

---

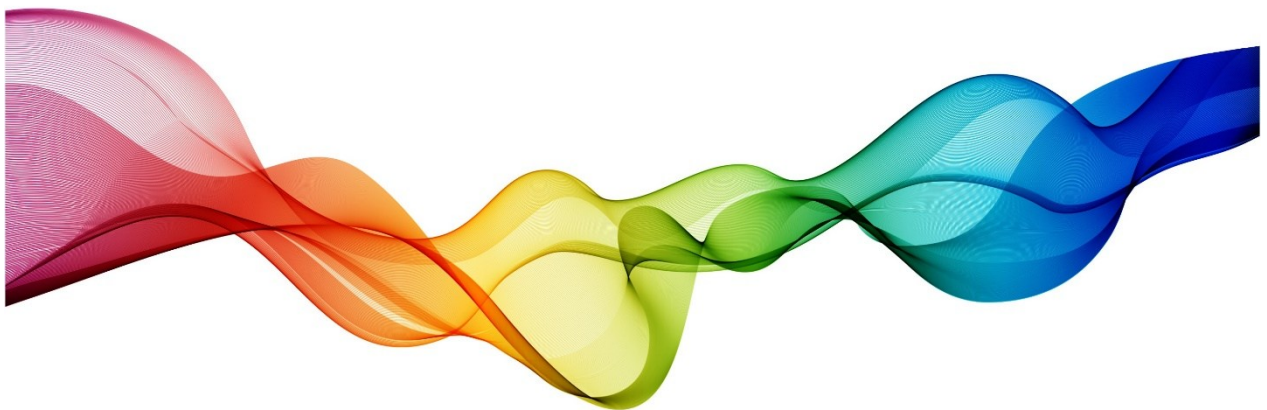
## ROSC: Rubidium-referenzierte optische Uhr für den Weltraum

### Schlussbericht

23.03.2026

DLR-RPT-MSG-ROSC-10000

---



## Projekt und Dokumenten Angaben

---

### Projektinformationen

<i>Vorhabenbezeichnung</i>	ROSC: Rubidium-referenzierte optische Uhr für den Weltraum
<i>Teilvorhabenbezeichnung</i>	SATCOMB: Optischer Frequenzkamm für Weltraumanwendungen
<i>Zuwendungsempfänger</i>	Menlo Systems GmbH Bunsenstraße 5 D-82152 Martinsried
<i>Förderkennzeichen</i>	50RK1970
<i>Laufzeit des Vorhabens</i>	01.08.2019 - 31.03.2024
<i>Projektleiter</i>	Ronald Holzwarth

### Dokumentinformationen

<i>Titel</i>	Schlussbericht
<i>Dokumenten ID</i>	DLR-RPT-MSG-ROSC-10000
<i>Ausgabe</i>	1.2
<i>Status</i>	Freigegeben
<i>Veröffentlichungsdatum</i>	23.03.2026
<i>Vertraulichkeitsstufe</i>	Zur öffentlichen Freigabe

## Autoren

---

<b>Name</b>	<b>Organisation</b>
<i>Matthias Lezius</i>	Menlo Systems GmbH
<i>Frederik Böhle</i>	Menlo Systems GmbH

## Änderungsverzeichnis

---

<b>Ausgabe</b>	<b>Date</b>	<b>Autor</b>	<b>Änderungen</b>
1.0	18.11.2024	M. Lezius, F. Böhle	Initiale Version
1.1	20.11.2024	M. Fischer	Formale Freigabe
1.2	23.03.2026	F. Böhle	öffentliche Freigabe

## Inhaltsverzeichnis

---

Projekt und Dokumenten Angaben.....	2
Projektinformationen.....	2
Dokumentinformationen .....	2
Autoren .....	3
Änderungsverzeichnis .....	3
Inhaltsverzeichnis .....	4
1. Kurzdarstellung.....	6
1.1. Aufgabenstellung .....	6
1.2. Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde .....	7
1.3. Planung und Ablauf des Vorhabens .....	7
1.4. Wissenschaftlicher und technischer Stand zur Zeit der Antragsstellung.....	8
2. Eingehende Darstellung .....	12
2.1. Verwendung der Zuwendung und erzielte Ergebnisse .....	12
2.1.1. Projektmanagement und Verbundkoordination .....	12
2.1.2. Optisches Modul.....	12
2.1.3. Elektronik-Steuermodule.....	16
2.1.4. Digitale Ansteuerung .....	19
2.1.5. Systems Engineering und Integration.....	21
2.1.6. Zusammenfassung und Ausblick .....	22
2.2. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit.....	23
2.3. Voraussichtlicher Nutzen .....	23
2.4. Bekannt gewordener Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens .....	23
2.5. Erfolge und geplante Veröffentlichungen .....	23
3. Literaturverzeichnis.....	25

## Abkürzungen und Akronyme

Tabelle 1: Abkürzungsverzeichnis

<b>Akronym</b>	<b>Definition</b>
<i>AIT</i>	Assembly, Integration, and Testing
<i>AP</i>	Arbeitspaket
<i>BDU</i>	Beat-Detection-Unit (dt. Schwebungs-Detektions-Einheit)
<i>CAN</i>	Controller Area Network
<i>CEO</i>	Carrier-Envelope Offset (dt. Träger-Einhüllenden-Phase)
<i>COTS</i>	Commercial Off-The-Shelf
<i>CRONOS</i>	Compact Rubidium Oscillator for Navigation systems Onboard a Satellite (Projekt)
<i>CW</i>	Continuous Wave (Dauerstrichlaser)
<i>DC</i>	Direct Current (Gleichstrom)
<i>DCU</i>	Digital Control Unit
<i>DLR</i>	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V.
<i>EEE</i>	Electrical, Electronic, and Electromechanical
<i>F&amp;E</i>	Forschung und Entwicklung
<i>FBG</i>	Faser-Bragg-Gitter
<i>FBH</i>	Ferdinand-Braun-Institut
<i>GIC</i>	Galileo Iodine Clock
<i>GNSS</i>	Global Navigation Satellite System (dt. globales Satellitennavigationssystem)
<i>GPS</i>	Global Positioning System (dt. globales Positionsbestimmungssystem)
<i>GS</i>	Ground Station
<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>ISS</i>	International Space Station
<i>JAXA</i>	Japan Aerospace Exploration Agency
<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>NASA</i>	National Aeronautics and Space Administration
<i>NIST</i>	National Institute of Standards and Technology
<i>OBC</i>	On-Board Computer
<i>PCB</i>	Printed Circuit Board (dt. Leiterplatte)
<i>PDD</i>	Pump-Diode Driver
<i>PID</i>	Proportional-Integral-Differential
<i>PSU</i>	Power Supply Unit
<i>PTB</i>	Physikalisch-Technische Bundesanstalt
<i>PUS</i>	Packet Utilization Standard
<i>RF</i>	Radio-Frequenz
<i>RFG</i>	Reference Frequency Generation
<i>RSSI</i>	Received Signal Strength Indicator
<i>SHG</i>	Second-Harmonic Generation (dt. Frequenzverdopplung)
<i>SI</i>	Système International d'Unités (dt. Internationales Einheitensystem)
<i>STI</i>	SpaceTech GmbH
<i>SWaP</i>	Size, Weight, and Power
<i>TC</i>	Telecommand

## 1. Kurzdarstellung

---

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, die Langzeitstabilität, und die 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.

Im ROSC wurden dazu Schlüsseltechnologien für optische Frequenzstandards auf Basis von Rubidium-2-Photonenabsorption für ihren künftigen Einsatz auf Satelliten entwickelt, da die Antragsteller hier das größte Potential einer deutlichen Reduktion des Size-Weight-and-Power (SWaP) Budgets bei vergleichbar hoher Stabilität und Genauigkeit festgestellt haben.

Menlo Systems hat sich bei diesem Verbundprojekt auf den Frequenzkamm konzentriert, welcher eine zentrale Komponente jeder optischen Uhr ist. Diese Arbeiten bauen auf eine Reihe von vorhergehenden Aktivitäten (FOKAL, IRASSI, FOKUS, FOKUS-II, OPUS-I) auf, die bereits zu einer verbesserten Technologiereife geführt haben. In diesem Vorhaben sollte die Technologiereife weiter erhöht werden, so dass eine künftige In-Orbit-Verification (IOV) denkbar wird. Ein künftiger Einsatz eines solchen Systems wird inzwischen für die Kleinsatelliten-Mission QUEENS/CRONOS erwogen.

### 1.1. Aufgabenstellung

Menlo Systems (MEN) untersuchte und entwickelte zusammen mit der Humboldt-Universität zu Berlin (HUB) und dem Ferdinand-Braun-Institut (FBH) im Verbundprojekt ROSC die technische Grundlage für eine hochstabile Frequenzreferenz auf Basis von Rubidium-2-Photonenabsorption und Frequenzkamm als optische Uhr für den Einsatz auf Satelliten.

Die Verbundpartner haben dazu den Stand verfügbarer Technologien sorgfältig analysiert und dabei folgende Bereiche identifiziert, in denen intensive Forschungs- und Entwicklungsarbeit notwendig war, damit ein künftiges weltraumqualifiziertes System realisiert werden kann:

**Physics Package:** Ein ultra-kompaktes und robustes Spektroskopiemodul für die Rubidium-2-Photonenspektroskopie soll entwickelt werden. Diese Arbeiten wurden von der HUB übernommen.

**Clock Lasersystem:** Auf Basis der bisherigen Ergebnisse soll der Uhrenlaser für die 2-Photonenspektroskopie erstmals als monolithisches opto-elektronisches Halbleiterbauelement (z. B. ECDL-on-a-chip) realisiert werden. Dies reduziert Größe, Masse und Kosten erheblich und legt den Grundstein für eine vollständig halbleiterbasierte 2-Photonenuhr. Diese Arbeiten wurden von dem FBH übernommen.

**Optischer Frequenzkamm:** Basierend auf bisherigen Entwicklungen wird die Technologiereife weiter erhöht, um eine zukünftige In-Orbit-Verification (IOV) zu ermöglichen. Der Fokus liegt auf der Härtung der Hardware gegen Umwelteinflüsse und Fehlbedienung sowie der Entwicklung einer digitalen Steuerung des Frequenzkamms. Diese Arbeiten wurden von MEN übernommen.

**Entwicklung der Systemarchitektur:** Physics Package, Lasersystem und Frequenzkamm müssen zur 2-Photonenuhr integriert werden. Die entsprechenden Aufgaben sind Festlegung des Missionsszenarios für die Rubidium 2-Photonenuhr, Ableitung des Anforderungsprofils, Integration des Gesamtsystems, Test und Bewertung der Technologiereife und Identifikation von bei Ende des Vorhabens noch bestehenden Technologielücken.

## 1.2. Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Menlo Systems hat sich bereits kurz nach seiner Gründung das Ziel gesetzt, die Frequenzkamm-Technologie nicht nur für terrestrische Anwendungen, sondern auch für den Einsatz im Weltraum verfügbar zu machen. Dieses ambitionierte Vorhaben erfordert eine kontinuierliche Weiterentwicklung der Technologie, um die spezifischen Anforderungen an Robustheit, Zuverlässigkeit und Langzeitstabilität in extremen Umweltbedingungen zu erfüllen.

Im Rahmen einer Reihe öffentlich geförderter Projekte – darunter FOKAL (50EE1223), IRASSI (50NA1325), FOKUS (50WM0934), FOKUS II (50WM1343) und OPUS I (50WM1851) – konnte Menlo Systems sukzessive die Technologiereife seiner optischen Frequenzkämme steigern. Zeitlich folgte das Projekt ROSC auf FOKUS II und OPUS I, wobei in FOKUS II Frequenzkämme bereits erfolgreich auf Höhenforschungsraketen getestet wurden. Diese Tests umfassten Messungen mit optischen Referenzen, die auf Jod-Molekülspektroskopie basierten. OPUS I konzentrierte sich auf der Frequenzkammseite auf eine signifikante Erhöhung der Technologiereife des optischen Moduls. Letztlich wurde dadurch der Weg für das Projekt ROSC bereitet, welches sich zum Ziel setzen konnte, die Technologiereife hin zu einer potenziellen, zukünftigen In-Orbit-Verifikation voranzutreiben und damit die Basis für den Einsatz in weltraumtauglichen optischen Uhren zu legen.

Die im Rahmen solcher Forschungsprojekte erzielten Ergebnisse tragen nicht nur zur Steigerung der Technologiereife für Raumfahrtanwendungen bei, sondern liefern auch wertvolle Erkenntnisse für die Weiterentwicklung der Standardprodukte von Menlo Systems. Insbesondere die Anforderungen an Robustheit und Stabilität fördern Innovationen, die auch für terrestrische Anwendungen unter extremen Bedingungen von Nutzen sind, etwa in der industriellen Messtechnik.

Das Projekt ROSC profitierte außerdem von der bestehenden technologischen Infrastruktur und dem fundierten Know-how aus vorangegangenen Projekten.

## 1.3. Planung und Ablauf des Vorhabens

Die Arbeiten innerhalb des Projekts ROSC bei Menlo Systems wurden klar strukturiert und in fünf übergeordnete Arbeitspakete (AP) unterteilt: AP1, AP5, AP6, AP7 und AP11. Jedes Arbeitspaket zielte auf spezifische wissenschaftliche und technische Fortschritte ab, die in enger Abstimmung mit den Verbundpartnern und entlang der Projektmeilensteine bearbeitet wurden. Diese Pakete und die darin anfallenden Aufgaben werden untenstehend gelistet.

- AP 1: Projektmanagement und Verbundkoordination mit dem Ziel, das Projekt mit allen Teilprojekten innerhalb der vorgesehenen Projektdauer erfolgreich durchzuführen und alle wissenschaftlichen und technischen Teilziele innerhalb der vorgesehenen Meilensteine zu erreichen.
- AP 5: Verbesserung der Technologiereife des optischen Moduls des Frequenzkammes gegen Umwelteinflüsse wie Temperaturschwankungen, Strahlung, Vibrationen, Schock und EMV. Die Anforderungen werden in einem typischen Missionsszenario in AP 11 festgelegt.
- AP 6: Verbesserung der Technologiereife der Elektronik-Steuermodule gegen Umwelteinflüsse und Fehlfunktion. Die Anforderungen werden in einem typischen Missionsszenario in AP 11 festgelegt. Abmessungen und Schnittstellen der Module sollen in ihrer Bauweise und Funktion weitgehend einem typischen Einsatz auf Satelliten entsprechen.
- AP 7: Entwicklung einer digitalen Ansteuerung für ROSC. Die Anforderungen werden in einem typischen Missionsszenario in AP 11 festgelegt. Es sollen Mikroprozessoren zum Einsatz kommen, die in ihrer Funktionalität und Rechenleistung typisch sind für den Einsatz auf Kleinsatelliten.

AP 11: Systemintegration und Erstellung eines Missions-Szenarios für eine künftige IOV und Ableitung der Systemanforderungen an das System ROSC.

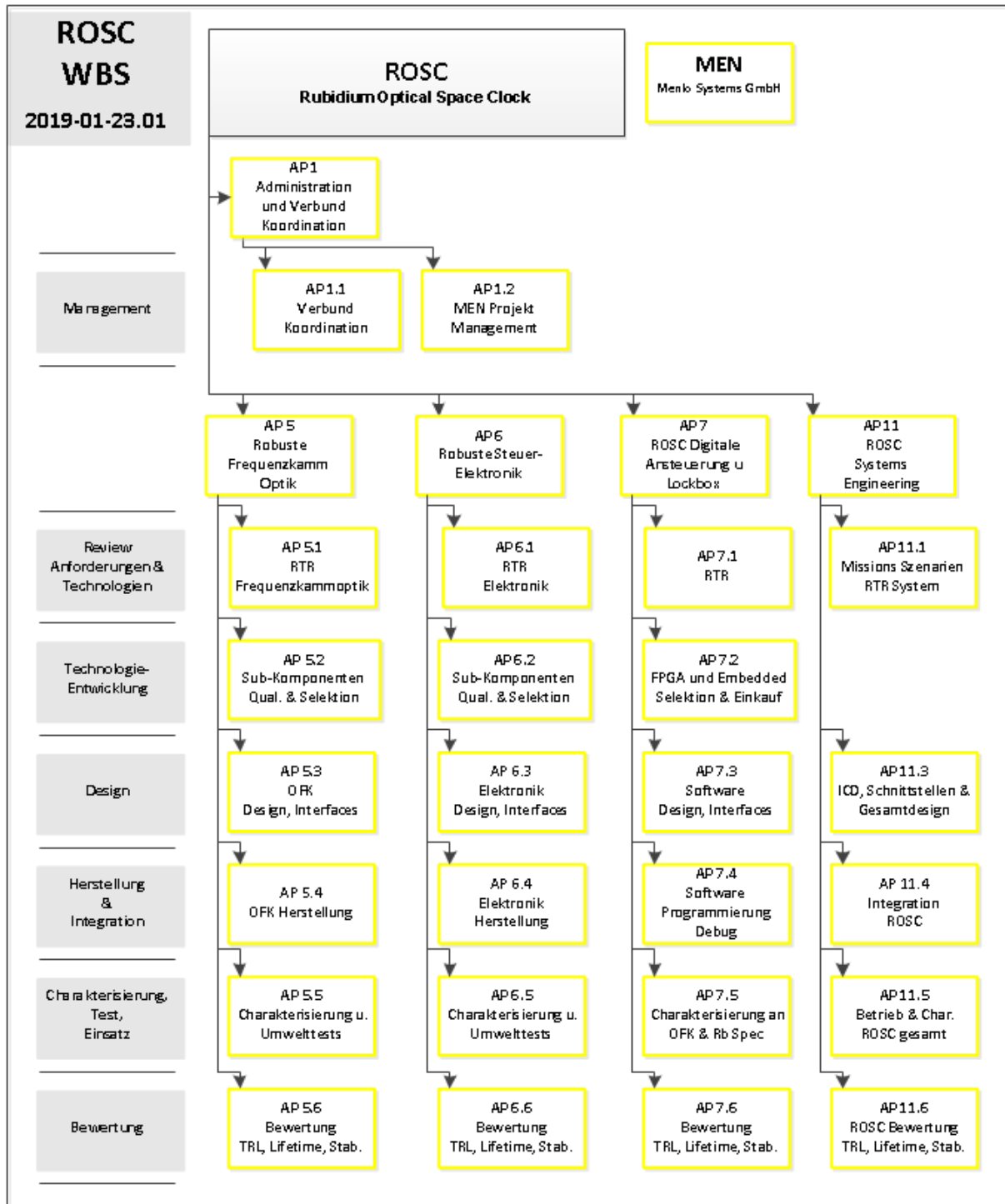


Abbildung 1: Strukturplan des Vorhabens ROSC der Arbeiten von Menlo Systems.

## 1.4. Wissenschaftlicher und technischer Stand zur Zeit der Antragsstellung

Hochstabile optische Referenzsysteme mit geringer Linienbreite sind ein wesentlicher Grundbaustein von optischen Zeit- und Frequenzstandards [i] und werden für höchstauflösende Spektroskopie an Atomen oder Ionen benötigt. Im Zusammenspiel mit der Frequenzkammtechnologie [ii] dienen sie u.a. als optischer Lokaloszillator für die Synthese hochstabiler Mikrowellensignale [iii]. Sie finden Anwendung als

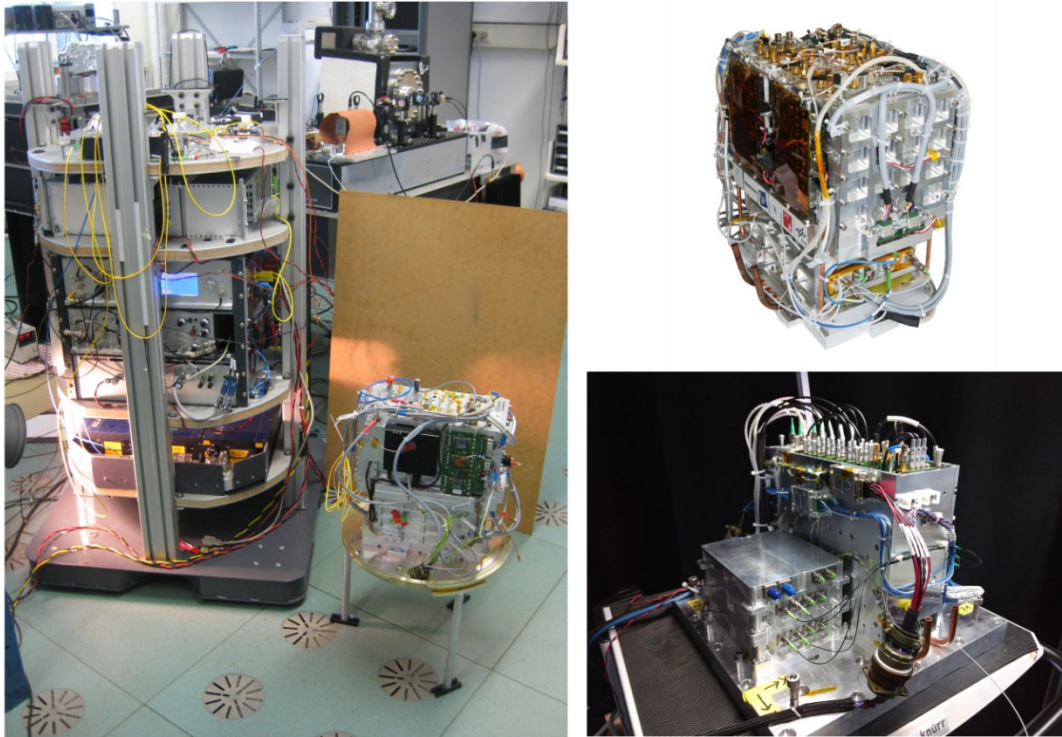
## Schlussbericht

Mastersystem zur Charakterisierung und Entwicklung rauscharmer Lasersysteme und nicht zuletzt sind sie ein unverzichtbarer Bestandteil bei der Verteilung optischer Frequenzen über Glasfasernetze [iv].

Viele derzeit in Forschungseinrichtungen entwickelten und betriebenen Systeme sind spezielle Einzelanfertigungen, die unter hohem personellem und finanziellem Aufwand immer weiter optimiert wurden. Die Systeme sind ausschließlich für den Betrieb in ruhigen und speziell klimatisierten Laborräumen vorgesehen. Die meisten Systeme sind nicht transportabel und würden bei einem Umzug in mühevoller Kleinarbeit erneut justiert und optimiert werden müssen.

Bezogen auf das Teilvorhaben, wurde bereits wenige Jahre nach der Firmengründung (2001) bei Menlo Systems erkannt, dass Frequenzkämme ein hohes Potential für künftige Anwendungen im Weltraum bieten. Konsequenter Weise ergab sich daher im Jahr 2009 gemeinsam mit dem Max-Planck-Institut für Quantenoptik das Projekt FOKUS (FKZ 50WM0934), mit dem ein Kammdemonstrator für Schwerelosigkeitsexperimente aufgebaut wurde. Dieses Projekt konnte damals auf ersten Erfahrungen mit einem Kamm für ein Fallturmexperiment (unter Projekt PRIMUS) aufbauen. Das Projekt FOKUS wurde 09-2013 erfolgreich abgeschlossen mit dem kompakten, automatisierten FOKUS Kamm-Modul, das für einen Flug auf einer TEXUS Rakete konzipiert war. Dieser Flug fand darauf hin im Rahmen des Folgeprojekts FOKUS 2 (FKZ 50WM1343) mit Erfolg auf der Forschungsrakete TEXUS 51 (4-2015) statt. Der Kammdemonstrator erwies sich dabei als äußerst robust und konnte nach dem Flug auch problemlos wieder in Betrieb genommen werden. Ein weiterer Flug wurde auf der Forschungsrakete TEXUS 53 absolviert (1-2016). In beiden Flügen wurden während der Schwerelosigkeitsphase Laserspektroskopien von FBH/HUB vermessen, die Dopplerfrei auf Absorptionslinien der Atome Rubidium und Kalium referenziert wurden. Das Frequenzkamm-Modul war dabei über kommerzielle Cäsium- und Rubidium RF-Uhren referenziert. Bei den Experimenten auf TEXUS 51 und 53 wurden erstmals optische Uhren geflogen [v]. Auch wenn die Performance durch die RF-Referenz und die Linienbreiten der Übergänge verglichen mit High-Performance-Uhren im Labor letztlich limitiert war, konnte damit ein sichtbarer wissenschaftlich-technologischer Durchbruch erzielt werden. Im Rahmen der FOKUS Vorbereitungen wurden auch erste Untersuchungen an strahlungsinduzierter Absorption in dotierten Fasern durchgeführt. Das FOKUS Modul wurde auf professionelle Art den notwendigen Rüttel- und Thermaltests unterworfen. Im Verlauf von FOKUS 2 wurde ein verbessertes vakuumtaugliches Frequenzkammsystem für Raketenflüge entwickelt, das im Mai 2018 erfolgreich bei der Kampagne TEXUS 54 eingesetzt wurde. Im Anschluss an FOKUS 2 wurde das Projekt OPUS (Fkz. 50WM1851) beantragt, in dem optische Uhren unter Schwerelosigkeit untersucht werden. Dabei soll Strontium als optische Referenz eingesetzt werden, und die dafür notwendige Spektroskopie wird gemeinsam mit FBH und HUB entwickelt.

Parallel zum Projekt FOKUS fand ab 12-2012 das Projekt FOKAL (FKZ 50EE1223) statt, bei dem ein Laser für eine LIDAR-Spektroskopie des DLR Instituts für Atmosphärenphysik auf eine Atomuhr referenziert werden sollte. Dabei wurde der Aufbau des Kamm-Moduls noch einmal deutlich überarbeitet, um einen dauerhaften Betrieb unter Vibrationen, wie sie typischerweise in Flugkörpern auftreten, gewährleisten zu können. Das Projekt wurde 2015 erfolgreich abgeschlossen, und der dabei aufgebaute kompakte 19“ Laser wurde bei einem Schwerelosigkeitsflug auf dem Zero-G Flieger in Bordeaux und bei der CHARM-F auf dem Flugzeug HALO der DLR IPA (2018) erfolgreich eingesetzt. Eine wesentliche Veränderung von FOKUS zu FOKAL war auch der erstmalige Einsatz einer miniaturisierten und verbrauchsarmen ARM-basierten Embedded-Steuerelektronik zur Steuerung der Laser.



**Abbildung 2:** Überblick über die Lasersysteme, die für Mikrogravitation seit 2009 von Menlo Systems entwickelt wurden. Linkes Bild: Links das System für das Fallturm-Projekt PRIMUS, rechts daneben das FOKUS System, das für einen Flug auf der TEXUS 51 Rakete konzipiert wurde. Rechts oben: Das FOKUS System im Detail, dieses System wurde in einem bedruckten Dom geflogen. Rechts unten: Das kompakte FOKUS 2 Doppelkammsystem, das für den Flug auf der Forschungsrakete TEXUS 54 gebaut wurde. FOKUS 2 wurde vakuumtauglich konzipiert. Volumenunterschied der Systeme ca. 150:20:6 l. Gewichtsunterschied ca. 100:28:11 kg.

Im Rahmen des Verbundprojekts IRASSI (FKZ 50NA1325) der DLR Navigation wurden von Menlo darüber hinaus anspruchsvollste Raumfahrtanwendungen für Doppelkämme untersucht. Der Schwerpunkt lag dabei auf Doppelkammsystemen für sehr genaue und schnelle Abstandsmessungen. Dieses Projekt wurde 3-2017 mit Erfolg abgeschlossen, zum Abschluss wurde eine Distanzmessung auf einer referenzierten Wegstrecke der PTB in Braunschweig durchgeführt, auf der die angestrebte Genauigkeit von  $<1 \mu\text{m}$  bei 1 ms verifiziert werden konnte. Das Projekt IRASSI war gewissermaßen auch eine experimentelle Studie, die sich an eine durch das BMBF finanzierte Papier-Studie zu den Möglichkeiten von kammbasierten gravimetrischen Messungen anlehnte. In den Anschlussprojekten IRASSI 2 (50NA1713) und IRASSI 2-2 (50NA1819) wurde die unter IRASSI begonnene Missionsstudie weiter konsolidiert und in der astronomischen Community beworben. Nebenbei werden dabei auch terrestrische Anwendungen im Gebiet der hochgenauen Abstandsmessung und des *remote sensings* untersucht.

Weitere thematisch relevante, bodenbasierte Studien zu optischen Uhren, optischer Mikrowellenerzeugung und zum Thema Zeit- und Frequenzverteilung existieren für die ESA (ITT AO8710), für das BMBF (OPTICLOCK, 13N14382), und innerhalb eines europäischen H2020 Projekts (CLONETS, FKZ 731107).

Ein zentraler Bestandteil jeder modernen optischen Uhr ist der optische Frequenzkamm [1]. Optische Frequenzkämme, erzeugt mit modengekoppelten Femtosekundenlasern, ermöglichen es, die Frequenz von Lichtschwingungen zu zählen. Frequenzkämme verbinden dazu optische Frequenzen von mehreren 100 THz mit Radiofrequenzen im Bereich von MHz oder GHz, indem sie wie ein optisches Getriebe

- Zur öffentlichen Freigabe. Alle Inhalte sind urheberrechtlich geschützt. -

arbeiten, das im übertragenen Sinne auch als Uhrwerk für zukünftige optische Uhren fungiert. Die Frequenzstabilität von Licht kann phasenkohärent in den RF-Bereich übertragen werden und so gegen die SI-Sekunde, welche durch Cs-Atomuhren bei 9.2 GHz realisiert wird, verglichen werden oder aber auch in Zukunft die SI-Sekunde neu definieren. Die grundlegende Idee der Messung mit Frequenzkämmen besteht darin, den Frequenzkamm als ein Lineal im Frequenzraum zu nutzen bei der Vermessung von Differenzen zwischen zwei optischen Frequenzen. Der Frequenzkamm selbst wird erzeugt durch einen periodischen Pulszug, der von einem Femtosekundenlaser bereitgestellt wird (siehe Abbildung 3). Seine Zinken weisen alle den gleichen Abstand zueinander auf, welcher durch die Wiederholrate der Pulse  $f_r$  aus dem Laser gegeben ist. Typische Werte für die Pulswiederholrate bewegen sich im Bereich von einigen 10 MHz bis 10 GHz. Eine Offsetfrequenz  $f_o$ , welche kleiner als die Repetitionsrate gewählt werden kann, definiert die Position des ersten (gedachten) Zinkens im Frequenzraum. Diese Position ist typischerweise ungleich Null, kann aber in vorteilhafter Weise auch 0 oder  $f_r/2$  gesetzt werden. Die Ursache für diese Offsetfrequenz liegt im Phasenschlupf zwischen der Einhüllenden des elektrischen Feldes des Pulses und dem Feld selbst aufgrund einer unterschiedlichen Phasen- und Gruppengeschwindigkeit. Die Offsetfrequenz wird daher üblicherweise als „Carrier-Envelope-Offsetfrequenz“  $f_{CEO}$  oder auch als  $f_o$  bezeichnet. Sobald diese Offsetfrequenz sowie die Repetitionsrate bekannt sind oder mit einem Phasenregelkreis stabilisiert 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  $f_n = (n \cdot f_r + f_o)$ . 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.

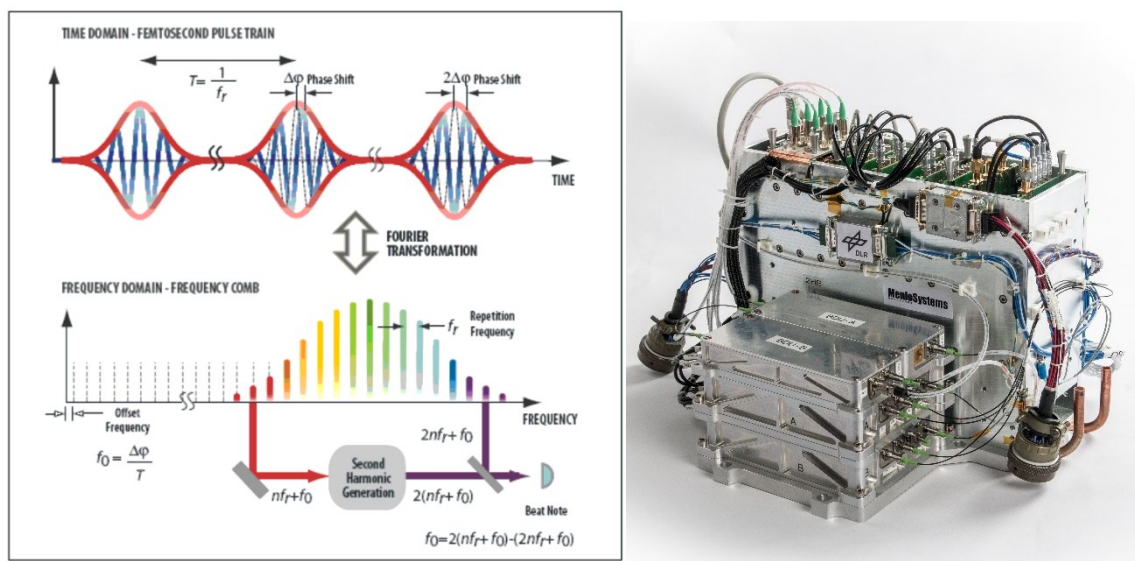


Abbildung 3: Schema des Frequenzkammes und Abbildung des in FOKUS 2 entwickelten flugtauglichen Doppelkammsystems.

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.

## 2. Eingehende Darstellung

---

### 2.1. Verwendung der Zuwendung und erzielte Ergebnisse

Die im Rahmen des Projekts ROSC zur Verfügung gestellten Mittel wurden gezielt eingesetzt, um die technologischen und wissenschaftlichen Ziele des Projekts zu erreichen. Dabei gliederte sich die Verwendung der Zuwendung in mehrere Schlüsselbereiche, die nachfolgend beschrieben werden. Die erzielten Ergebnisse tragen wesentlich zur Weiterentwicklung der optischen Frequenzkammtechnologie und ihrer Integration in weltraumtaugliche Systeme bei.

#### 2.1.1. Projektmanagement und Verbundkoordination

Das Projektmanagement und die Verbundkoordination spielten eine zentrale Rolle bei der erfolgreichen Durchführung des ROSC-Projekts. Als Koordinator des Teilvorhabens bei Menlo Systems übernahmen wir die Verantwortung für die Organisation und Steuerung der projektinternen Abläufe sowie die Sicherstellung eines reibungslosen Informationsflusses zwischen den Projektpartnern.

Schwerpunkte der Tätigkeiten:

- **Projektplanung:** Erstellung detaillierter Zeitpläne für die Arbeitspakete sowie regelmäßige Abstimmung mit den Projektpartnern, um Meilensteine und Ziele fristgerecht zu erreichen.
- **Kommunikation:** Organisation und Durchführung regelmäßiger Konsortialtreffen, sowohl vor Ort als auch virtuell, um Fortschritte zu überprüfen, technische Herausforderungen zu diskutieren und Lösungen zu erarbeiten. Dabei wurden alle relevanten Ergebnisse dokumentiert und den Partnern zur Verfügung gestellt.
- **Qualitätsmanagement:** Implementierung eines standardisierten Prozesses zur Nachverfolgung der technischen und administrativen Fortschritte. Hierzu gehörten unter anderem die Pflege von Risiko- und Maßnahmenlisten sowie die Sicherstellung der Einhaltung der Anforderungen an Berichterstattung und Dokumentation.
- **Berichtswesen:** Termingerechte Erstellung von Zwischenberichten und Statusupdates an den Projektträger. Dabei wurden Fortschritte und Probleme transparent kommuniziert, um die Grundlage für strategische Entscheidungen im Konsortium zu schaffen.
- **Risikomanagement:** Regelmäßige Identifikation und Bewertung möglicher Projektrisiken sowie Erarbeitung von Maßnahmen zur Risikominderung, insbesondere in Bezug auf die Integration der verschiedenen Technologien (optisches Modul, Elektronik-Steuermodule und digitale Ansteuerung).

#### 2.1.2. Optisches Modul

Ein zentraler Schwerpunkt des Projekts ROSC war die Weiterentwicklung des optischen Moduls des Frequenzkamms, um dessen Technologiereife unter den spezifischen Anforderungen von Weltraummissionen zu erhöhen. Aufbauend auf den Erfahrungen aus dem Projekt OPUS-I wurden mehrere Aspekte des Designs und der Funktionalität überarbeitet, optimiert und getestet.

Die Freistrahloptik des Moduls wurde für den Weltraumeinsatz qualifizierbar gemacht, indem das Löten von Optiken weiterentwickelt und optimiert wurde. Dies stellt sicher, dass die optischen Komponenten auch unter den mechanischen und thermischen Belastungen eines Starts und im Orbit zuverlässig funktionieren. Darüber hinaus wurde ein redundantes Pumpdiodenkonzept implementiert, um die Systemzuverlässigkeit zu erhöhen. Pumpdioden weisen naturgemäß eine geringere Zuverlässigkeit auf, weshalb das System so ausgelegt wurde, dass der Ausfall einzelner Pumpdioden ohne Funktionsverlust kompensiert werden kann.

Das thermische Management wurde ebenfalls überarbeitet. Dabei wurde der Stromverbrauch minimiert und die Temperaturstabilisierung der Faserwanne auf Millikelvin-Genauigkeit optimiert, um eine

konstante Leistung der optischen Komponenten sicherzustellen. Das Faserdesign wurde auf strahlenharte Fasern umgestellt, basierend auf Ergebnissen und Fasern aus einer ESA GSTP-Studie 4000129791/20/NL/AR [6].

Eine weitere Entwicklung im Rahmen von ROSC war das elektro-optische Beat Detection Modul. Dieses Modul ermöglicht die gleichzeitige Detektion mehrerer optischer Heterodyne-Schwebungssignale (Beats), einschließlich CEO- und Repetitionsfrequenzsignalen, und bietet Ports für unterschiedliche Wellenlängen (1550 nm, 1064 nm, 778,1 nm und 780 nm). Diese Konfiguration ermöglicht es, den Frequenzkamm sowohl durch eine Kamm-Kamm-Vergleichsmessung zu qualifizieren als auch das optische Uhrensinal für die Stabilisierung des Frequenzkamms zu nutzen. Zudem bietet das Modul die Möglichkeit, verschiedene optische Referenzen wie Iod-Uhren, Rubidium-Übergänge und Rubidium-2-Photonen-Signale zu vergleichen.

Im Rahmen des Projekts wurde ein optisches Frequenzkamm-Modul auf Basis vorselektierter, größtenteils Telcordia-qualifizierter Komponenten aufgebaut.

Das Ausgangsspektrum des Oszillators ist in Abbildung 5 gezeigt. Das Oszillatorsignal wird in zwei Arme aufgeteilt: ein Arm dient der Generierung des Carrier-Envelope-Offset (CEO)-Beatsignals, während der andere Arm für die Heterodyne-Schwebungssignale verwendet wird. In beiden Armen wird das Lichtsignal durch nichtlineare Prozesse verstärkt, spektral verbreitert oder frequenzverdoppelt, um die gewünschten Wellenlängen zu erzeugen.

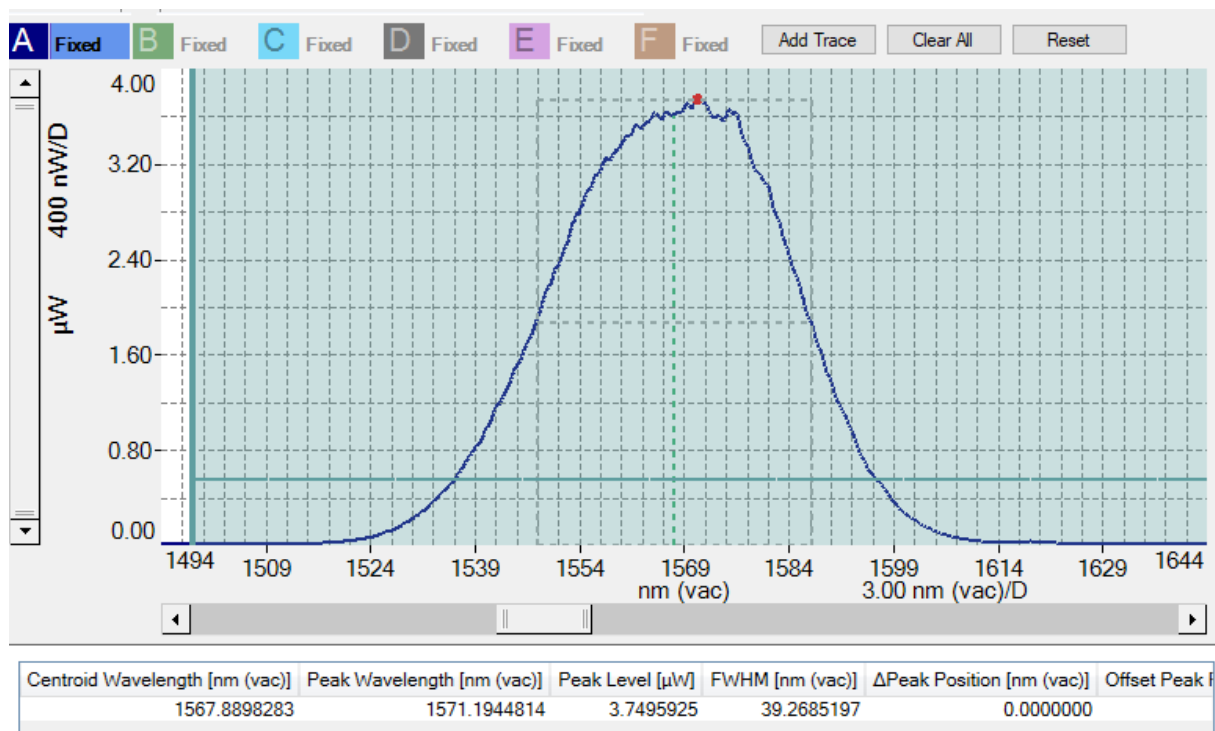


Abbildung 4: Optisches Spektrum am Ausgang des Oszillators (Seed-Port).

Abbildung 6 zeigt das Ausgangsspektrum des RLG (Reference Light Generation) Teil des Optikmoduls, nach spektraler Filterung durch Faser-Bragg Gitter (FBG). Dieses Lichtsignal kann anschließend kohärent mit einem CW Laser bei entsprechender Wellenlänge kombiniert werden, um eine heterodynes Schwebungssignal zu erzeugen.

## Schlussbericht

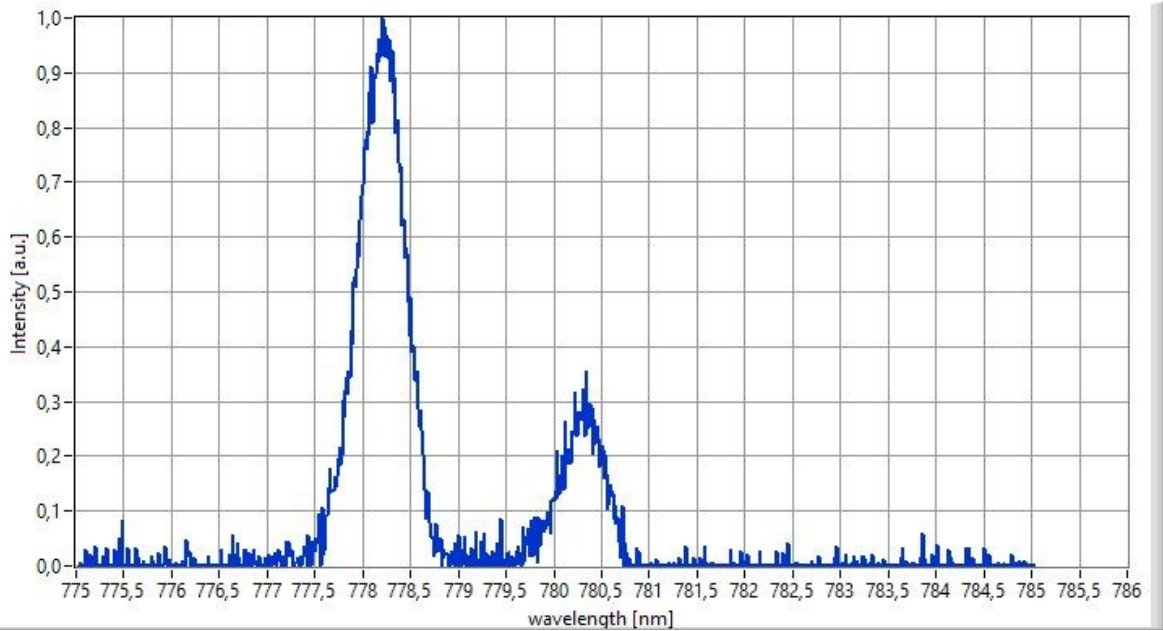


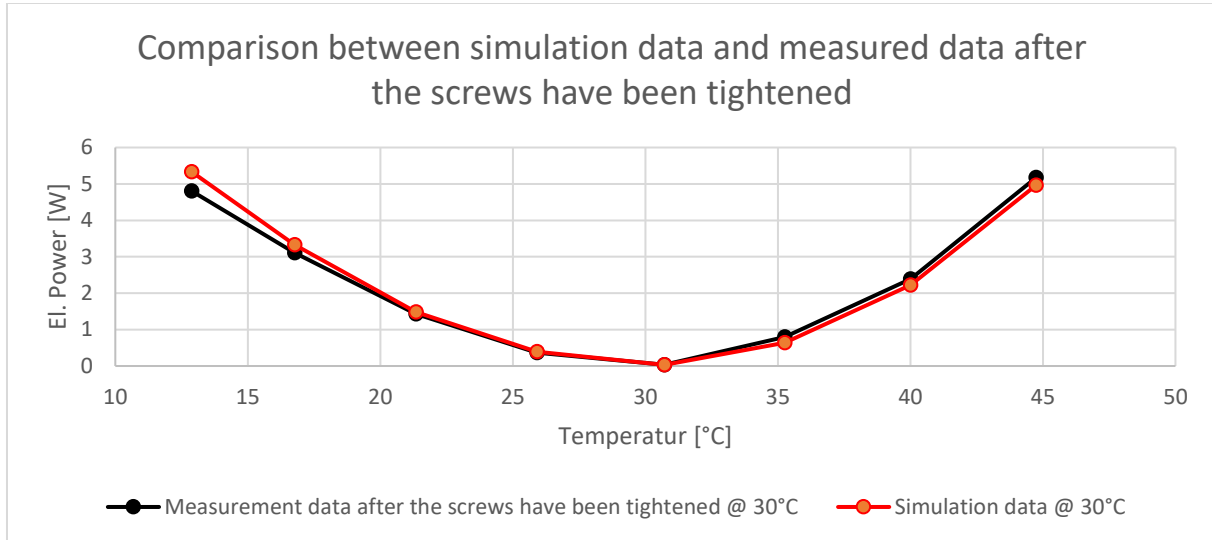
Abbildung 5: Ausgangsspektrum des RLG (Reference Light Generation) Teil des Optikmoduls, nach spektraler Filterung durch Faser-Bragg Gitter (FBG).

Ebenso wurde die Schwebungseinheit für den Rubidium-2-Photonen-Übergang ( $Rb\ 2h\nu$ ) entwickelt und integriert. Ein typisches Beatsignal zwischen einem CW Laser bei 778 nm und dem Frequenzkamm ist in Abbildung 7 gezeigt.



Abbildung 6: Heterodynes Schwebungssignal zu einem CW Laser bei 778 nm.

Das fertige Modul wurde unter Laborbedingungen getestet, wobei die Stabilität und Funktionalität der Temperaturstabilisierung und der optischen Komponenten überprüft wurden. Der Leistungsbedarf der Temperaturstabilisierung in Abhängigkeit der externen Umgebungstemperatur (Bodenplatte) ist in Abbildung 8 gezeigt.



**Abbildung 7: Leistungsbedarf der Temperaturstabilisierung in Abhängigkeit der Umgebungstemperatur (Bodenplatte), verglichen mit numerischen Simulationen.**

Die Ergebnisse zeigen eine stabile und zuverlässige Leistung, die den Anforderungen zukünftiger Weltraummissionen entspricht. Nach der erfolgreichen Verifizierung konnte das optische Modul anschließend in AP11 in das Gesamtsystem des Frequenzkamms integriert werden. Das fertige Optikmodul ist in Abbildung 9 gezeigt.

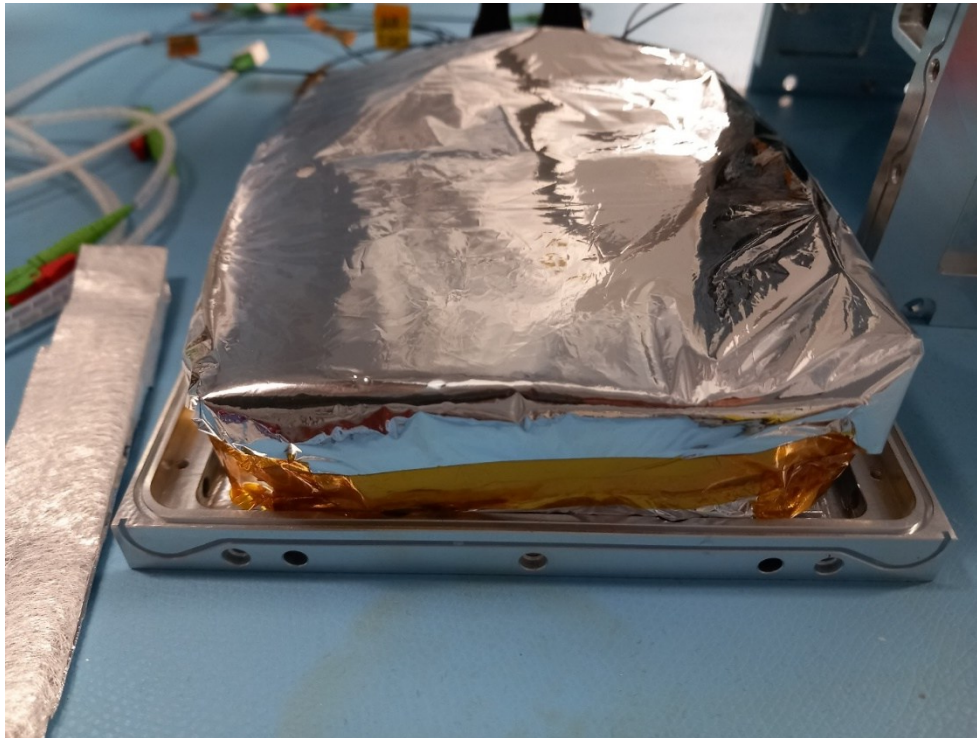


Abbildung 8: Aufgebautes ROSC-Optikmodul. Der faseroptische Bereich ist in MLI-Folie eingewickelt, um den Stromverbrauch der Thermalkontrolle zu minimieren.

### 2.1.3. Elektronik-Steuermodule

Im Rahmen des Projekts ROSC wurden mehrere qualifizierbare Elektronikmodule speziell für das Frequenzkammsystem entwickelt. Ziel war es, eine zuverlässige, kompakte und weltraumtaugliche Elektronik bereitzustellen, die den Anforderungen an Präzision, Stabilität und Robustheit für zukünftige Weltraummissionen gerecht wird. Die entwickelten Module umfassen:

- Power Supply Unit (PSU)
- Digital Control Unit (DCU)
- Lockbox (LBX)
- Pump-Diode Driver (PDD)
- Reference Frequency Generation (RFG)

Eine funktionale Übersicht der entwickelten Module ist in Abbildung 10 gezeigt.

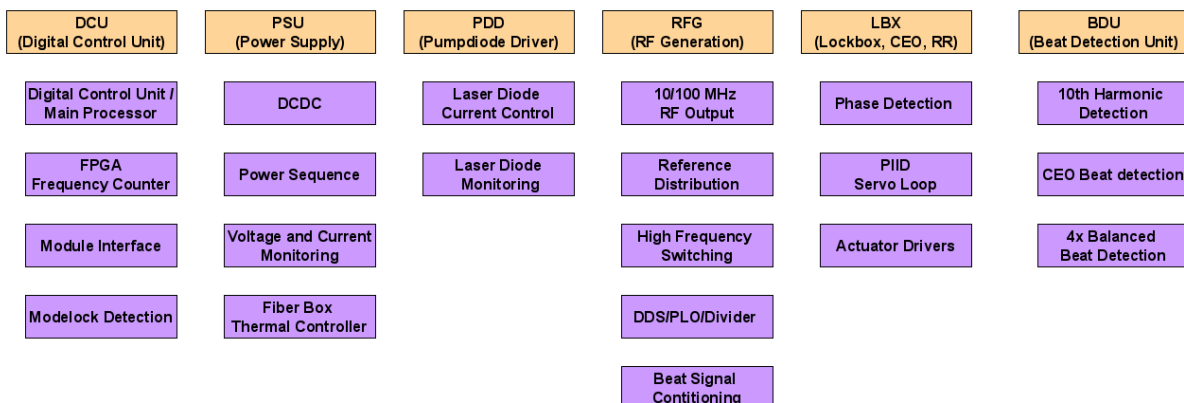
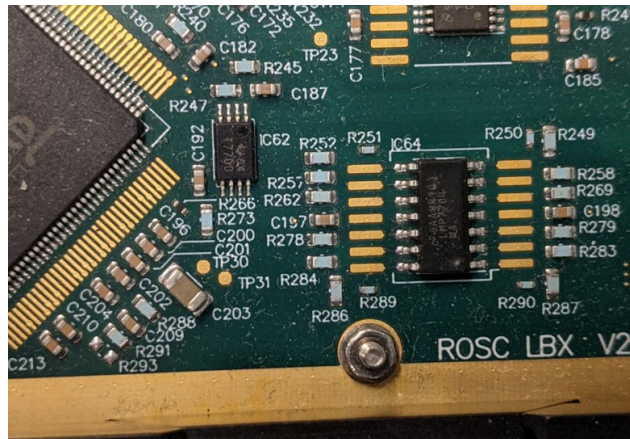


Abbildung 9: Funktionale Übersicht der Elektronikmodule.

- Zur öffentlichen Freigabe. Alle Inhalte sind urheberrechtlich geschützt. -

Diese Module wurden von Grund auf innerhalb des Projekts ROSC konzipiert und entwickelt, wobei auf kosteneffiziente, jedoch qualifizierbare Komponenten zurückgegriffen wurde. Die Designs wurden so ausgelegt, dass spätere Anpassungen an strahlungsharte oder für den Weltraumeinsatz qualifizierte Bauteile möglich sind.



**Abbildung 10:** Beispiel der Austauschbarkeit von Komponenten anhand des ROSC LBX Moduls. Die Footprints sind sowohl für die kommerziellen Komponenten, wie auch für die qualifizierten Komponenten vorhanden.

#### 2.1.3.1. Power Supply Unit (PSU)

Die PSU dient der Erzeugung der notwendigen Betriebsspannungen für das Frequenzkammsystem. Sie nimmt eine externe Eingangsspannung von um 28 V DC auf und wandelt diese in die erforderlichen Spannungen von  $\pm 15,5$  V und  $\pm 5,5$  V um. Diese Spannungen werden über eine Backplane an die anderen Module verteilt. Zusätzlich beherbergt die PSU den thermischen Controller für die Temperaturstabilisierung der Faserbox sowie einen Mikrocontroller (MCU) für Systemsteuerung, Startsequenzen und Leistungsüberwachung. Die DC/DC-Wandler werden sequenziell aktiviert, um einen sicheren und effizienten Systemstart zu gewährleisten.

#### 2.1.3.2. Digital Control Unit (DCU)

Die Digital Control Unit (DCU) ist das zentrale Steuermodul des Frequenzkammsystems und erfüllt eine Vielzahl essenzieller Aufgaben zur Überwachung und Steuerung des Systems. Nach dem Einschalten der externen Stromversorgung ist die DCU das erste Modul, das über die Power Supply Unit (PSU) mit Spannung versorgt wird. Sie initialisiert die semi-automatische Hochfahrsequenz des Systems und übernimmt dabei die Kommunikation mit der Bodenstation über einen On-Board-Computer (OBC). Für die Kommunikation mit dem OBC, bzw. Bodenstation, wird das PUS-Format der ESA eingesetzt.

Die DCU überwacht den Zustand des Systems und steuert so z.B. die Temperaturregelung, indem sie mit der PSU über den CAN-Bus kommuniziert. Sie kontrolliert die Funktionen der Pumpdientreiber (PDD) und überwacht den Modenlock-Status des Frequenzkamms. Dieser Status wird ebenfalls über den CAN-Bus an die Lockbox (LBX) kommuniziert, wobei automatisierte Routinen zur Auswertung der Signalpegel (RSSI-Werte) eingesetzt werden, um vollautomatisch in den stabilisierten Endzustand zu gelangen.

Ein zentraler Bestandteil der DCU ist ein FPGA-basiertes Hochleistungs-Frequenz-Zählsystem (Frequency Counter), das die fundamentalen Frequenzen des Frequenzkamms sowie die Beat-Signale zwischen Kammzähnen und (Rubidium) optischer Referenz überwacht. Die erfassten Messdaten können bei Bedarf

über den OBC im PUS-Format an die Bodenstation übermittelt werden, um anhand deren die Frequenzstabilität der Uhr zu charakterisieren (Allan Deviation).

Das fertig aufgebaute DCU-Modul ist in Abbildung 12 gezeigt.



Abbildung 11: DCU-Modul

#### 2.1.3.3. Lockbox (LBX)

Das LBX-Modul enthält die Phasenregelschleifen (Phase-Locked Loops, PLLs), die für die Stabilisierung der Pulswiederholrate und der Offsetfrequenz des Lasers zuständig sind. Es umfasst die Phasendetektion, PID-Kontroller und die erforderlichen Ausgänge für die Aktuatorsteuerung am Frequenzkammlaser.

Das Design des LBX wurde so entwickelt, dass es strahlungsharte Komponenten und moderne digitale Integratoren verwendet, um eine hohe Systemzuverlässigkeit und Präzision zu gewährleisten. Ein digitaler Integrator ersetzt den analogen Integrator der Regelschleifen, um die Stabilität und Anpassungsfähigkeit des Systems zu verbessern.

#### 2.1.3.4. Pump-Diode Driver (PDD)

Der Pump-Dioden-Treiber stellt die präzise Stromregelung für die Pumpdioden des Lasers bereit. Das Modul zeichnet sich durch eine ultra-rauscharme Stromregelung aus und verfügt über die folgenden Schnittstellen:

8× LD-Stromausgänge

8× LD-Monitor-Eingänge

8× LD-Temperaturmonitor-Eingänge

Das PDD-Modul wurde speziell innerhalb von ROSC entwickelt, um die Anforderungen an Weltraumtauglichkeit zu erfüllen. Es beinhaltet moderne Schaltungsdesigns, die eine hohe Effizienz und Stabilität gewährleisten.

#### 2.1.3.5. Reference Frequency Generation (RFG)

Die RFG-Einheit erzeugt und detektiert die notwendigen Referenzfrequenzen für die PLLs des LBX-Moduls. Sie umfasst:

- Master-Eingang (OCXO, 10 MHz)  
- Zur öffentlichen Freigabe. Alle Inhalte sind urheberrechtlich geschützt. -

- Repetitionsfrequenzeinstellung
- Einstellung der CEO-Frequenz
- Einstellung der Beat-Frequenz

Die Master-Taktfrequenz wird durch einen internen TCXO-Oszillator, oder ein externes 10 MHz-Signal bereitgestellt. Wenn der Frequenzkamm optisch auf die Rubidium-Referenz gelockt ist, liefert die RFG-Einheit ein hochstabiles 10-MHz-Uhrensinal.

#### 2.1.3.6. Leiterplattenmodule: Größe und Gewicht

Die typischen Abmessungen eines Elektronikmoduls betragen  $134 \times 163 \times 20$  mm, ohne Berücksichtigung von Steckverbindern, Verkabelung und Rahmen. Das typische Gewicht einer solchen Leiterplatte beträgt etwa 400 g. Die Module sind über eine Backplane miteinander verbunden.

#### 2.1.3.7. Thermisches Konzept der Leiterplatten

Die thermische Verbindung der Leiterplattenmodule erfolgt über ein Gehäuse mit einer Wärmeableitungsstruktur. Eine Aluminiumabdeckung auf der Oberseite jedes Moduls sorgt für zusätzliche thermische Stabilität. Dieses Konzept, das Kartenhaltertechnologien wie Wedglock verwendet, gewährleistet eine effiziente Wärmeabfuhr und erhöht die mechanische Stabilität der Module unter Schock- und Vibrationsbelastungen.

#### 2.1.3.8. Ergebnisse

Die Module wurden auf Basis kostengünstiger Komponenten entwickelt, die durch qualifizierte Alternativen ersetzt werden können. Die Schaltungslayouts wurden so gestaltet, dass beide Varianten unterstützt werden. Erste Tests der Module zeigten eine hohe Zuverlässigkeit und Funktionalität. Das überarbeitete thermische Design gewährleistet einen stabilen Betrieb auch unter den simulierten Bedingungen von Vakuum und Schwerelosigkeit. Die entwickelten Elektronikmodule bilden somit eine wesentliche Grundlage für die erfolgreiche Integration des Frequenzkammsystems in zukünftige Weltraummissionen.

### 2.1.4. Digitale Ansteuerung

Die digitale Ansteuerung des Frequenzkamms war ein zentraler Schwerpunkt des Projekts ROSC. Ziel war es, eine robuste und skalierbare Software-Architektur zu entwickeln, die den speziellen Anforderungen von Weltraummissionen gerecht wird. Dies umfasste unter anderem den Umgang mit instabilen Kommunikationsverbindungen, langen Systemlaufzeiten und begrenzten Hardware-Ressourcen.

#### 2.1.4.1. Architektur und Designprinzipien:

Die Architektur der digitalen Ansteuerung wurde unter Berücksichtigung der folgenden Zwänge und Anforderungen entwickelt:

##### 1. Instabile Bodenkommunikation:

Die Kommunikation mit Bodenstationen ist durch hohe Latenzen und mögliche Verbindungsabbrüche gekennzeichnet. Um diese Einschränkungen zu adressieren:

- Wurden Zeitüberschreitungen für Benutzerreaktionen vermieden.
- Das System wurde so konzipiert, dass es ohne kontinuierliche Überwachung oder Benutzereingriffe im automatischen Modus betrieben werden kann.
- Es wurden Mechanismen zur Zwischenspeicherung von Telemetriedaten und pessimistische Datenlink-Strategien implementiert, um Datenverluste zu minimieren.

##### 2. Lange Systemlaufzeiten:

Langzeitbetrieb erfordert robuste Maßnahmen zur Fehlerbegrenzung und -vermeidung. Dazu gehören:

- Zur öffentlichen Freigabe. Alle Inhalte sind urheberrechtlich geschützt. -

- Prävention von Speicherlecks, Zählerabweichungen und numerischer Instabilität durch eine rigorose Softwarevalidierung.
- Modularität der Software, um den Austausch fehlerhafter Komponenten einfach und schnell durchführen zu können.

### 3. Hardware-Ressourcen:

Die digitale Steuerung basiert auf einer Stern-Topologie, in der Tochterplatinen (DBUs) und die Digital Control Unit (DCU) über ein Feldbus-System verbunden sind. Restriktionen hinsichtlich Speicher, Rechenleistung und Stromverbrauch wurden im Software-Design berücksichtigt.

#### 2.1.4.2. Automatisierungs- und Kommunikationskonzept:

Das Frequenzkamm-System wird durch ein mehrschichtiges Automatisierungskonzept gesteuert, das sowohl manuelle als auch automatische Betriebsmodi unterstützt:

#### Betriebsmodi:

Nach dem Einschalten startet der Frequenzkamm im Bootloader-Modus. In diesem Zustand werden Konsistenzprüfungen durchgeführt, und Firmware-Updates sind möglich. Der Übergang in andere Betriebsmodi erfolgt über Telecommands:

- Soft-Off: Minimaler Energieverbrauch, bereit für Aktivierung.
- Manueller Modus: Direkter Zugriff auf Hardwareparameter für detaillierte Kontrolle.
- Standby-Modus (Automatisierungsebene): Automatische Steuerung, bei der das System selbstständig Zielzustände erreicht und aufrechterhält. Ein Wechsel zwischen manuellem Modus und Automatisierungsmodus ist jederzeit möglich.

Die Betriebsmodi sind in Abbildung 13 gezeigt.

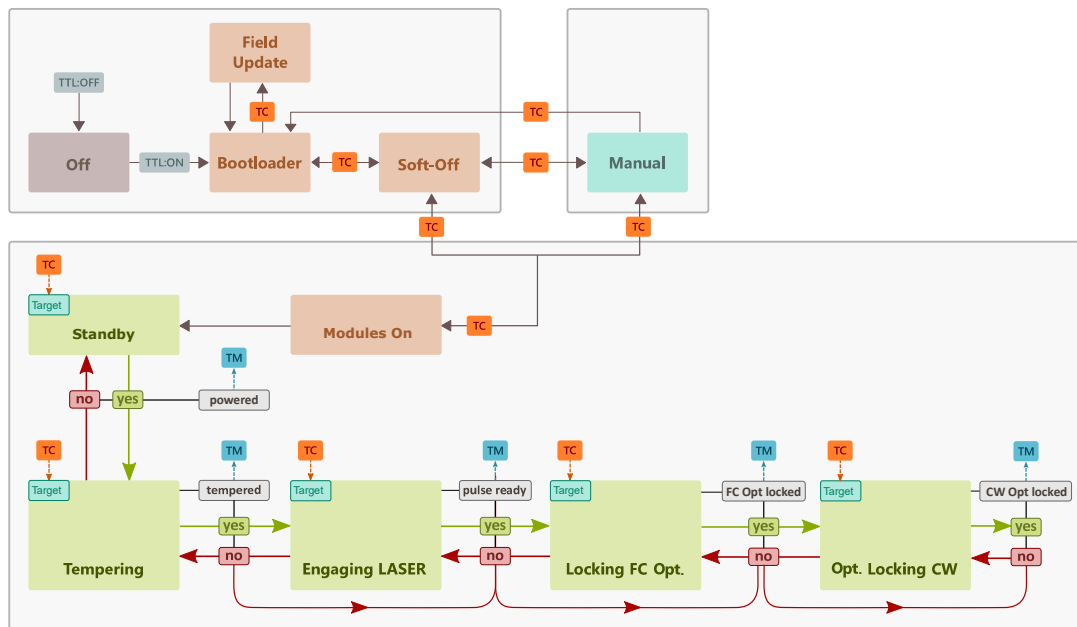


Abbildung 12: LTS-Verhaltensmodell der Betriebsmodi des Frequenzkamms und der automatisierten Steuerung.

#### Kommunikationsschnittstellen:

- Zur öffentlichen Freigabe. Alle Inhalte sind urheberrechtlich geschützt. -

Das System nutzt eine PUS (Packet Utilization Standard)-kompatible Kommunikationsschnittstelle, die mehrere Vorteile bietet:

- Effizienz und Flexibilität bei der Datenübertragung.
- Skalierbarkeit und Unterstützung einer Vielzahl von Anwendungen.
- Standardisierung für globale Kommunikationsanforderungen.
- Die primäre elektrische Schnittstelle umfasst Ethernet/TCP/IP und redundant UART/RS422 sowie zwei diskrete Telecommands für Soft-Reset und einen speziellen Service-Modus.

#### 2.1.4.3. Ergebnisse:

- Entwicklung einer robusten und ressourceneffizienten Softwareplattform für den autonomen Betrieb des Frequenzkamms.
- Implementierung eines skalierbaren Kommunikationskonzepts basierend auf PUS für maximale Interoperabilität und Effizienz.
- Nachweis der Funktionalität und Zuverlässigkeit der digitalen Ansteuerung in simulierten Missionsszenarien.

Diese digitale Kontrollarchitektur bildet die Grundlage für den zukünftigen Einsatz des Frequenzkamms in Satellitenmissionen und ermöglicht eine effiziente Anpassung an unterschiedliche Missionsanforderungen.

#### 2.1.5. Systems Engineering und Integration

Die Systemintegration bildete den abschließenden Schritt im Entwicklungsprozess. Hierbei wurden die einzelnen Komponenten (optisches Modul, Elektronikmodule und digitale Ansteuerung) zu einem Gesamtsystem zusammengefügt und getestet.

##### 2.1.5.1. Thermisches Konzept

Ein zentraler Aspekt der Integration des ROSC-Frequenzkamms war die Entwicklung eines effizienten thermischen Managements. Die Wärme, die im Betrieb des Systems entsteht, wird über ein speziell konzipiertes thermisches Reservoir abgeleitet.

- Der ROSC-Frequenzkamm ist über seine Bodenplatte an ein thermisches Reservoir gekoppelt, das kontinuierlich die vom System erzeugte Wärme ableitet.
- Zwei Peltier-Elemente, die an der internen Faserablage des Frequenzkamms angebracht sind, leiten die Wärme von ihrer heißen Seite in das thermische Reservoir ab.
- Das Reservoir kühlt zudem die Frequenzkamm-Elektronikmodule (FCE-Module), um eine stabile Funktion des Systems sicherzustellen.

Da die Effizienz der Peltier-Elemente mit zunehmendem Temperaturunterschied zwischen der heißen und der kalten Seite abnimmt, wurde der Betriebstemperaturbereich des Systems bewusst begrenzt. Dies ermöglicht eine effektive Thermalisierung der Faserbox bei vertretbarem Stromverbrauch und stellt sicher, dass das System unter Laborbedingungen und zukünftigen Missionsszenarien zuverlässig arbeitet.

##### 2.1.5.2. Systemtests und Validierung

Nach der Integration wurde das System umfangreichen Funktionstests unterzogen, um die thermische Stabilität und die Leistungsfähigkeit der Steuerungs- und Kommunikationsmodule zu überprüfen.

Thermische Tests:

- Überprüfung der Effizienz des Wärmemanagements unter simulierten Betriebsbedingungen. Siehe Abbildung 8.

- Zur öffentlichen Freigabe. Alle Inhalte sind urheberrechtlich geschützt. -

- Validierung der Temperaturstabilität der Faserbox und der Elektronikmodule.

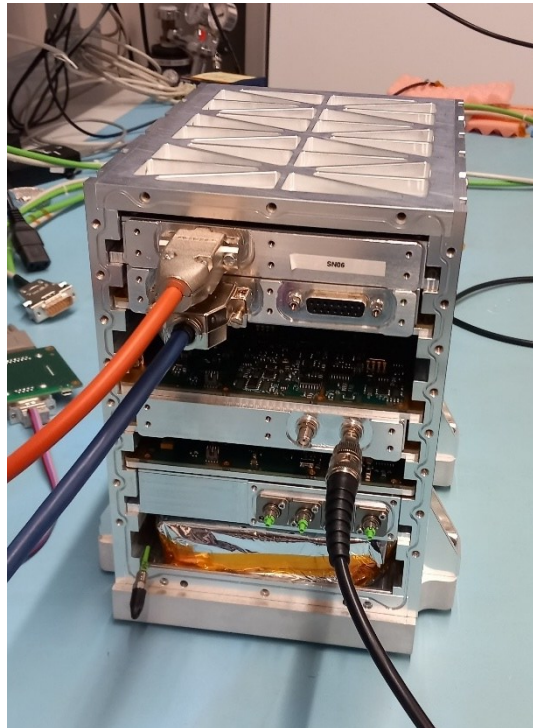
Elektrische Tests:

- Funktionstests der Steuerungssoftware in Kombination mit der Hardware.
- Überprüfung der Kommunikation und Signalverarbeitung zwischen den Modulen.

Ergebnisse:

- Der ROSC-Frequenzkamm wurde erfolgreich integriert und getestet.
- Das thermische Konzept erwies sich als effektiv, insbesondere hinsichtlich der Wärmeabfuhr über das thermische Reservoir und der Stabilisierung der Peltier-Elemente.
- Die mechanische und elektrische Integration wurde erfolgreich abgeschlossen, was eine solide Grundlage für die Weiterentwicklung des Systems hin zu einer möglichen In-Orbit-Verifikation bildet.

Die erfolgreiche Integration des ROSC-Frequenzkamms unterstreicht die Fortschritte in der Entwicklung eines robusten und weltraumtauglichen Systems und legt den Grundstein für zukünftige Anwendungen in der Raumfahrt.



**Abbildung 13: Integriertes ROSC-Frequenzkammsystem mit entfernter Frontplatte zur besseren Sichtbarkeit der einzelnen Module.**

#### 2.1.6. Zusammenfassung und Ausblick

Die Zuwendungen wurden effizient eingesetzt, um ein technologisch hochentwickeltes System zu entwickeln, das den Weg für zukünftige weltraumtaugliche optische Uhren ebnet. Die erzielten Fortschritte bilden die Grundlage für weitere Projekte, einschließlich einer möglichen In-Orbit-Verifikation und der Weiterentwicklung hin zu einem Flight Model.

Der erfolgreiche Abschluss von ROSC schafft die Voraussetzung für die Weiterführung in zukünftigen Projekten, wie z. B. COMPASSO und CRONOS.

Die entwickelten Technologien könnten in naher Zukunft in wissenschaftlichen Missionen und der Navigation Anwendung finden.

## 2.2. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die Entwicklung des ROSC-Frequenzkamms durch Menlo Systems als weltraumtaugliche Schlüsseltechnologie für optische Frequenzstandards stellte eine erhebliche technische Herausforderung dar. Sie erforderte umfangreiche finanzielle und personelle Ressourcen, die allein von Menlo Systems nicht vollständig bereitgestellt werden konnten. Die hohe Komplexität der Technologie machte eine Förderung essenziell, um die Durchführung des Projekts zu ermöglichen.

Die Arbeiten gingen weit über den damaligen Stand der Technik hinaus. Die wirtschaftliche Realisierbarkeit dieser Entwicklungen ohne Förderung war aufgrund des erheblichen technischen und wirtschaftlichen Risikos nicht gegeben. Die Unterstützung ermöglichte es Menlo Systems, innovative Lösungen zu entwickeln, die langfristig den Weg für weltraumtaugliche optische Uhren ebneten.

Alle beantragten Geräte, Komponenten sowie Software waren zu Projektbeginn nicht als Grundausstattung vorhanden. Sie wurden jedoch zwingend zur Erreichung der Vorhabensziele benötigt und wurden während der Vorhabenslaufzeit ausschließlich für die Erreichung der Vorhabensziele eingesetzt. Die von Menlo Systems durchgeführten Arbeiten waren essenziell für die Erreichung der Projektziele.

## 2.3. Voraussichtlicher Nutzen

Die im Rahmen des Projekts ROSC entwickelten Technologien, insbesondere das neuartige optische Frequenzreferenzsystem, stellen entscheidende Fortschritte auf dem Weg zu weltraumtauglichen optischen Uhren dar. Diese Entwicklungen bieten eine Vielzahl von potenziellen Anwendungen und langfristigen Nutzenperspektiven sowohl für wissenschaftliche als auch kommerzielle Bereiche. Das entwickelte System zeichnet sich durch eine deutliche Miniaturisierung sowie eine erhöhte Robustheit aus, wodurch die Einsatzmöglichkeiten auf weltraumtauglichen Plattformen erheblich erweitert werden. Es ist zudem in der Lage, unter rauen Umweltbedingungen wie Vibrationen, Temperaturzyklen und Strahlungseinflüssen stabil zu arbeiten. Dies stellt einen entscheidenden Schritt in Richtung Weltraumqualifikation dar, da das auf Basis des ROSC-Projekts entwickelte Design eine ideale Grundlage für eine zukünftige In-Orbit-Verifikation bietet.

Langfristig liefert ROSC eine Grundlage für die Weiterentwicklung hin zu flugqualifizierten optischen Uhren, die sowohl in wissenschaftlichen Missionen als auch in Navigation und Kommunikation Anwendung finden können.

## 2.4. Bekannt gewordener Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens

Es ist uns bis zum heutigen Zeitpunkt kein optischer Frequenzkamm bekannt, dessen Betrieb In-Orbit gezeigt und publiziert wurde. Dennoch wurden im Bereich der weltraumtauglichen optischen Frequenzkämme in den letzten Jahren bedeutende Fortschritte erzielt. China hat auf seiner Raumstation Tiangong einen optischen Frequenzkamm installiert. Obwohl spezifische Details und Berichte über diesen Einsatz begrenzt sind, zeigt dies Chinas Engagement in der Entwicklung fortschrittlicher Quantentechnologien für den Weltraum. Parallel dazu verfolgen die USA ähnliche Ziele und arbeiten an der Entwicklung von Frequenzkämmen für den Einsatz im Weltraum.

## 2.5. Erfolgte und geplante Veröffentlichungen

Im Rahmen des Projekts ROSC wurden mehrere Ergebnisse auf wissenschaftlichen Konferenzen und Veranstaltungen vorgestellt, die den aktuellen Stand der Forschung sowie die erzielten Fortschritte im Bereich weltraumtauglicher Frequenzkämme beleuchten. Die bisherigen Veröffentlichungen und Präsentationen umfassen:

- Zur öffentlichen Freigabe. Alle Inhalte sind urheberrechtlich geschützt. -

- Space Frequency-Comb for In-Orbit-Demonstration in Low-Earth-Orbit: Präsentation auf dem EPIC Meeting on Photonics at the Final Frontier bei der ESA am 13.–14. September 2022.
- Frequency-Comb for Space Missions: Vortrag auf der ION PTTI 2024.
- A Laser Frequency Comb for Space Missions: Vortrag auf der EFTF 2023
- ROSC – Rubidium Optical Space Clocks: Vortrag auf dem Nationalen Statusseminar „Forschung unter Weltraumbedingungen“, 4.–6. März 2020

Zusätzlich wurde ein Webinar gehalten, das über 100 Teilnehmer anzog und die technologischen Innovationen und Anwendungen von Frequenzkämmen im Weltraum beleuchtete.

### 3. Literaturverzeichnis

---

- <sup>i</sup> 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.
- <sup>ii</sup> T. Udem, R. Holzwarth, and T. W. Hänsch, "Optical frequency metrology," *Nature*, vol. 416, pp. 223–237, 2002.
- <sup>iii</sup> 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.
- <sup>iv</sup> 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.
- <sup>v</sup> M. Lezius et al., "Space-borne frequency comb metrology", *Optica*, vol. 1, pp. 1381 (2017).
- <sup>vi</sup> Lezius, et al., „Radiation tolerant frequency comb fiber laser for space applications," *Proc. SPIE 12777, ICSSO 2022, 127771Z* (12 July 2023)