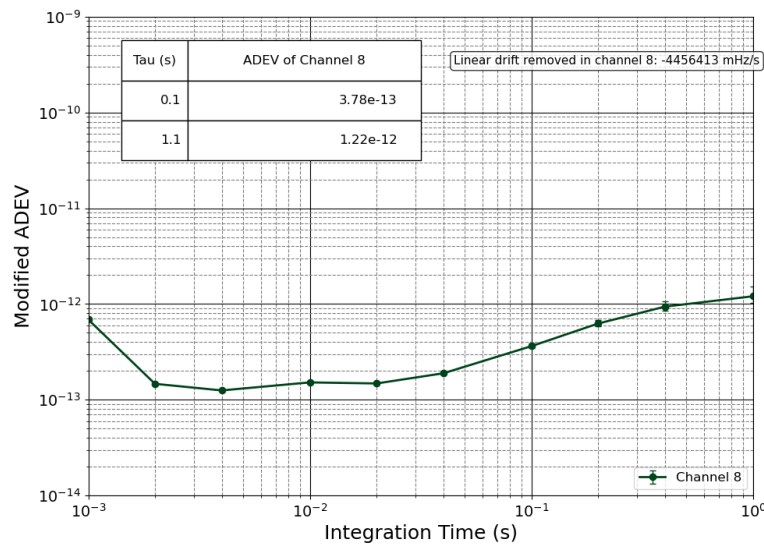


Abbildung 7: Frequenzstabilität des monolithischen Resonators gemessen anhand der modified Allan deviation.

2.1.1.2.2. Licht-Einkopplungssystem

Die Lichteinkopplung in einen optischen Resonator erfordert einige optische und optomechanische Komponenten sowie eine elektro-optische Vorrichtung zur Einkopplung des Laserlichts mit korrekter Polarisation und Ausrichtung sowie zur Modulation des Laserstrahls zur Erzeugung des PDH-Fehlersignals. Die Verwendung von Freistrahloptiken erfordert ein relativ großes System für die Implementierung eines Lichteinkopplungssystems.

Bei der monolithischen Cavity wurde das Licht direkt in die Cavity eingekoppelt, wobei ein einstellbares 5-Achsen-Faser-Kollimatorsystem am Gehäuse der Cavity angebracht wurde. Alle optischen und elektro-optischen Komponenten sind faserbasiert und leiten das Licht innerhalb der Faser. Die Entwicklung eines faserbasierten Einkopplungssystems wurde speziell für die kompakte monolithische Cavity durchgeführt. Diese Konfiguration wurde auch mit einer wesentlich leistungsfähigeren Cavity getestet. Wir haben mit diesem System eine sehr gute Leistung gemessen und eine Frequenzstabilität unter $1e-15$ bei 1 s Integrationszeit erreicht. Daher ist das faserbasierte Lichtkopplungssystem für eine monolithische Cavity mit einer erwarteten Leistung von nur $1e-13$ bei 100 ms Integrationszeit gut geeignet und wird verwendet.

Das Lichtkopplungssystem besteht aus einem handelsüblichen Kollimator, der an einer zweiachsigen Translationslinsenhalterung befestigt ist. Der Kollimator und die Translation ermöglichen die Ausrichtung des Strahls in fünf Achsen.

2.1.2. Beschleunigungsempfindlichkeit

Die Beschleunigungsempfindlichkeit einer optischen Kavität ist ein Maß für ihre Längenstabilität gegenüber externen Vibrationen. In der Regel können die Befestigungs- oder Haltepunkte des Resonators so gewählt werden, dass die Auswirkungen der Längenänderung des Resonators minimiert werden. In COMSOL wurden Finite-Elemente-Simulationen durchgeführt, um die optimalen Haltepunkte für den Resonator zu finden (siehe Abb. 6). Die beiden Paare von Kreisbögen wurden in ihrem Abstand zu den Kanten des Zylinders optimiert, um die Empfindlichkeit der Längenänderung zu minimieren. Für eine Zylinderlänge von 2,5 cm liegt der optimale Abstand der Halter beispielsweise bei 8 mm von den Kanten, was zu minimalen Längenänderungen führt.

Wir haben experimentell die Schwingungsempfindlichkeit des Resonators charakterisiert, indem wir eine niederfrequente Sinusmodulation auf einer Schwingungsisolationsplattform einführten, auf der das Resonatorsystem befestigt war. Die resultierenden Beschleunigungen entlang der drei Achsen wurden mit drei Beschleunigungssensoren entlang der x-, y- und z-Achse gemessen (Abb. 7). Die Änderung der Schwebungsfrequenz zwischen dem an den monolithischen Resonator gekoppelten Laser und dem an den Referenzresonator gekoppelten Laser liefert das Maß für die Änderung der Längenänderung des Resonators für die angelegte Beschleunigung.

Wir haben experimentell eine Beschleunigungsempfindlichkeit im Bereich von $2 \cdot 10^{-8}/g - 1 \cdot 10^{-9}/g$ für die drei verschiedenen Resonatorachsen gemessen.

2.1.2.1. Optische Referenz auf Faserverzögerungsbasis

Als alternative Option für eine optische Frequenzreferenz wurde ein System auf Basis von Faser-Delay-Linien entwickelt. Dabei handelt es sich um ein faserbasiertes Michelson-Interferometer, bei dem einer der Interferometerarme eine lange Faserspule enthält. Die Faserspule und das Interferometer sind in einem Gehäuse isoliert, um externe Störeinflüsse wie Temperatur, Druck und Vibrationen zu minimieren. Der Ausgang des Interferometers liefert sinusförmige Intensitätsschwankungen als Fehlersignal zur Stabilisierung der Laserfrequenz. (Abbildung 8).

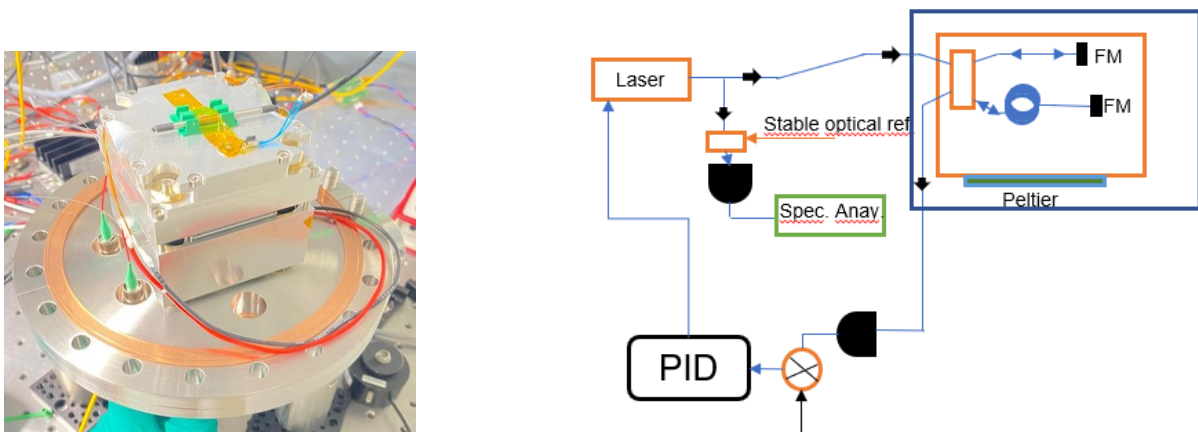


Abbildung 8: Versuchsaufbau: Optische Referenz auf Faserverzögerungsbasis. (FM: Faraday Mirror)

Die gemessene Stabilität eines Lasers, der mit dem Faser-Delay-Line-Interferometer frequenzverriegelt ist, ist in Abbildung 9 dargestellt. Man erhält eine Frequenzstabilität von $\sim 1e-13$, nachdem die lineare Drift

von etwa 2 kHz entfernt wurde. Wie für den monolithischen Resonator beschrieben, haben wir auch die Beschleunigungsempfindlichkeit gemessen, die $5e-10/g$ beträgt.

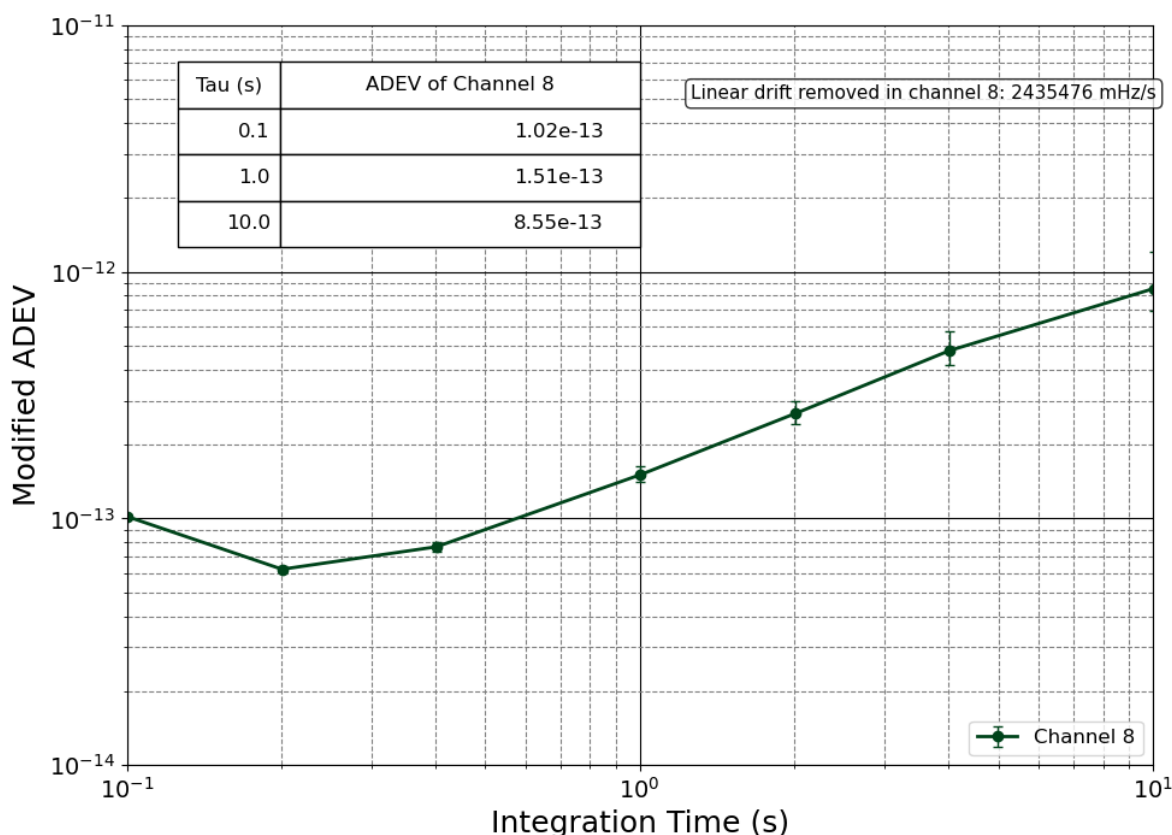


Abbildung 9: Frequenzstabilität der Fiber-delay-line gemessen anhand der modified Allan Deviation

2.1.3. Zusammenfassung und Ausblick

Die hier gezeigten kompakten optischen Frequenzreferenzen stellen einen großen Fortschritt hin zu weltraumtauglichen hochstabilen Lasern dar. Sowohl die monolithische Cavity als auch das Faserinterferometer zeigen Frequenzstabilitäten, die ausreichen würden, um optische Atomuhren und sogar Atomfallenuhren zu betreiben. Daher bleibt die Abwägung, welche Technologie für den Betrieb auf einer Höhenforschungsrakete besser geeignet ist, weiterhin nicht leicht. Ein vollständiger Trade-off muss nicht nur die Robustheit des Systems gegen Umwelteinflüsse wie Temperatur, Vibrationen, Schocks und ionisierende Strahlung, sondern auch Größe, Gewicht und Leistungsaufnahme (SWaP) berücksichtigen. Da die Randbedingungen jedoch missionsabhängig sind, muss die Wahl der Technologie letztlich jedes Mal neu bewertet werden. Hinzu kommt, dass die im Rahmen des Projekts entwickelten experimentellen Designs in beiden Fällen darauf abzielten, Technologiedemonstratoren zu erstellen, die wahrscheinlich noch in vielerlei Hinsicht weiter optimiert werden können. Das Folgeprojekt OPUS III (50WM2351A) wurde bereits bewilligt und stellt das Konsortium MEN, HUB, FBH vor die Herausforderung, eine optische Uhr für eine Kurzzeitmission im Weltraum zu entwickeln. In diesem Zusammenhang ist geplant, die optische Referenz weiterzuentwickeln und für einen solchen Einsatz zu optimieren.

2.2. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die Hardwareentwicklung einer optischen Uhr für den zukünftigen Einsatz auf Mikrogravitationsplattformen ging erheblich über den damaligen Entwicklungsstand hinaus und erforderte eine beträchtliche finanzielle und personelle Zusatzleistung, die nicht vollständig vom Antragsteller erbracht werden konnte. Zudem handelte es sich um die Entwicklung von Technologien, bei

- Zur Veröffentlichung freigegeben. Alle Inhalte sind urheberrechtlich geschützt. -

denen ein Return on Investment (ROI) erst nach vielen Jahren und unter erheblichen Risiken erwartet werden konnte. Eine Förderung war daher zwingend erforderlich, um das Projekt durchzuführen.

Alle beantragten Geräte, Komponenten sowie Software waren zu Projektbeginn nicht als Grundausstattung vorhanden, jedoch für die Erreichung der Projektziele unerlässlich. Während der Projektlaufzeit wurden sie ausschließlich für diesen Zweck eingesetzt.

2.3. Voraussichtlicher Nutzen

Die in OPUS-II entwickelten Technologien, insbesondere das neu entwickelte optische Frequenzreferenzsystem, stellen zentrale Elemente auf dem Weg zu weltraumtauglichen optischen Uhren dar. Sowohl die Größe als auch die Robustheit konnten signifikant verbessert werden. Die beiden entwickelten Systeme bieten eine optimale Grundlage für die Weiterentwicklung der Technologie zur In-Orbit-Verifikation. Dies eröffnet ein großes wirtschaftliches und wissenschaftliches Potenzial).

2.4. Bekannt gewordener Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens

Es ist uns bis zum heutigen Zeitpunkt kein optisches Referenzsystem bekannt, dessen Betrieb In-Orbit gezeigt und publiziert wurde. Damit war dieses Vorhaben elementar, um neuartige Technologien für optische Uhren im Weltraum zu etablieren. Sehr wohl existieren hingegen wichtige Vorarbeiten auf diesem Gebiet, wie auch im Vorhabensantrag diskutiert [^{xvii}]. So führte ein ESA GSTP Projekt (AO06-28MM), ausgeführt durch das National Physical Laboratory, NPL (Großbritannien), zu einer Frequenzstabilität von 1×10^{-15} in 1 Sekunde sowohl vor als auch nach Umwelttests mit Beschleunigungen bis zu 10 g. Neuere Veröffentlichungen nehmen Bezug zu harschen Umweltbedingungen und Weltraummissionen [^{xviii}, ^{xix}, ^{xx}].

2.5. Erfolgte und geplanten Veröffentlichungen

Es ist geplant die erzielten Ergebnisse dieses Jahr auf Konferenzen und Tagungen zu präsentieren.

3. Literaturverzeichnis

- ⁱ Y. Y. Jiang, A. D. Ludlow, N. D. Lemke, R. W. Fox, J. A. Sherman, L.-S. Ma, and C. W. Oates, "Making optical atomic clocks more stable with 10-16 level laser stabilization," *Nature Photonics*, vol. 5, pp. 158–161, 2011.
- ⁱⁱ T. Udem, R. Holzwarth, and T. W. Hänsch, "Optical frequency metrology," *Nature*, vol. 416, pp. 223–237, 2002.
- ⁱⁱⁱ T. M. Fortier, M. S. Kirchner, F. Quinlan, J. Taylor, J. C. Bergquist, T. Rosenband, N. Lemke, A. Ludlow, Y. Jiang, C. Oates, and S. A. Diddams, "Generation of ultrastable microwaves via optical frequency division," *Nature Photonics*, vol. 5, pp. 425–429, 2011.
- ^{iv} K. Predehl, G. Grosche, S. M. F. Raupach, S. Droste, O. Terra, J. Alnis, T. Legero, T. W. Hänsch, T. Udem, R. Holzwarth, and H. Schnatz, "A 920-kilometer optical fiber link for frequency metrology at the 19th decimal place," *Science*, vol. 336, no. 6080, pp. 441–444, 2012.
- ^v Eric D. Black; "An introduction to Pound–Drever–Hall laser frequency stabilization," *Am. J. Phys.* 1 January 2001; 69 (1): 79–87. <https://doi.org/10.1119/1.1286663>
- ^{vi} T. Nazarova, F. Riehle, and U. Sterr, "Vibration-insensitive reference cavity for an ultra-narrow-linewidth laser," *Appl. Phys. B*, vol. 83, pp. 531–536, 2006.
- ^{vii} B. Argence, E. Prevost, T. Lévêque, R. L. Goff, S. Bize, P. Lemonde, and G. Santarelli, "Prototype of an ultra-stable optical cavity for space applications," *Opt. Express*, vol. 20, no. 23, pp. 25409–25420, 2012.
- ^{viii} D. R. Leibrandt, M. J. Thorpe, M. Notcutt, R. E. Drullinger, T. Rosenband, and J. C. Bergquist, "Spherical reference cavities for frequency stabilization of lasers in non-laboratory environments," *Opt. Express*, vol. 19, no. 4, pp. 3471–3482, Feb 2011.
- ^{ix} S. Webster and P. Gill, "Force-insensitive optical cavity," *Opt. Lett.*, vol. 36, pp. 3572–3574, 2011.
- ^x T. Kessler, T. Legero, and U. Sterr, "Thermal noise in optical cavities revisited," *J. Opt. Soc. Am. B*, vol. 29, pp. 178–184, 2012.
- ^{xi} T. Kessler, C. Hagemann, C. Grebing, T. Legero, U. Sterr, F. Riehle, M. J. Martin, L. Chen, and J. Ye, "A sub-40 mHz linewidth laser based on a silicon single-crystal optical cavity," *Nature Photonics*, vol. 6, pp. 687–692, Dec. 2012.
- ^{xii} <https://www.menlosystems.com/products/ultrastable-lasers/>
- ^{xiii} <http://www.stablelasers.com/>
- ^{xiv} X. Xie et al., "Photonic microwave signals with zeptosecond-level absolute timing noise," *Nature Photon* 11, 44–47 (2017).
- ^{xv} M. Lezius et al., "Space-borne frequency comb metrology," *Optica*. 3, 1381 (2016), doi:10.1364/OPTICA.3.001381.
- ^{xvi} B. J. Pröbster, M. Lezius, O. Mandel, C. Braxmaier, R. Holzwarth, "FOKUS II—Space flight of a compact and vacuum compatible dual frequency comb system," *J. Opt. Soc. Am. B*. 38, 932 (2021), doi:10.1364/JOSAB.413929.
- ^{xvii} W. Zhang et al., "Ultrastable Linewidth Photonic-Atomic Laser," *Laser Photon. Rev.* 14, 1900293 (2020), doi:10.1002/lpor.201900293.
- ^{xviii} W. Zhao et al., "Design of a transportable miniaturized optical reference cavity with flexibly tunable thermal expansion properties," *Front. Phys.* 10 (2023), doi:10.3389/fphy.2022.1080196.
- ^{xix} Y. Luo et al., "Prototype of a monolithic cavity-based ultrastable optical reference for space applications," *Appl. Opt.* 60, 2877–2885 (2021), doi:10.1364/AO.420045.
- ^{xx} E. R. Rees et al., "Absolute frequency readout derived from ULE cavity for next generation geodesy missions," *Opt. Express*. 29, 26014–26027 (2021), doi:10.1364/OE.434483.

Berichtsblatt

1. ISBN oder ISSN NA	2. Berichtsart Schlussbericht
3. Titel des Berichts OPUS-II: Optische Uhren unter Schwerelosigkeit Schlussbericht	
4a. Autoren des Berichts (Name, Vorname(n)) Dr. Böhle, Frederik; Dr. Pandey, Deepak;	5. Abschlussdatum des Vorhabens 31.07.2023
4b. Autoren der Publikation (Name, Vorname(n)) -	6. Veröffentlichungsdatum 28.06.2024
8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse) Menlo Systems GmbH Bunsenstraße 5 D-82152 Martinsried	7. Form der Publikation NA
13. Fördernde Institution (Name, Adresse) Raumfahrtmanagement des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt e.V. Königswinterer Str. 522-524 53227 Bonn	9. Ber. Nr. Durchführende Institution NA
	10. Förderkennzeichen 50WM2051
	11a. Seitenzahl Bericht 18
	11b. Seitenzahl Publikation NA
	12. Literaturangaben 20
	14. Tabellen 1
	15. Abbildungen 9
16. Zusätzliche Angaben	
17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum)	
18. Kurzfassung <p>Hochstabile optische Frequenzreferenzen bieten ein großes Potential für bestehende und neuartige Anwendungen auf der Erde, wie im Weltraum. Sie verbessern dabei die allgemeine Genauigkeit, mit der die Frequenz und damit abgeleitete Größen wie die Zeit, aber auch Entfernung und Wellenlänge vermessen werden können. Bei einem Global Navigation Satellite System (GNSS), wie Galileo oder NAVSTAR GPS, kann eine optische Uhr die Präzision und Ausfallsicherheit erhöhen. Darüber hinaus können optische Referenzen für eine Reihe von wissenschaftlichen Missionen wie z.B. der Test der allgemeinen Relativitätstheorie, die Detektion von Gravitationswellen, hochgenaue Spektroskopie und weitere Anwendungen in der Quantenphysik eingesetzt werden. OPUS erforscht die zentralen Bestandteile einer optischen Uhr. Die optische Spektroskopie stellt dabei das Schwungrad der Uhr dar, und der Frequenzkamm quasi das Uhrwerk. Optische Uhren basierend auf dieser Technologie konnten bereits eine relative Frequenzstabilität zeigen, die noch um eine Größenordnung besser ist als solche basierend auf Gaszellen. Trotz des komplexeren Aufbaus besteht das Potential, mittel- bis langfristig, kompakt, robust und zuverlässig genug zu werden, um einen Weltraumeinsatz zu ermöglichen.</p> <p>Ziele dieses Teilvorhabens war die Entwicklung eines robusten und kompakten, schmalbandigen Lasersystems basierend auf einer Fabry-Perot Cavity, also eine optische Referenz, um die Kurzzeitstabilität der Uhr zu gewähren. Im zweiten Teil des Vorhabens sollten die einzelnen Module der optischen Uhr in ein Gesamtsystem integriert werden.</p>	
19. Schlagwörter Optisches Referenzsystem, optische Uhr, Faserlaser, Spektroskopie	
20. Verlag NA	21. Preis NA

Document Control Sheet

1. ISBN or ISSN NA	2. Type of Report Final Report
3. Report Title OPUS-II: Optische Uhren unter Schwerelosigkeit Schlussbericht	
4a. Author(s) of the Report (Family Name, First Name(s)) Dr. Böhle, Frederik Dr. Pandey, Deepak	5. End of Project 31.07.2023
	6. Publication Date 28.06.2024
	7. Form of Publication NA
8. Performing Organization(s) (Name, Address) Menlo Systems GmbH Bunsenstraße 5 D-82152 Martinsried	9. Originator's Report No. NA
	10. Reference No. 50WM2051
	11a. No. of Pages Report 18
	11b. No. of Pages Publication NA
13. Sponsoring Agency (Name, Address) Raumfahrtmanagement des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt e.V. Königswinterer Str. 522-524 53227 Bonn	12. No. of References 20
	14. No. of Tables 1
	15. No. of Figures 9
16. Supplementary Notes	
17. Presented at (Title, Place, Date)	
18. Abstract Highly stable optical frequency references offer great potential for existing and novel applications on Earth as well as in space. They improve the overall accuracy with which frequency and derived quantities such as time, but also distance and wavelength can be measured. In a Global Navigation Satellite System (GNSS), such as Galileo or NAVSTAR GPS, an optical clock can increase precision and reliability. In addition, optical references can be used for a variety of scientific missions such as testing general relativity, gravitational wave detection, high-precision spectroscopy, and other applications in quantum physics. OPUS has researched the central components of an optical clock. The optical spectroscopy part represents the flywheel of the clock, and the frequency comb the clockwork, so to speak. Optical clocks based on this technology have already demonstrated a relative frequency stability that is an order of magnitude better than those based on gas cells. Despite the more complex structure, there is the potential to become compact, robust and reliable enough to be used in space in the medium to long term. The aim of this sub-project was to develop a robust and compact, narrow-band laser system based on a Fabry-Perot cavity, i.e. an optical reference to ensure the short-time stability of the clock. In the second part of the project, the individual modules of the optical clock were to be integrated into an overall system.	
19. Keywords optical reference system, optical clock, fiber laser, fiber amplifier, spectroscopy	
20. Publisher NA	21. Price NA