

Abschlussbericht zu IRASSI-2 Phase 2

Zuwendungsempfänger: Menlo Systems GmbH	Förderkennzeichen: 50NA1819
Vorhabenbezeichnung: Infrarot Astronomie Satelliten Schwarm Interferometrie 2 Phase 2 (Teilprojekt AP6)	
Laufzeit des Vorhabens: Oktober 2018 – September 2019	

Änderungsverzeichnis

Datum	Version	Kürzel	Beschreibung
6.11.19	01	ML	Erstellung
28.1.20	02	ML	Korrekturen und Ergänzungen
29.4.20	03	WH	Ergänzungen
30.4.20	04	ML	Abschließende Korrekturen
04.05.20	05	RZ	Prüfer
05.05.20	Final	MF	Freigabe

Inhaltsverzeichnis

I.	Kurzdarstellung.....	3
I.1	Aufgabenstellung.....	3
I.2	Voraussetzungen	4
I.3	Planung und Ablauf des Vorhabens	5
I.4	Stand von Wissenschaft und Technik.....	7
I.5	Zusammenarbeit mit anderen Stellen.....	10
II.	Eingehende Darstellung	10
II.1	Verwendung der Zuwendung und des erzielten Ergebnisses im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele	10
II.1.A	Systemüberblick	12
II.1.B	Optikmodule.....	13
II.1.C	Analogelektronik	14
II.1.D	Digitalelektronik und Software.....	14
II.1.E	Auswertung der Distanzmessung.....	15
	Im Rahmen dieser Bewertung wurden unter anderem folgende Erkenntnisse gewonnen:	16
II.1.F	Initiale Marktanalyse von Entfernungsmess-Anwendungen	17
II.1.G	Gegenüberstellung von Zielen und Ergebnissen	18
II.2	Die wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises.....	19
II.2.A	Personalkosten (0837).....	19
II.2.B	Materialkosten (0813).....	19
II.2.C	FE-Fremdleistungen.....	20
II.2.D	Reisekosten	20
II.3	Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit.....	20
II.4	Nutzen und Verwertbarkeit.....	20
II.5	Sonstige Fortschritte auf dem Gebiet des Vorhabens	21
II.6	Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen des Ergebnisses	21
III.	Literaturverzeichnis.....	22
IV.	Verzeichnis der Abkürzungen.....	23

I. Kurzdarstellung

I.1 Aufgabenstellung

Das Verbundprojekt IRASSI-2-2 untersuchte im Anschluss an das Vorhaben IRASSI (50NA1325) und IRASSI 2-1 (50NA1713) die Möglichkeit eines weltraumbasierten MIR Teleskops basierend auf fünf Teleskopen, die als dynamischer Schwarm fliegen. Die Machbarkeit einer Nulling-Interferometrie zwischen den MIR-Teleskopen sollte dabei vertieft geprüft werden, damit am Ende der insgesamt drei aufeinander folgenden IRASSI Studien eine Verbund-übergreifende Missionsstudie den Raumfahrtagenturen für eine künftige L-Scale Mission vorgeschlagen werden kann. Das Verbundprojekt wurde wie in die Vorprojekte in einem Konsortium bestehend aus 4 Partnern durchgeführt. Menlo Systems ist dabei im Rahmen des AP1000 für die Verbund-Koordination zuständig, und im Rahmen von AP6000 für die weitere Entwicklung des Ranging-Systems basierend auf Frequenzkämmen. Für die Nulling-Interferometrie ist eine Abstandmessung zwischen den Einzelteleskopen mit einer Genauigkeit von besser als 1 μm zwingend erforderlich. Diese Genauigkeit sollte im AP6000 mit neuartigen Abstandsmessmethoden, basierend auf zwei optischen Frequenzkämmen, demonstriert werden. Im Projekt wurden fundamental neue Mess-Technologien untersucht, vor allem auch unter dem Aspekt, ob sie für den Einsatz in einem anspruchsvollen Satellitenformationsflugteleskop notwendig und geeignet sein könnten. Insgesamt stellt das Teilprojekt AP6000 einen zentralen Baustein für die Missionsstudie IRASSI dar. Der Einsatz von Doppelkammsystemen und von Mehrfachkammsystemen, lokalisiert auf mehreren frei zueinander beweglichen Satelliten, wurde unter verschiedenen Gesichtspunkten untersucht. In Bezug auf mögliche künftige Anwendungen wurden auch terrestrische Einsatzfelder in Betracht gezogen

Entsprechend dem Wunsch des FGG wurde IRASSI-2 in zwei sequentiell aufeinanderfolgende Einzelprojekte geteilt. Der vorliegende Bericht beschreibt dabei die zweite Phase von IRASSI-2, also IRASSI-2-2. Die Ziele des Projektes innerhalb des Verbundes waren für Menlo die Folgenden:

1. (1000) Koordination des Gesamtverbunds
2. (6100) Aufbau und Inbetriebnahme eines Elegant Breadboard (EBB).
3. (6200) Charakterisierung des EBB und Bestimmung der Performance im Labor und im Feld z.B. im Geodätischen Netzwerk in Neubiberg oder an der PTB.
4. (6300) Trade-off Analyse der Entfernungsmessung mit bestehendem Marktumfeld und Identifikation möglicher Anwendungen (Space und Terrestrisch).
5. Vermarktung der erarbeiteten Technologie gegenüber der DLR, ESA, und der Industrie.

Die Arbeitspaketstruktur des Projektes innerhalb des Verbundes stellte sich dabei wie folgt dar:

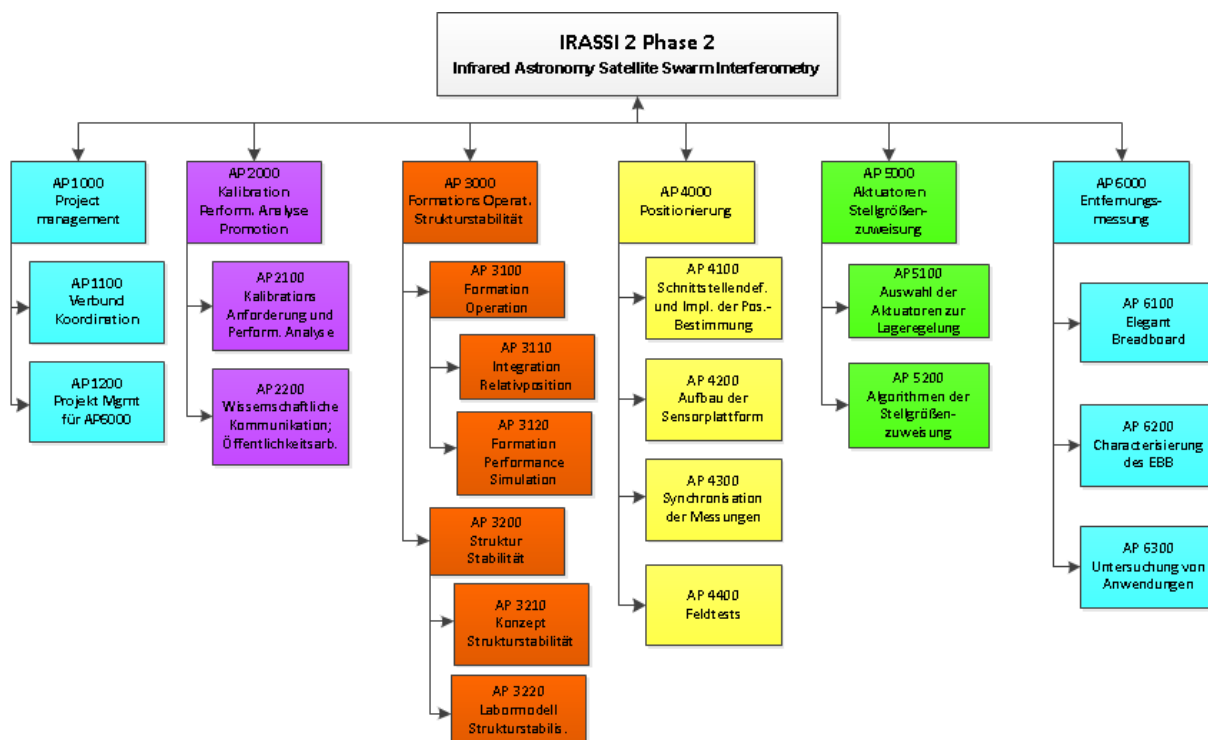


Abbildung 1: WBS-Struktur des Verbundprojektes IRASSI-2-2. Die Menlo Arbeitspakete waren AP6000 und AP1000

1.2 Voraussetzungen

Das unter IRASSI-2-2 beantragte Projekt wurde im Verbund mit dem Max-Planck-Institut für Astronomie in Heidelberg (AP2000), der Technischen Universität Braunschweig, Institut für Flugführung (AP5000), und der Universität der Bundeswehr München, Bereiche LRT 9.1 (AP3000) und 9.2 (AP4000), durchgeführt. Die Partner haben zeitgleich Förderanträge gestellt. Menlo stand zusätzlich als Koordinator des Verbundes gegenüber der DLR zur Verfügung (AP1000). Ziel des Verbundes war eine Missionsstudie über ein MIR-Formationsflugteleskop am Lagrange-punkt L2. Die Arbeitspakete waren dabei wie in **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** Abbildung 1 gezeigt festgelegt.

Die Eigenschaften eines Frequenzkamm-basierten Ranging Systems machen die Distanzmessung mit multiplen Frequenzkämmen im Vergleich zu bisherigen Lösungen deutlich überlegen. Eine Vielzahl von Einsatzgebieten macht diese Anwendung auch für den industriellen terrestrischen Einsatz interessant. Menlo Systems hat im Verlauf des Projekts parallel an weiteren Projekten über die Anwendung von Frequenzkämmen im Weltraum gearbeitet:

OPUS (50WM1343) hat zum Ziel, einen kompakten, energieeffizienten, und raketentauglichen Kamm für Testmessungen auf einer Höhenforschungsrakete zu entwickeln. Das Projekt beinhaltet Arbeitspakete zur Neuentwicklung von besonders verzugsarmen Freistrahloptiken, die Weiterentwicklung von Elektronik und die optische Referenzierung des Kammes mit einer Strontium-Strahlspektroskopie. Das Projekt bereitet Frequenzkämme schrittweise für eine In-Orbit-Verifikation vor. In diesem Zusammenhang wurde im Sommer 2019 zur weiteren Erhöhung der Technologiereife auch das Projekt ROSC gestartet.

Die Projekte IRASSI, FOKUS 1 und 2, OPUS und ROSC wurden thematisch, inhaltlich und finanziell unabhängig voneinander geplant. Gegenseitiger Einfluss ist daher vor allem durch personelle Engpässe bedingt, die zu Verzögerungen in den jeweiligen Projekten führten, wenn sich die Spezialisten für Weltraumanwendungen bei Menlo ausnahmsweise auf eines der Projekte konzentrieren mussten. Insgesamt konnten in den Jahren 2018-19 wegen personeller Engpässe nicht alle Projekte zu Weltraumkämmer ihre geplanten Ziele vollständig erreichen.

Im Gegensatz zur Entwicklung dedizierter Hardware in den Projekten FOKUS und OPUS stand bei IRASSI die Entwicklung einer Doppelkammbasierten Ranging-Applikation im Vordergrund. Die ursprüngliche Idee für diese Art der Messung basierte auf einer Publikation von Coddington, et al. (1). Die Messmethode ist besonders schnell, sie misst absolut, und eignet sich darüber hinaus um auf dem Laserlink diverse Referenzsignale und Daten zu übertragen.

I.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Die Aufgaben im Teilprojekt AP1000 bestanden im Wesentlichen aus der Koordination des Verbundes, einschließlich der Ausfertigung und Zirkulation des Konsortialvertrags, der Veranstaltung von Projekttreffen, der Teilnahme an verschiedenen Workshops der Explorer-Initiativen (veranstaltet durch die DLR), und der Organisation regelmäßiger Telekonferenzen. Das Teilprojekt AP6000 mit einer geplanten Gesamtdauer von 12 Monaten gliederte sich dabei in drei Arbeitspakete. Die Arbeitspaketstruktur ist in der untenstehenden Tabelle 1 zusammen mit den übergeordneten Arbeitspaketen der Verbundpartner dargestellt. Die Planung der Arbeiten der Verbundpartner wurde in Abstimmung mit Menlo so ausgerichtet, dass gegenseitige Abhängigkeiten weitgehend vermieden werden konnten. Die Einzelarbeiten der Partner sollten in das übergreifende Missionsdokument einfließen, das innerhalb des AP3000 verwaltet wurde. Dieses wurde aus IRASSI-2-1 fortgeschrieben und in IRASSI-2-2 weiter ausdetailliert und vertieft. Am Ende des 1-jährigen Projekts IRASSI-2-2 wurden vom Verbund verschiedenste Aspekte der Mission abschließend behandelt.

Verbundpartner	Geplante Arbeiten
Menlo Systems GmbH AP1000 und AP6000	Koordination des Gesamtprojektes Aufbau eines verbesserten Elegant Breadboard für hochgenaue Entfernungsmessungen im Labor und im Feld <ul style="list-style-type: none"> – Aufbau des EBB – Charakterisierung des EBB – Einsatz z.B. in einem Geodätischen Netzwerk bzw. an der PTB Trade-off Analyse der neuen Systemarchitektur für Anwendungsfälle <ul style="list-style-type: none"> – Satelliten Schwarm Interferometrie – Satellitenbasierte Gravimetrie – Terrestrische Anwendungen in der Produktion (Volumetrie) Terrestrische Anwendungen in der Geodäsie
Max-Planck Institut für Astronomie Heidelberg AP2000	Erforschung des Einflusses der Schwarm-Dynamik und -Navigation auf den Messprozess; Methoden zur Optimierung der zu erreichenden (u,v)-Abdeckung, Untersuchung der Aspekte der notwendigen Kalibration des Gesamtsystems (Fluss- und Phasenkalibration, astrometrische Kalibration) und diesbezüglicher Auswirkungen auf das Beobachtungskonzept, Erforschung des Einflusses der Unsicherheiten bei der Lageregelung und relativer Positionsmessung auf die Phasengenauigkeit bei der Korrelation, Performance-Evaluierung. Miteinbeziehung der wissenschaftlichen Gemeinschaft in die Ergebnisse der IRASSI-Studie über Wikipedia-Einträge, Pressemitteilungen, und v.a. mittels der Durchführung eines international besetzten Workshops zur FIR-Interferometrie im Jahr 2019

<p>Univ. der Bundeswehr München LRT 9.1 AP3000</p>	<p>Integration der relativen Positionsschätzung, so dass eine prädiktive Bewertung in den Regelkreis implementiert werden kann. Simulation der Formationsperformance, so dass die erreichbaren Genauigkeiten in der Basislinienschätzung ermittelt und mit den wissenschaftlichen Anforderungen für unterschiedliche Beobachtungszyklen und Orbit-Bedingungen verglichen werden können.</p> <p>Entwicklung einer Strukturkontrollmethode, die in der Lage ist, den sonst im Satelliten auftretenden Verformungen im Mikrometerbereich entgegenzuwirken. Ein erstes Strukturkonzept wird für den IRASSI-Fall angepasst, um die zu erwartende Performance zu simulieren und die thermischen Modelle werden über eine Versuchsanlage validiert.</p>
<p>Univ. der Bundeswehr München LRT 9.2 AP4000</p>	<p>In diesem Arbeitspaket werden Feldtests durchgeführt, um nachfolgende Aspekte zu beleuchten:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Im ersten Schritt wird die relative Positionsbestimmung evaluiert und verfeinert. Hierfür werden mithilfe von 2 Drohnen und 3 Festpunkten verschiedene Formationen simuliert. Siehe Abb.8 • Weiterhin wird die Hebelarmproblematik analysiert. Die Hebelarmproblematik ist auf die Genauigkeit der Referenzpunktbestimmung zurückzuführen, weil eine Änderung der Hebelarme zu einer Änderung der Referenzpunkte führt. In den Feldtests wird hierzu beispielsweise der Referenzpunkt des 5. Satelliten bewusst von der tatsächlichen Position versetzt betrachtet. Dadurch kann die Abhängigkeit der Genauigkeit des Hebelarms zur erzielten Genauigkeit der Basislinie ermittelt werden. • Im Weiteren wird die Genauigkeit der Positionsbestimmung im Fall von Abschattung getestet. Dies kann beispielsweise dadurch realisiert werden, dass zeitweise einzelnen Sensoren die Sicht zu den Anderen blockiert wird. <p>Außerdem wird die Stabilität des Algorithmus in Bezug zur Datumsproblematik untersucht. Simulationen haben gezeigt, dass eine ebene Anordnung der Formation zu Instabilitäten im Algorithmus führen. Deshalb wird in den Feldtests geprüft, für welche Formationsgeometrien Stabilität gegeben ist.</p>
<p>Technische Universität Braunschweig Institut für Flugführung AP5000</p>	<p>Es soll untersucht werden, welche am Markt verfügbaren Aktuatoren für die Lageregelung in IRASSI eingesetzt werden können. Für diese Aktuatoren sollen daraufhin Algorithmen recherchiert werden, welche für deren Ansteuerung genutzt werden können (Stellgrößenzuweisung). Diese sollen mit dem Lageregelungssystem von IRASSI so gekoppelt werden, dass die Anforderungen an die Lagegenauigkeit erfüllt werden können. Hierfür müssen die Algorithmen für die Ansteuerung gegebenenfalls modifiziert werden.</p>

Tabelle 1: Übersicht über die Arbeitspakete des Teilprojekts im Verbundprojekt IRASSI

In AP6000 sollte das innerhalb IRASSI-1 gezeigte Distanzmesssystem noch kompakter und feldtauglich aufgebaut und danach in seiner Performance charakterisiert werden. Grundlage war dafür eine Doppelkamm-Technologie, wie sie bereits zum Abschluss in IRASSI 2-1 auf einer kalibrierten Wegstrecke der PTB eingesetzt worden war. Die Auswertung der Distanz-Daten zeigte bei früheren Messungen noch Unstimmigkeiten, deren Ursache im Projekt eliminiert werden sollte. Die Genauigkeit der Wegstreckenmessung kann bei IRASSI direkt zurück fließen in die Performance des MIR-Teleskopes. Dazu muss der Frequenz/Zeit-abhängige Fehler der Längenmessung als Datensatz bzw. Näherungsformel erarbeitet und dem MPIA bereitgestellt werden. Die Längenmessung ist dabei sowohl für die Distanz zwischen den freifliegenden MIR-Detektoren wichtig, als auch für die Trilateration der Konfiguration, die nötig ist um die Winkel zwischen den Basislinien mit der erforderlichen Genauigkeit zu bestimmen. Im Laufe des Projektes IRASSI stellte sich nämlich heraus, dass auch die Lagebestimmung innerhalb der Formation von entscheidender Bedeutung ist, um die Position der MIR-Antennen im u-v-Raum der Korrelation korrekt zu bestimmen. Dies war letztlich nur

über die Basislinien möglich. Auch nach dem Abschluss von IRASSI 2-2 und den dort gewonnenen Erkenntnissen stellt allerdings die Lage im u-v Raum weiterhin eine große Herausforderung dar. Der Messung der Länge der Basislinien in AP6000 kommt daher eine besondere Bedeutung zu und das Arbeitspaket spielt eine entscheidende Rolle innerhalb des IRASSI Verbundes. Nachdem aber die Leistungsfähigkeit der Entfernungsmessung bereits unter Beweis gestellt wurde, ging es in IRASSI 2-2 vornehmlich darum, ein kompaktes möglichst autonomes Doppelkammsystem zu entwickeln, dass den Umweltbedingungen von Feldmessungen entsprechen sollte. Denn in diesem Zusammenhang sollten auch terrestrische Anwendungen für vergleichbare Systeme untersucht werden, um zusätzliche wirtschaftliche Verwertungspotential der Technik zu identifizieren. Zusätzlich dazu wurde in IRASSI 2-1 bereits eine umfassende Marktstudie begonnen, in der die Doppelkamm-Messung mit konkurrierenden Verfahren verglichen wird. Diese Marktstudie sollte in der Phase 2 fortgesetzt und abgeschlossen werden.

I.4 Stand von Wissenschaft und Technik

Eine Laserentfernungsmessung basiert entweder auf Laufzeitmessung, Phasenlagemessung, oder Lasertrilateration des Lichts. Sowohl Lasertrilateration als auch Laserinterferometer eignen sich hervorragend für kurze Entfernungen (10^{-6} ... 10^2 m), während die Laufzeitverfahren basierend auf Laserpulsen eher für große Entfernungen (10^{-3} .. 10^{11} m) Vorteile haben. Zu beachten ist, dass die Kohärenzlänge $l_c = \lambda^2/\Delta\lambda$ des verwendeten Lasers mit einer Wellenlänge λ stets größer sein muss als der maximal zu vermessende Abstand. Bei einer Laufzeitmessung wird ein zeitlich moduliertes Licht ausgesandt und dessen Reflexion empfangen. Über die Bestimmung der Laufzeit gegen die Lichtgeschwindigkeit wird dann die Distanz zwischen Quelle und Objekt ermittelt. Es gibt sowohl amplituden- als auch phasenmodulierte Laufzeitmessungen. Dabei werden prinzipiell auch sehr kurze (< 500 fs) Laserpulse verwendet.

Laufzeitmessungen finden ihre Anwendungen bei LIDAR, Satelliten-Distanzmessung, bzw. bei der TOF-Kamera mit einem Photomischdetektor. Die Phasenverschiebung des reflektierten Laserstrahls oder dessen Modulation gegenüber dem ausgesandten Strahl ist dabei entfernungsabhängig. Wird die optische Frequenz selbst zur Überlagerung genutzt, arbeitet das Gerät als Laserinterferometer. Laserinterferometer messen dabei primär keine absoluten Distanzen, sondern lediglich die relativen Änderungen bei einer Verschiebung des Objekts bzw. des Referenzspiegels. Bei Änderung der Weglänge wird die Überlagerung aus ausgesandtem und reflektiertem Strahl periodisch moduliert (Interferenz). Bei Verschiebung um eine halbe Lichtwellenlänge erhält man genau eine Intensitätsperiode. Zählt man die Durchgänge und multipliziert sie mit der Lichtwellenlänge, erhält man so die gesuchte Wegstrecke. Durch sorgfältige Auswertung des Signals und der Interferenzringe erreicht man Genauigkeiten von bis zu 1/1000 der Wellenlänge, das entspricht bei sichtbarem Licht wenigen nm. Typischerweise basieren solche Interferenz-Entfernungsmessungen auf Michelson-Interferometern. Die in der Präzisions-Entfernungsmetrologie bestehenden kohärenten optisch-interferometrischen Messverfahren arbeiten dabei mit frequenzstabilisierten Laserquellen und erreichen Distanzmessungen im Sub-Wellenlängenbereich (2) (3). Hochstabile und für den Weltraum geeignete Interferometer wurden insbesondere im Rahmen der Missionen LISA und LISA Pathfinder entwickelt, und demonstrierten sogar pm Genauigkeiten in der relativen Längenänderung. Solche Laser werden auch auf GRACE-FOLLOW-ON eingesetzt und können den bisherigen Mikrowellen-Ranger von GRACE in seiner Genauigkeit um Größenordnungen verbessern. Allerdings liegt der Eindeutigkeitsbereich bei $\lambda/2$, der Lichtstrahl sollte daher bei laufender Messung nicht unterbrochen

werden. Der Eindeutigkeitsbereich kann aber erweitert werden, wenn mehrere Wellenlängen, bzw. mehrere Laser, eingesetzt werden (siehe dazu MSTAR Verfahren (4) (5)). Die Genauigkeit von Laserinterferometrie wird unter terrestrischen bzw. atmosphärischen Bedingungen allerdings meistens durch Fluktuationen in der Dispersion der Luftsäule korrumpiert und erreicht oberhalb von 10 m selten Werte $< 1\mu\text{m}$.

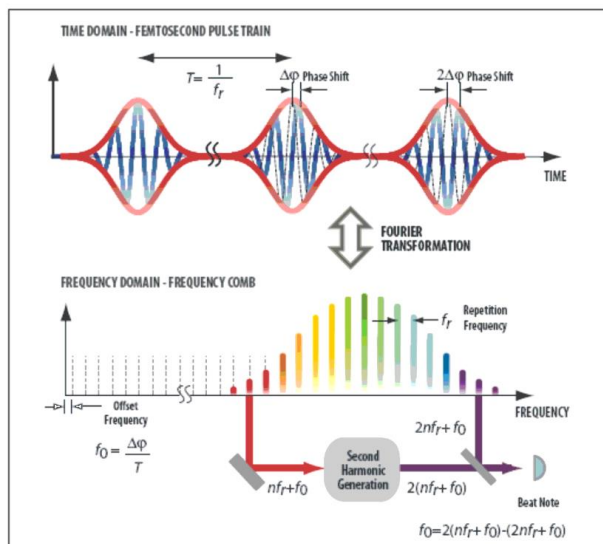


Abbildung 2: Der Frequenzkamm im Zeit- und Frequenzbild

Optische Frequenzkämme basieren auf modengekoppelten Femtosekundenlasern. Sie ermöglichen es, auf einfache Art und Weise die Frequenz von Lichtschwingungen zu zählen und haben die Präzisionsmetrologie in vielerlei Hinsicht revolutioniert. Frequenzkämme verknüpfen optische Frequenzen $> 100\text{ THz}$ mit Radiofrequenzen von MHz bis GHz. Sie stellen ein optisches Getriebe dar, das sozusagen als Uhrwerk für optische Uhren (= Uhren deren Unruhe mit $>200\text{ THz}$ schwingt) fungieren kann. Die Frequenz des Lichts kann phasenkohärent gegen die SI-Sekunde, welche durch die Cs-Atomuhr bei 9.2 GHz standardisiert ist, stabilisiert werden. Die grundlegende Idee jeder Messung mit Frequenzkämmen besteht darin, den Frequenzkamm als Lineal im Frequenzraum zur Vermessung von Differenzen zwischen optischen Frequenzen zu nutzen. Durch die eindeutig festgelegte Relation zwischen Wellenlänge, optischer Frequenz, und Lichtgeschwindigkeit ergibt sich damit auch der Zugang zur Weglängenmessung.

Bei einem Frequenzkamm weisen alle Frequenzkomponenten des optischen Spektrums den gleichen Abstand zueinander auf. Dieser ist gegeben durch die Pulswiederholrate f_R des Lasers (siehe Abbildung 2). Typische Werte von f_R liegen bei 10 MHz bis 10 GHz . Die Offsetfrequenz f_0 , die immer kleiner als die Repetitionsrate ist, definiert die Position des ersten (gedachten) Zinkens nahe 0 im Frequenzraum. Dabei ist f_0 typischerweise ungleich Null und stellt den Phasenschlupf zwischen der Einhüllenden des elektrischen Feldes der Pulse und dem oszillierenden Feld selbst dar. Sobald Offsetfrequenz und Pulswiederholrate bekannt oder geregelt sind, ist die optische Frequenz jeder einzelnen Zinke (mit der ganzzahligen Modenzahl n) absolut bestimmt und kann mittels der Kammgleichung berechnet werden. Die Frequenz einer Zinke mit der Modenzahl n ist dann gegeben durch $f_n = (n \cdot f_R + f_0)$. Der Vergleich einer gegebenen optischen Frequenz eines zu vermessenden Lasers mit der im Frequenzspektrum nächstliegenden Zinke des Frequenzkammes erfolgt dann über eine heterodyne optische Schwebungsmessung. Alle für die Bestimmung einer optischen Frequenz zu messenden Frequenzen

liegen damit als Radiofrequenzen vor und können mit Standardelektronik bzw. Frequenzzählern ausgewertet werden.

In einer vorhergehenden ESA Studie (Menlo-ESTEC Contract No. 20184/06/NL/HE (2007-9)), wurde der Einsatz von Frequenzkämmen für Abstandsmessungen schon einmal theoretisch untersucht. Prinzipiell wird mit Frequenzkämmen die zu messende Distanz mit Hilfe der absolut vorgegebenen Lichtgeschwindigkeit auf eine optische Frequenz zurückgeführt. Für die absolute Messung von Entfernungen könnten alternativ auch ultrakurze Pulse in Form einer Laufzeitmessung benutzt werden (6). Dabei wird in der Regel jedoch nur eine Auflösung von $> \lambda$ erreicht. Das liegt daran, dass Laserpulse mit 10-500 optischen Oszillationen überlagert und korreliert werden müssen. Der Schlüssel zum Einsatz der Frequenzkamm-Technologie bei der Distanzmessung ist hingegen, dass dabei die genau bekannte große Kohärenzlänge der Einzelmoden des Kammlasers mit einer präzise zeitlich abgestimmten, ultrakurzen Pulsfolge verbunden werden kann (7). Auf diese Weise ist es möglich, mit Frequenzkämmen bei hohen Abtastraten Messgenauigkeiten zu erreichen, die bei 100 km Distanz zumindest theoretisch immer noch besser als nm sein kann. Gleichzeitig kann dabei ein Zeit/Frequenz Austausch oder auch eine Datenübertagung stattfinden.

Insgesamt gibt es vier Möglichkeiten um mit optischen Frequenzkämmen Distanzen zu messen:

1. Flugzeit (6),
2. Interferometrische Autokorrelation (8),
3. spektrale Interferenz (9) ,
4. Doppelkamm-Interferometrie (10) (1).

Diese Varianten wurden von Menlo Systems in ihrer Performance in einer anschließenden Studie (FKZ 03G0729F, BMBF Verbundprojekt FE III: Satellitenmissionen - Zukunftskonzepte für Schwerefeld-Satelliten-Missionen, 11.8.2010-11.8.2012) untersucht. Für Formationsflüge erschien Variante 4 besonders vielversprechend.

Im Vorgängerprojekt IRASSI (FKZ 50NA1325) flossen diese Voruntersuchungen in den Aufbau eines realen Demonstrators ein. Im Projekt wurde ein Doppelkammsystem aufgebaut, und dessen Messgenauigkeit in Echtzeit auf einer kalibrierten Mess-Strecke der PTB im März 2017 demonstriert. Bei Flugzeitmessungen wurde eine Genauigkeit von $< 1\mu$ innerhalb 1 ms erreicht (Abbildung 5) und bei der interferometrischen Messung konnten Genauigkeiten von < 80 nm innerhalb 1 ms gezeigt werden. Die Besonderheit der in IRASSI durchgeführten Distanzmessung lag vor allem in der Echtzeitauswertung der Daten, die mit einer hohen Abtastrate von bis zu 10 kHz erfolgt sind. Die Auswertung der Daten wurde dabei in einer FPGA-Einheit durchgeführt. Das an der PTB eingesetzte Mehrkammsystem war allerdings kein kompaktes System wie ursprünglich vorgesehen, sondern ein besonders rauscharmes optisch gelocktes Doppelkammsystem. Insgesamt konnte mit dem Projekt der technische und wissenschaftliche Stand der Distanzmessung mit sehr rauscharmen Kämmen aber deutlich erhöht werden, und es wurde im Vergleich mit dem kompakten System festgestellt, dass für Präzisionsentfernungsmessungen ein optisches Lock der Frequenzkämme zwingend notwendig ist. In einem parallellaufenden Projekt (FOKUS 2, 50WM1343) wurde zusätzlich dazu ein miniaturisiertes Doppelkammsystem aufgebaut, das für den Einsatz auf einer Forschungsrakete (Launch November 2017) konzipiert war, und das bereits viele Anforderungen an ein satellitentaugliches System erfüllt. Das FOKUS 2 Optikmodul ist kleiner als 1 l und die Elektronik benötigt weniger als 70 W Leistung für den Betrieb. Allerdings wurde das FOKUS 2 System bisher noch nicht optisch gelockt. Die dafür

notwendigen Designänderungen wurden im Projekt IRASSI 2-1 erarbeitet und sollten in vorliegenden Projekt IRASSI 2-2 in Form eines EBB realisiert werden.

I.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Es gab in allen Phasen des Projektes eine sehr intensive, kreative, und erfolgreiche Zusammenarbeit mit den Projektpartnern des Verbunds. Über AP1000 wurden die koordinierenden Arbeiten durchgeführt: Organisation von Projekt-Treffen und verbundweite Telekonferenzen, die alle 14 Tage mit den involvierten Wissenschaftlern und Studenten abgehalten wurden. Die Präsentationen und Protokolle wurden gesammelt und auf einer Sharepoint-Website dem DLR, den Partnern und der Agentur zur Verfügung gestellt. Das Projekttreffen fand in München an der Universität der Bundeswehr statt, am 2.4.-3.4.2019. Darüber hinaus gab es zwei Treffen am DLR, das Kick-off am 10.11.18, und das Final Review am 24.9.19. Die Kommunikation zwischen den Projektpartnern und der DLR verlief meistens über den Projektkoordinator Menlo Systems. Die Zusammenarbeit zwischen den Projektpartnern wurde über einen Konsortialvertrag geregelt, der von Menlo in enger Abstimmung mit den Partnern erarbeitet wurde und sich an den Vertrag aus IRASSI-1 und IRASSI 2-1 anlehnte.

Das koordinierende Arbeitspaket AP1000 war für das Projektmanagement zwingend erforderlich und konnte zum Erfolg des Gesamtprojekts beitragen. Bedingt durch die Aufgabenstellung war eine ständige partnerschaftliche Zusammenarbeit für das Erreichen der Verbundziele notwendig und auch von vornherein im Antrag festgelegt, dies hatte sich bereits in den IRASSI Vorgängerprojekten bewährt.

Mit allen Partnern wurden insbesondere bei den regelmäßigen Telekonferenzen und auch bei den Projekttreffen lebhaft Diskussionen über die grundlegenden Technologien von IRASSI geführt.

Die fachliche Diskussion mit den Kollegen des MPIA, der UniBW und der TU-BS, aber auch mit dem Projektträger DLR und den Programm-Managern führte zu wichtigen Denkanstößen, die letztlich dem Projektgesamtergebnis zugutekamen.

Die gegen Ende von IRASSI vorgenommenen zweiwöchigen Validierungsexperimente an der PTB Braunschweig, Abteilung AG5.2 (Dr. Bosse, Dr. Pollinger, Dr. Meyer) wurden weiter ausgewertet. Es stellte sich heraus, dass die Messgenauigkeit des Systems allen Anforderungen des Projekts, und darüber hinaus genügt. Die wissenschaftlichen Projektmitarbeiter(innen) Dr. K. Beha und Dr. W. Hänsel haben in den Diskussionen zusätzliche Kompetenzen über Distanzmessungen an Luft und unter Konvektion erworben die sich insgesamt positiv auf das Erarbeiten von künftigen terrestrischen Applikationen auswirken. Die Zusammenarbeit mit der PTB soll in Zukunft in Bezug auf die Entwicklung von Distanzmessungen weiter gepflegt werden.

II. Eingehende Darstellung

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

Die Zuwendung wurde dazu verwendet, das Projekt wie in I.5 beschrieben zu koordinieren und zu dokumentieren (AP1000), sowie um ein laserbasiertes Distanzmess-System aufzubauen (AP6000) und zu verbessern.

Im Rahmen von AP1000 wurde der Konsortialvertrag mit den Partnern erarbeitet, zweiwöchentliche Telekonferenzen mit den Partnern durchgeführt und in Protokollen festgehalten. Des Weiteren wurde

ein 2-tägiges Projekttreffen veranstaltet (2.4.-3.4.19), an dem sich die Projektpartner aufeinander abgestimmt haben und in denen zentrale Fragen des Gesamtsystems, der Technologien, und der Formation diskutiert wurden. Dieses Arbeitstreffen fand an der Universität der Bundeswehr statt. Darüber hinaus wurde drei weitere Treffen mit der DLR durchgeführt (Kick-off 9.11.18, Explorer Initiativen (20.-21.11.18), und Final Review 24.9.19), in denen über den Stand der Forschung gegenüber der DLR bzw. der Community berichtet wurde. Die Kommunikation zwischen dem FGG und den Projektpartnern erfolgte über den Projektkoordinator. Wie in I.5 ausgeführt wurde, fand im Rahmen des AP1000 die Abstimmung und Koordination des wissenschaftlichen Diskurses zwischen den Partnern statt. In AP1000 fand darüber hinaus auch das Projektmanagement für AP6000 statt.

In AP6000 wurden die in den Vorprojekten gewonnenen Daten des Demonstrators einer tiefergehenden Analyse unterzogen. Dabei wurden geringfügige Fehler in den Algorithmen gefunden und in der Folge verschwand auch eine bis dahin nicht erklärbare Abweichung zu der Kalibration, die ursprünglich mit zunehmender Distanz anstieg. Die Performance der Doppelkamm-Messung wurde mit dem verbesserten Algorithmus weitgehend unabhängig vom Abstand, mit der Einschränkung, dass auch die Kalibrierung für große Abstände unter atmosphärischen Bedingungen aufgrund von Turbulenzen immer schlechter wird. Im Weltraum wird die Messung allerdings nicht durch atmosphärische Turbulenz gestört, daher stellt die erreichte Genauigkeit ein rein terrestrisches Limit dar, das für Weltraumanwendungen nicht gilt. Insgesamt konnte eine Genauigkeit von 10 nm bei 10 ms Messzeit und einer Distanz von 20 m gezeigt werden. Für längere Zeiten wurde das Ergebnis deutlich schlechter, weil atmosphärische Störungen die Messung deutlich beeinträchtigen. Die in den Vorstudien mit einem Digitizer durchgeführte Messung war allerdings in den Vorprojekten noch nicht in Echtzeit möglich. Dazu musste der Algorithmus vollständig auf eine FPGA umgesetzt werden. Dieser Schritt wurde im Sommer 2019 vollzogen, und es konnte die gleiche Messtechnik wie aus IRASSI und IRASSI 2-1 im vorliegenden Projekt dann auch in Echtzeit demonstriert werden.

In AP6100 wurde der Demonstrator aus IRASSI-1 aufbauend auf einer Systemarchitektur aus IRASSI 2-1 in Hardware umgesetzt. Das im Vorprojekt entworfene System bestand aus einer kompakten, transportablen 19“ 3HE Doppelkammeinheit, kombiniert mit einem 4-Kanal DDS und einem schnellen Digitizer für die Echtzeitauswertung der optischen Daten. Zwingend erforderlich erschien für das EBB eine rein optische Referenzierung mit einem rauscharmen CW Laser anstatt wie vorher mit einer Radiofrequenzuhr. Die Verbesserung des IRASSI-Lasersystems erforderte eine Überarbeitung des Designs und der Elektronik aus IRASSI und FOKUS in verschiedenen Punkten, welche diverse Aspekte des Systems betrafen, insbesondere die Kammaktoren, die Photodetektion, die Bandbreite der Regelkreise des optischen Locks, den Freistrahlbereich des Oszillators und das Systemhousing, und die Software und Datenauswertung

Die Umsetzung der Definition einer so verbesserten Systemarchitektur war Ziel in dieser Phase des Projekts. Leider kam es durch interne und externe Lieferverzögerungen und durch den Verlust zweier wichtiger Mitarbeiter im Jahr 2019 zu erheblichen Verzögerungen bei dem Aufbau des EBB, die innerhalb der kurzen Projektlaufzeit von 12 Monaten und dem straffen Zeitplan nicht mehr abgefangen werden konnten. Das EBB konnte daher nicht vollständig fertig gestellt werden. Eine Verlängerung des Projekts wurden zunächst noch diskutiert, aber gegen Ende September 2019 verworfen. Es ist aber beabsichtigt, den im Verlauf des Projekts aufgebauten und zu 80% fertiggestellten Demonstrator in den kommenden Monaten noch abzuschließen.

In AP6200 wurde mangels des funktionalen EBB die Echtzeit Software-Entwicklung mit einem bestehenden Großgerät, das bereits an der PTB erfolgreich in IRASSI eingesetzt wurde, vorangetrieben. Auch in diesem AP wurden allerdings die Herausforderungen der FPGA Programmierung bei der Planung unterschätzt und es gelang nur unter erheblichem zusätzlichem Zeitaufwand eine Umsetzung des Auswerte-Algorithmus auf die FPGA Plattform. Die dabei erarbeiteten Erkenntnisse sind aber von großer Bedeutung für die Doppelkamm-Spektroskopie und deren künftige Anwendung.

Insgesamt wurde aber von der Konstruktion und vom Systemaufbau ein Doppelkammsystem in 3HE, 19“ erreicht. Zuvor wurde bereits im Projekt FOKUS-2 ein raketenflugtaugliches Doppelkammsystem mit einem Volumen von <10l demonstriert. Und es wurde auf den Flugmissionen der COMET / CHAM-F Kampagne gemeinsam mit dem DLR-IPA gezeigt, dass solche Frequenzkämme unter den harschen Bedingungen eines Fluges mit erheblichen Vibrationen und Druckänderungen erfolgreich betrieben werden können (und dort einen LIDAR Laser kalibrieren können). Der auf COMET eingesetzte Kamm entsprach einem frühen IRASSI Design. Die neuen Erkenntnisse aus IRASSI 2-2, bezüglich dem Systemdesign, der Software, der Messdatenanalyse und der Echtzeitauswertung sind aber von hohem Wert für die künftige Umsetzung eines Doppelkambasierten kompakten Rangingsystems, dass auch Anwendungen und Bedingungen im Feld gerecht wird.

Zusätzlich wurde eine Marktstudie abgeschlossen, die in IRASSI 2-1 begonnen wurde, und in der die verschiedenen weltweit bestehenden Distanzmesstechnologien miteinander verglichen wurden. Besonders relevante Kriterien waren Genauigkeit, Geschwindigkeit, Distanz, Kosten, patentrechtliche Beschränkungen. Als Ergebnis dieser Marktstudie kann zusammenfassend festgestellt werden, dass die Doppelkamminterferometrie verschiedene Alleinstellungsmerkmale besitzt:

1. Großer Eindeutigkeitsbereich
2. Gleichzeitige Bewertung der Luftsäule durch eine Spektroskopie möglich
3. Hohe Relativgeschwindigkeiten bei der Messung
4. Erhebliche Reichweite bei guter Genauigkeit
5. Zusätzliche Zeit- und Datenübertragung wäre möglich
6. Zusätzlich Übertragung einer optischen Referenz wäre möglich

Die so herausgearbeiteten Vorteile gilt es bei der Realisierung künftiger terrestrischer Anwendungen einer Doppelkamminterferometrie zu nutzen. Parallel dazu wurden auch die Möglichkeiten der Doppelkamm-Spektroskopie der Luftsäule untersucht und die bestehende Anlage auf diesen Aspekt hin optimiert. Dies ist entscheidend für die in-situ Bewertung der Luftsäule während der Distanzmessung.

II.1.A Systemüberblick

Ein Doppelkammsystem besteht aus zwei separat betriebenen Kämmen, die zueinander mit einer festen Phase referenziert sind. Dies geschieht entweder über eine RF Referenz (10 MHz) oder über eine optische Referenz (1542 nm, ggf. Resonator stabilisiert). Einen Überblick über die Systemarchitektur zeigt die Abbildung 3.

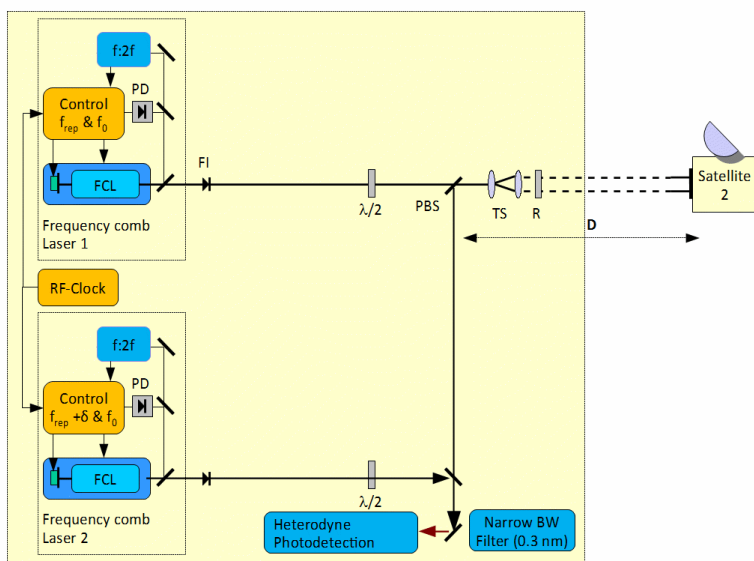


Abbildung 3: Blockdiagramm des Doppelkammsystems für Abstandsmessungen. Statt der RF-Clock kann auch eine optische Referenz eingesetzt werden.

Die zwei Kämmen bestehen jeweils aus einem fs-Faseroszillator und einem fs-Faserverstärker. Dabei wurden Erbium-dotierte polarisationserhaltende Fasern eingesetzt, die mit 980 nm Diodenlasern gepumpt werden. Beide Frequenzkämme werden danach über Faserkoppler miteinander verbunden. Dabei gibt es einen „Messkamm“ und einen „Referenzkamm“. Der Strahl des Messkamms wird zum Objekt geschickt, von dort reflektiert, und nach seiner Rückkehr wieder mit sich selbst und dem Referenzkamm heterodyn überlagert. Zusätzlich wird im Messstrahl noch ein Referenzsignal durch eine partielle Reflexion erzeugt. Von beiden Reflexionen wird mit dem zweiten Laser ein asynchrones Signal erzeugt, bei dem immer dann eine heterodyne Überlagerung der Laserpulse auf einem Detektor stattfindet, wenn sich die Femtosekunden-Laserpulse beider Laser zeitlich überlappen. Ein schneller Digitizer, der auf die Pulswiederholrate des Referenzsystems getriggert wird, führt eine AD-Wandlung des dabei erzeugten Photodiodensignals mit einer 14 Bit Auflösung durch. Anschließend erfolgt dann die Echtzeitauswertung der Signale in einer FPGA mit der Berechnung des Abstands.

II.1.B Optikmodule

Die Optikmodule wurden gegenüber der ersten Generation erheblich überarbeitet um einen verzugsfreien Aufbau zu gewährleisten und den Aufbau insgesamt besser an die Pumpdioden und Detektoren anzubinden. Dieser Aufbau ist sehr zeitaufwändig und muss von Optik-Spezialisten durchgeführt werden. Verschiedene mikrooptische Bauteile werden mit UV-Kleber in ein verzugsfreies Trägermodul geklebt, wobei möglichst dünne Klebefilme die Verzugsfreiheit gewährleisten sollen. Die Endklebung wird nach der Justage im laufenden Betrieb mit einem Präzisionsgreifarm durchgeführt. Im Vergleich zu FOKUS sind bei dem hier gewählten Aufbau der Kammoszillator und der Verstärker mit dem f-2f voneinander getrennte Einheiten. Dies hat den Vorteil einer besseren Wartung und Charakterisierung der Einzelmodule. Beide Oszillatoren mit Vorverstärkern wurden für das System fertig gestellt und auf einer Oszillatorplattform montiert. Die Verstärker mit dem Waveguide als f-2f Interferometer konnten allerdings in der Projektlaufzeit nicht mehr vollständig abgeschlossen und getestet werden.

II.1.C Analogelektronik

Bei der Analogelektronik wurden neue Lockboxen entwickelt und aufgebaut, die für die erforderliche Bandbreite für ein optisches Lock geeignet sind. Als DDS wurde eine kommerzielle Platine eingesetzt. Zusätzlich werden noch Thermocontroller für die Oszillatoren eingesetzt, um die Pulswiederholrate der Oszillatoren zu stabilisieren. Die Pumpdioden befinden sich auf Pumpmodulen in der Optikeinheit, damit die Faserwege zu den Lasern möglichst kurz und somit unanfällig gegenüber Vibrationen sind.

II.1.D Digitalelektronik und Software

In den Systemen wird zur Steuerung eine ARM basierte Embedded Plattform eingesetzt, die auch das Interface mit dem Benutzer bzw. einen Netzwerkzugang bereitstellt. Die Plattform wurde in den vergangenen Jahren bei Menlo entwickelt und für verschiedene Anwendungen eingesetzt. Allerdings bedeutet bei dem vorliegenden Embedded-System jede Änderung der Hardware, also der angesteuerten Elektronik-Module, einen nicht unerheblichen Aufwand bei der hardwarenahen Programmierung. Dafür müssen die CAN und SPIA Controller auf den Modulen korrekt angesprochen werden.

Mit Änderung der Elektronik ändert sich immer auch die Benutzerschnittstelle. Im Fall von IRASSI-2-2 müssen noch zusätzlich zwei Kämmen miteinander phasenstabil verkoppelt werden, wofür ein DDS vom Benutzer über die serielle Schnittstelle angesteuert werden muss. Auch die Zustandsmaschinen der Kämmen, die für den automatisierten Start und Betrieb sorgen, müssen neu entworfen und programmiert werden. Die digitale Ansteuerung konnte nicht fertig gestellt werden, da das Gesamtsystem bis Ende der Projektlaufzeit nicht betriebsbereit war.

Eine erste Echtzeit-Datenauswertung wurde bereits in IRASSI demonstriert. In dem Anschlussprojekt hatten wir uns in Phase 1 darauf konzentriert, eine genauere Auswertung mit einer nachgelagerten Datenauswertung mittels Python-Skript zu entwickeln. In der Phase 2 wurde nun diese Datenauswertung auf eine FPGA zur Echtzeitauswertung übertragen. In einem iterativen Vergleichsprozess zwischen der Python-Auswertung und der FPGA-Auswertung gelang es, Fehler bei der Übertragung der Formeln und beim Timing zu lokalisieren und zu korrigieren, mit einem überzeugenden Ergebnis.

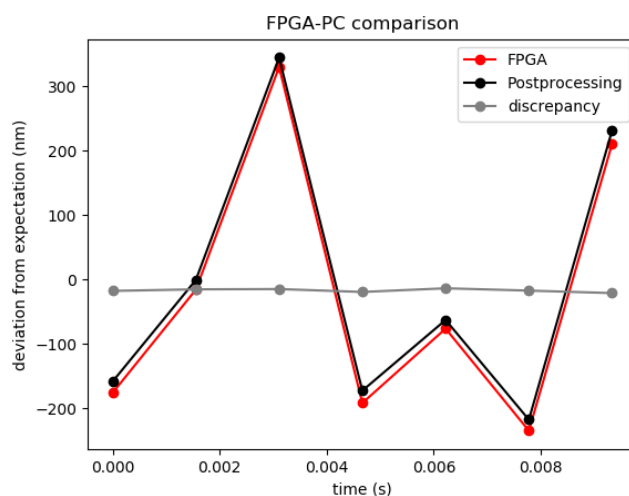


Abbildung 4: Vergleich von Echtzeitauswertung (FPGA) und nachgelagerter Auswertung per Computerprogramm (Postprocessing). Die Schwankungen erklären sich durch Vibrationen während der Messungen. Die beiden Auswertungen stimmen im erwarteten Rahmen überein.

II.1.E Auswertung der Distanzmessung

In IRASSI-2-2 wurden entgegen der ursprünglichen Planung weder kalibrierte Abstandsmessungen noch Feldstudien durchgeführt. Stattdessen wurden Daten aus IRASSI-1 ausgewertet und Algorithmen getestet. Die Messtechnologie selbst wurde im Abschlussbericht von IRASSI beschrieben.

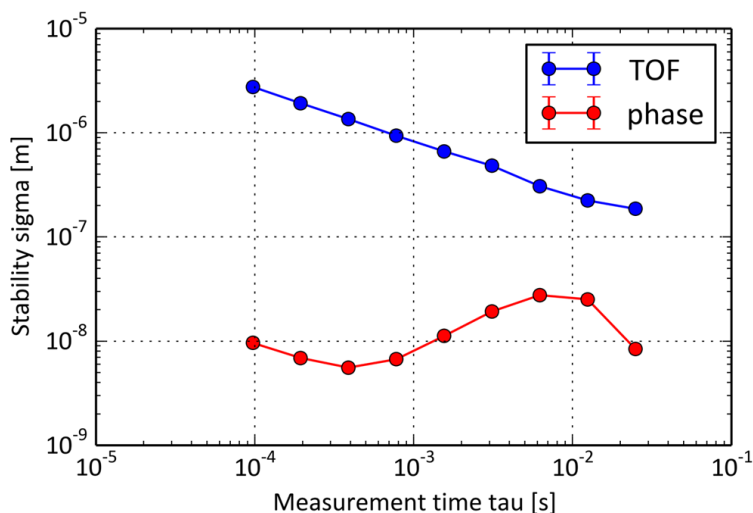
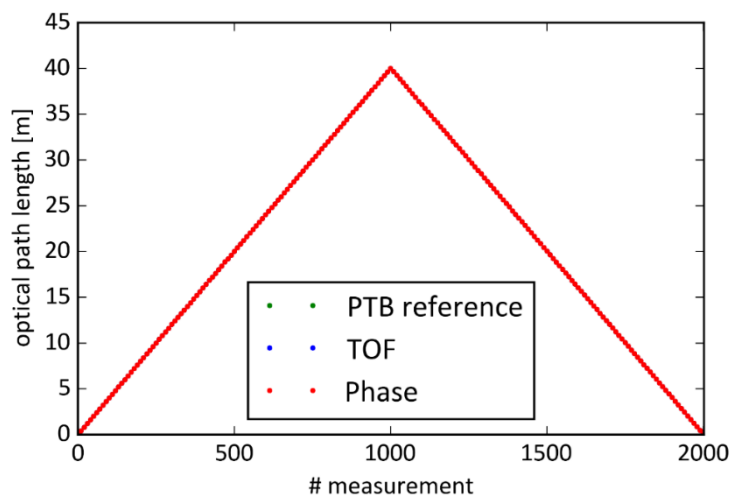


Abbildung 5: Präzision einer Doppelkamm-basierten Distanzmessung. Die Kämmen wurden optisch gelockt. Ab 100 ms unterschreitet die Messgenauigkeit $\lambda/6$ und damit die für die Auflösung der Ambiguität notwendige Schwelle. Die Genauigkeit der Phasenmessung nimmt ab 1 ms wieder zu, weil Vibrationen und Turbulenzen in der Luft im Zeitfenster 1 ms – 10 ms besonders prominent sind.

Die Messdaten wurden mit der Kalibrierung der PTB erneut verglichen und stimmen innerhalb der Messgenauigkeit der Kalibrierung überein:

a)



b)

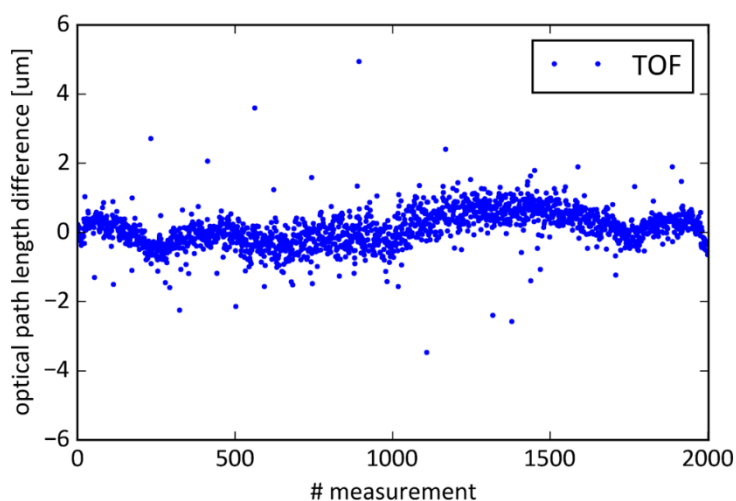


Abbildung 6: a) Distanzmessung auf einer kalibrierten Strecke der PTB (in Luft). Die geometrische Distanz beträgt 10m, wegen doppelt-gefalteter Strahlführung entspricht dies einem optischen Weg von 40m, b) Abweichung der gemessenen optischen Weglänge bei Verwendung der Flugzeit-Methode.

Im Rahmen dieser Bewertung wurden unter anderem folgende Erkenntnisse gewonnen:

1. Bei der Messung der Wegstrecke mit der Phase wird eine höhere Präzision erreicht als mit der Flugzeit. Letztlich ist die Messung bei größeren Weglängen aber durch die Genauigkeit der Kalibrierung (Brechungsindex der Luft aufgrund von Temperatur, Feuchtigkeit und CO₂-Gehalt) limitiert.
2. Mit längerer Wegstrecke in Luft nehmen die atmosphärischen und vibrationsbedingten Störungen messbar zu.
3. Optische Verluste führen teilweise zu einer weglängenabhängigen Heterodynsignalstärke. Aufgrund einer leichten Amplitudenabhängigkeit des Distanzwertes muss daher eine Korrektur vorgenommen werden, um maximale Präzision zu erreichen.

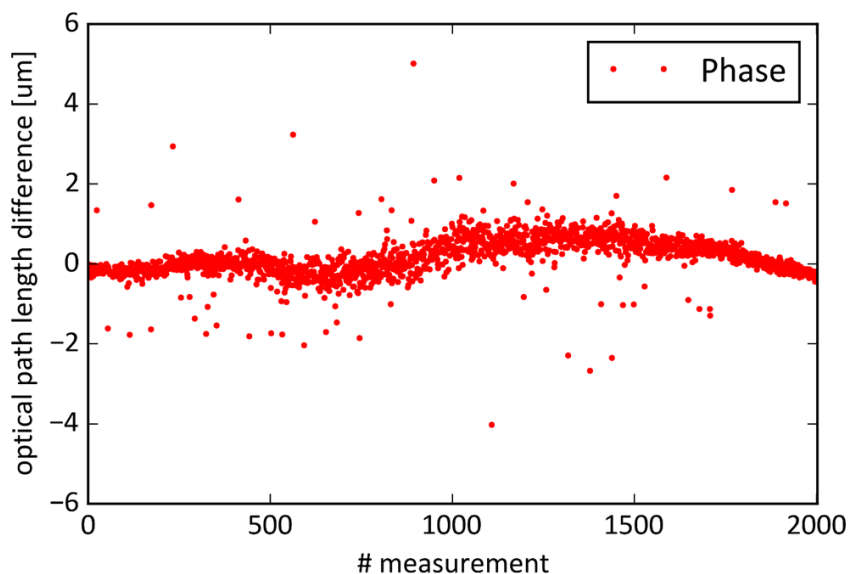


Abbildung 7: Abweichung der Distanzmessung aus Abb. 7 bei Verwendung der Phaseninformation

II.1.F Initiale Marktanalyse von Entfernungsmess-Anwendungen

Insgesamt wurden elf verschiedene Methoden für laserbasierte Wegstreckenmessungen evaluiert: Time of Flight (TOF), Frequency Scan-Interference (FSI), Interference Autocorrelation (IAC), Time Delay Interferometry (TDI), Spectral Interference (SI), Dual Comb Interference (DCI), Modulation Sideband Interferometry (MSTAR), Microresonator Frequency Comb Interference (MFCI), White Light Interferometry (WLI), Comb-referenced multi-wavelength interference (MWI), und Multi-heterodyne cross correlation detection of THz intermode beat (MCD).

Wie sich dabei gezeigt hat, ist die Doppelkamm-Messung bei keiner der zentralen Kriterien wie Kosten, Genauigkeit, Distanz oder maximale Relativgeschwindigkeit führend. Je nach Applikation können somit andere der untersuchten Technologien vorteilhafter sein, siehe dazu Tabelle 22. Es gibt allerdings einige Bereiche in denen DCI Vorteile aufweist:

1. Größerer Eindeutigkeitsbereich
2. Gleichzeitige Bewertung der Luftsäule
3. Hohe zulässige Relativgeschwindigkeit
4. Hohe Reichweite bei guter Präzision
5. Zusätzliche Möglichkeit der Datenübertragung

Es wurde daher beschlossen, sich für die weitere Recherche auf Anwendungen zu konzentrieren in denen obige Punkte kritisch sind.

Method	TOF	FSI	IAC	TDI	SI	DCI	MSTAR	MFCI	WLI	MWI	MCD
Description	Time of flight	Frequency Scan Interference	Interference	Time Delay Interferometry	Spectral Interference	Dual Comb Interference	Modulation Sideband Interferometry	Microresonator Frequency Comb Interference	White light Interferometry	Comb referenced multi-wavelength interference	Multi-heterodyne cross correlation detection of THz Intermode beat
System price \$	20 k	20 k	5 k	200 k	50 k	80 k	20 k	200 k	1 k	100 k	30 k
Accuracy	1 µm	5 nm	50 pm	1 pm	7 nm	10 nm	200 nm	10 nm	600 nm	10 nm	700 nm
Distance (m)	1E8	1E6	1	7E8	1E6	3E4	1E6	1	1E3	10	10
Speed (m/s)	10	0,1	1	0,001	1	10	1	100	0,1	0,05	10

Tabelle 2: Vergleich unterschiedlicher Messtechniken für Wegstrecken

II.1.G Gegenüberstellung von Zielen und Ergebnissen

Ziele gemäß Antrag:

„Auf Basis der Untersuchungen aus Phase 1 und dem in Phase 1 entstandenen Design wird in diesem AP ein kompaktes, transportables Gerät aufgebaut..“

Dieses Ziel wurde nicht vollständig erreicht, das EBB konnte nicht abgeschlossen, getestet und demonstriert werden. Es wurde ein 19“ Doppeloszillatorsystem aufgebaut und teilweise auf Modulebene charakterisiert. Die Verstärker und f-2f Interferometer konnten allerdings nicht mehr abgeschlossen werden. Das ist bedauerlich, insbesondere weil auf für die Anbindung des Verstärkerausgangs an den PPLN Waveguide eine neue Bondingtechnologie eingesetzt werden sollte, die es uns erlaubt hätte, zwei Waveguides auf einem Waveguidechip mit Eingangs- und Ausgangsfasern zu versehen. Damit wäre ein besonders kompaktes und hochstabiles Doppel-XPS ermöglicht worden. Der Grund dafür, dass die Faserverstärker nicht mehr fertig gestellt werden konnten lag insbesondere im Verlust von kritischen Mitarbeitern. Dieser konnte Mitte 2019 auch durch interne Ressourcenumverteilung und das starke Engagement anderer Mitarbeiter nicht kompensiert werden. Das Ziel ein kompaktes und robustes System zu designen konnte allerdings erreicht werden. Es ist beabsichtigt, das System in den kommenden Monaten fertig zu bauen und die Entwicklung damit abzuschließen.

„Das EBB wird im Labor und im Feld auf seine Performance analysiert. Die Anlage soll dabei in der Lage sein, innerhalb 10 ms besser als 1 µm zu messen. Außerdem soll die Möglichkeit von bidirektionalen Messungen weiterverfolgt und vertieft werden.“

Auf diese Messungen wurde verzichtet, nachdem diese Performance bereits in den vorangegangenen Projekten erreicht wurde und das EBB nicht fertig gestellt werden konnte. In die nun erheblich verbesserte Echtzeit-Auswertung wurde aber ein erhöhter Personalaufwand gesteckt. Das Ziel einer instantanen Auswertung ist damit voll erreicht worden.

„Die fluktuierende Dispersion der Luft soll bei den Messungen mitberücksichtigt werden, am besten durch eine integrierte spektroskopische Analyse..“

Auch diese Messungen konnten aus Zeit- und Personalgründen nicht mehr durchgeführt werden. Insbesondere hätte dafür eine Messung mit einem verbreiterten bzw. verschobenen optischen Spektrum durchgeführt werden müssen, um Wasser- und CO₂-Linien mit adäquater Absorption zu beobachten. Der dazu notwendige Booster-Verstärker konnte in dem Projekt nicht mehr realisiert werden.

„Die Abstandsmessungen sind auf einem geeigneten Terrain (geodätisches Netzwerk, UniBW), sowie auf kalibrierte Anlagen (PTB) geplant.... Es ist vorgesehen, die Auswertung der Ergebnisse in einem Maß vorzunehmen, das die Veröffentlichung auf wissenschaftlichen Konferenzen und in Fachjournalen erlaubt“

Diese Messungen wären bei der erreichbaren Genauigkeit vor allem an der PTB sehr vielversprechend gewesen. Leider konnte aber das EBB nicht rechtzeitig fertig gestellt werden. Entsprechend ist der Stand der Arbeiten noch nicht reif genug für eine Veröffentlichung.

Trade-off Matrix: In diesem Paket werden die Anwendungen für terrestrische Entfernungsmessung untersucht und in einer Trade-Off Matrix miteinander verglichen.

Abgesehen von einer breit angelegten Literaturstudie und einer daraus resultierenden Trade-Off Analyse hat Menlo in den vergangenen Monaten auch die Messtechnik und ihr Potential in bilateralen Gesprächen mit Marktteilnehmern beworben. Bisher haben sich zwar noch keine konkreten Perspektiven ergeben. Allerdings gibt es inzwischen Anfragen nach der Möglichkeit zu Doppelkammsystemen für externe wissenschaftliche Untersuchungen.

II.2 Die wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

II.2.A Personalkosten (0837)

Der Hauptaufwand der Mittel wurde für Arbeitsstunden im Bereich Datenauswertung, Optik-Entwicklung, Design und Tests für das System geleistet. Dies betrifft vor allem Entwicklerstunden im Bereich der Software (insbesondere Echtzeit-Datenauswertung), Elektronik, und Optik. Insgesamt waren bei Menlo über die Laufzeit 25 Personen in das Projekt involviert.

Die Personalkosten konnten gegenüber der Bewilligung um 14% nicht ausgeschöpft werden. In den ersten beiden Quartalen haben zwei für die Technologie zentrale Mitarbeiter Menlo verlassen. Ersatz konnte nicht rechtzeitig gefunden werden.

II.2.B Materialkosten (0813)

Die Materialkosten wurden insgesamt erheblich unterschritten. Ursprünglich war in diesem Projekt geplant, zwei Doppelkämme sukzessive aufzubauen, um danach auch bidirektional messen zu können. Aufgrund der geschilderten Engpässe und der knappen Laufzeit von 12 Monaten erwies sich dies im Projektverlauf als nicht realisierbar. Die Kosten für das zweite Gerät wurden daher nicht abgerufen womit ca. die Hälfte des Materials entfiel. Darüber hinaus gab es Einsparungspotentiale bei den Lasern, weil auf einer schon im Vorläufer-Projekt entwickelten 19“ Einschubmechanik als Plattform entwickelt wurde. Die ursprüngliche Planung ging dagegen von einem verbesserten FOKUS 2 System aus, das für Forschungsflüge entwickelt worden ist. FOKUS Systeme verwenden erheblich teurere Einzelkomponenten als das hier aufgebaute System für den terrestrischen Feldeinsatz.

II.2.C FE-Fremdleistungen

Das Budget für Fremdleistungen konnte ebenfalls nicht eingehalten werden und wurde erheblich überschritten. Die zusätzlichen Kosten haben ihren Ursprung in der Weiterentwicklung einer schnellen Lockelektronik für das optische Lock. Diese wurde in der ersten Projektphase schon begonnen. Es hat sich aber im Verlauf des Projekts gezeigt, dass noch umfangreiche Verbesserungen notwendig waren, sodass das Budget nicht ausreichte. Dieser zusätzliche Entwicklungsaufwand ist bei der Beantragung nicht eingeplant gewesen.

II.2.D Reisekosten

Das Budget für Reisekosten wurde erheblich unterschritten. Der Grund lag darin, dass die geplanten Messungen an der PTB durchgeführt werden konnten, nachdem die dafür zu entwickelnde Apparatur nicht fertig gestellt wurde. Darüber hinaus fand auch ein Workshop des MPIA nicht wie geplant statt.

II.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die durchgeführten Arbeiten und der Mitteleinsatz in diesem Projekt entsprachen nicht dem vollen Umfang der ursprünglichen Planung. Obwohl die Mittel für die grundlegenden Entwicklungsarbeiten an den Demonstratoren für Abstandsmessungen gemäß den übergreifenden Projektzielen eingesetzt wurden, konnte der Demonstrator in der Laufzeit nicht abgeschlossen werden. Ein beträchtlicher Teil der Mittel wurde deshalb nicht in Anspruch genommen. Aufgrund des erreichten Standes der Hardware nicht sinnvoll erscheinende Arbeiten wurden dann nicht durchgeführt (z.B. zusätzliche Messungen im Feld entfielen). Die geleisteten Arbeiten und Ausgaben blieben also insgesamt erheblich unterhalb des ursprünglichen Projektantrages, insgesamt wurde ein Viertel der Zuwendung nicht ausgeschöpft. Menlo Systems hat in diesem Projekt einen substanziellen Eigenaufwand geleistet. Synergien und Erkenntnisse mit parallellaufenden Projekten wurden genutzt (FOKUS II, FKZ 50WM1343, OPUS, Purecomb), wo immer dies möglich und zielführend war. Dabei wurde allerdings immer auf eine klare Abgrenzung zwischen den Projekten und ihren Zielen geachtet.

II.4 Nutzen und Verwertbarkeit

Das im Projekt zu entwickelnde Doppelkammsystem wurde in der Phase 2 für den Betrieb mit einer optischen Referenz ausgelegt. Das kann mit etwas zusätzlichem Aufwand durch einen zusätzlichen elektrooptischen Modulator im Oszillator erreicht werden, in Kombination mit einer verbesserten Regelung. Diese Bauteile wurden bereits in die Oszillatormodule mit eingebaut und im Betrieb getestet. Darüber hinaus haben Doppelkammsysteme verschiedene Anwendungen neben der Weglängenmessung: Spektroskopie, Remote Sensing, Fasercharakterisierung, Modenzahlbestimmung. Insgesamt stellen die Frequenzkämme aber insbesondere für die Wegstreckenmessung eine interessante Technologie dar und werden daher auch von der wissenschaftlichen Community vermehrt dafür eingesetzt. Die Kosten für solche Geräte sind vergleichbar mit denen anderer Technologien. Langfristig sehen wir Marktchancen für ein künftiges Produkt, wenn die bei der Doppelkamm-Messung bestehenden Vorteile entsprechend nutzbar gemacht werden können. Allerdings werden die zurzeit absehbaren Anwendungen voraussichtlich zunächst auf akademische Institutionen beschränkt bleiben. Bezüglich der Verwertung verweisen wir dabei noch auf folgenden Satz im Antrag:

Die in IRASSI zu entwickelnde dimensionale Metrologie geht weit über den bestehenden Stand der Technik hinaus und stellt eine große technologische Herausforderung dar..“

Die Entwicklung eines kompakten und transportablen Entfernungsmessers hat Menlo Systems in den IRASSI Projekten immer wieder vor große Herausforderungen gestellt und ging in der Tat weit über den Stand der Technik hinaus. Der Aufbau von Demonstratoren und Testaufbauten gestaltete sich dabei als sehr aufwändig, letztlich konnten aber die meisten technischen Herausforderungen gemeistert werden und die durchgeführten Experimente belegen, dass die für IRASSI erwartete Präzision bei hoher Abtastrate deutlich übertroffen wird. Eine zentrale Aufgabenstellung für Menlo Systems wird es sein, den erbrachten Aufwand in einen konkreten Nutzen für eine präzise, schnelle und kommerziell verwertbare Laserdistanzmessung zu verwandeln. Dazu sind wir mit unseren Ergebnissen bereits in Diskussion mit hochrangigen internationalen Wissenschaftlern, die seit Jahren auf diesem Gebiet an Universitäten und Nationalen Metrologie-Instituten arbeiten. Was die Anwendung der Distanzmessung (und der Betrieb von Kämmen) im Weltraum betrifft, so sind wir in intensiven Gesprächen mit der Agentur und Kooperationspartnern zu einer In-Orbit Verifikation und wir rechnen mit einer solchen in den kommenden Jahren. Darüber hinaus werden Gespräche mit Kunden aus der nationalen und internationalen Industrie sowie mit akademischen Institutionen im In- und Ausland für eine Nutzung von hochentwickelten Doppelkammsystemen laufend geführt.

II.5 Sonstige Fortschritte auf dem Gebiet des Vorhabens

Im Projektzeitraum haben sich nach unserem Informationsstand keine grundlegenden Neuerungen auf dem Gebiet der laserbasierten Distanzmessung ergeben. 2019 wurde von M. Cho (11) ein Buch mit einem speziellen Kapitel zu Doppelkammspektroskopie herausgegeben. Dort werden aber vor allem spektroskopische Untersuchungen mit dieser Technik beschrieben. Zum Frequenzkamm alternative Messverfahren werden obenstehend gelistet. Seit der Einführung der Laserdistanzmessung limitiert die Luftdispersion und Konvektionseffekte bei allen bisher bekannten Technologien eine genaue Messung über lange Strecken. Es wurde unlängst zwar gezeigt, dass man mit sehr ähnlichen Methoden auf einem vergleichbaren Laserlink, wie er in IRASSI zur Distanzmessung verwendet wird, einen Zwei-Wege Zeit und Frequenztransfer mit sub-fs Genauigkeit über viele km in Luft durchführen kann (12). Daraus lässt sich im Umkehrschluss auch die Entfernung mit einer sub- μm Genauigkeit ableiten.

Gegenüber den konkurrierenden Methoden bietet der Frequenzkamm die bereits bekannten Vorteile im Hinblick auf seine absolute Referenzierbarkeit der verwendeten Wellenlängen gegenüber einem atomaren und/oder optischen Standard, die hervorragende Kombination von schmalen Linienbreiten mit einem breiten Spektrum, das exakte Timing und die Phasenstabilität der erzeugten Laserpulse, und die zusätzlichen spektroskopischen Möglichkeiten, die sich aus der spektralen Breite ergeben. Mit dem hier erforschten hochautomatisierten, robusten und kompakten Kammsystemen erscheint es machbar, eine hochgenaue Distanzmessung auch außerhalb einer Laborumgebung durchzuführen. Es ist weiterhin geplant das Gerät im Anschluss an das Projekt zu vervollständigen und mit dem Demonstrator Feldmessungen durchzuführen. Insgesamt öffnet die im Vorhaben untersuchte Doppelkammtechnologie ein weites Anwendungsfeld für künftige Produkte der Firma, für die das Kundenumfeld und der Markt noch genauer untersucht wird.

II.6 Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen des Ergebnisses

Die Arbeiten von IRASSI und IRASSI 2 wurden in den Jahren 2017-18 auf mehreren internationalen Konferenzen vorgestellt:

- 22/23.11.17 M. Lezius besuchte die "Nationalen Infotage Raumfahrt H2020", DLR Köln.

- 18/19.11.17 M. Lezius, K. Beha nehmen Teil am Theodor Hänsch Symposium LMU München. Das Doppelkammsystem wird in dieser Woche auch diversen internationalen Besuchern der Labors von Menlo Systems im laufenden Betrieb vorgeführt.
- 4.-6.11.2017 M. Lezius besucht das Explorer Initiativen Treffen in Braunschweig. IRASSI wird der Community auf einem Poster präsentiert
- 25.6.-29.6.18 K. Beha hält eingeladenen Vortrag auf dem Dodd-Walls Symposium, Univ. Auckland, New Zealand: Precision Measurements with Optical Frequency Combs
- 29.7.-3.8.18 W. Hänsel hält Vortrag auf CLEO US: Length, Time, and Frequency Metrology with Dual Frequency Combs
- 19.6.17 W. Hänsel hält Vortrag über "High-resolution dual-comb spectroscopy with ultra-low noise frequency combs" auf der ISMS 2017
- 15.1.2020: H. Linz publiziert gemeinsam mit den Kollegen des Konsortiums einen Beitrag über IRASSI in *Advances in Space Research*, Bd. 65, S. 831-849; siehe Referenz (13)

III. Literaturverzeichnis

1. *Rapid and precise absolute distance measurements at long range.* **Coddington, I., et al.** 2009, *Nature Photonics*, Bd. 3, S. 351-356.
2. *Time-delay interferometry for space-based gravitational wave searches.* **Armstrong, J. W., Estabrook, F. B. und Tinto, M.** 1999, *Astrophysical Journal*, Bd. 527, S. 814-826.
3. *Intersatellite laser ranging instrument for the GRACE follow-on mission.* **Sheard, B. S., et al.** 2012, *Journal of Geodesy*, Bd. 86, S. 1083-1095.
4. *Two-wavelength laser interferometry using superheterodyne detection.* **Daendliker, R., et al.** 1988, *Opt. Letters*, Bd. 13, S. 339-341.
5. *MSTAR: a submicrometer, absolute metrology system.* **Lay, O. P., et al.** 2003, *Opt. Letters*, Bd. 28, S. 890-892.
6. *High-precision long-distance measurement using a frequency comb of a femtosecond mode-locked laser.* **Matsumoto, Hirokazu, Minoshima, Kaoru und Telada, Souichi.** 2003. *Proceedings of SPIE*. Bd. 5190, S. 308-315.
7. *Optical frequency metrology.* **Udem, Th., Holzwarth, R. und Hänsch, T. W.** 2002, *Nature*, Bd. 416, S. 233-237. ISSN: 0028-0836.
8. *High-accuracy long-distance measurements in air with a frequency comb laser.* **Cui, M., et al.** s.l. : OSA, 2009, *Opt. Lett.*, Bd. 34, S. 1982-1984.
9. *Long distance measurement with femtosecond pulses using a dispersive interferometer.* **Cui, M., et al.** s.l. : Optical Society of America, 2011, *Optics express*, Bd. 19, S. 6549-6562.
10. *Coherent dual-comb spectroscopy at high signal-to-noise ratio.* **Coddington, I., Swann, W. C. und Newbury, N. R.** 4, s.l. : American Physical Society, 2010, *Phys. Rev. A*, Bd. 82, S. 043817.
11. **Cho, Minhaeng.** *Coherent Multidimensional Spectroscopy.* Berlin, New York : Springer, 2019. 9811397538.
12. **Sinclair, L.C., et al.** Synchronization of clocks through 12 km of strongly turbulent air over a city. *Appl. Phys. Lett.* 2016, Bd. 109, S. 151104.

13. *InfraRed Astronomy Satellite Swarm Interferometry (IRASSI): Overview and study results.* **Linz, Hendrik, et al.** 2020, *Advances in Space Research*, Bd. 65, S. 831-849. High-resolution space-borne radio astronomy. ISSN: 0273-1177.

IV. Verzeichnis der Abkürzungen

CW <i>continuous wave</i>	MFCI <i>Microresonator Frequency Comb Interference</i>
DCI <i>Dual Comb Interference</i>	MIR <i>Mid Infrarot</i>
DDS <i>Dynamic Digital Synthesis</i>	MSTAR <i>Modulation Sideband Interference</i>
DLR <i>Deutsche Luft und Raumfahrt Agentur</i>	MWI <i>Multi Wavelength Interference</i>
DLR-IPA <i>DLR Inst. für Atmosphärenphysik</i>	PPLN <i>Polarity Poled Lithium Niobate</i>
EBB <i>Elegant Breadboard</i>	PTB <i>Physikalisch Technische Bundesanstalt</i>
ESA <i>European Space Agency</i>	RF <i>Radiofrequenz</i>
FGG <i>Fördergeldgeber</i>	SI <i>Spectral Interference</i>
FPGA <i>Field Programmable Gate Array</i>	TDI <i>Time Delay Interferometry</i>
fs <i>Femtosekunde</i>	TOF <i>Time of Flight</i>
FSI <i>Frequency Scan Interference</i>	UV <i>Ultraviolett</i>
HE <i>Höheneinheit</i>	WBS <i>Workpackage Breakdown Structure</i>
IAC <i>Interference Autocorrelation</i>	WLI <i>White Light Interference</i>
MCD <i>Multi-heterodyne cross correlation detection</i>	

Berichtsblatt

1. ISBN oder ISSN	2. Berichtsart Projekt-Abschlussbericht
3a. Titel des Berichts Abschlussbericht zu IRASSI-2 Phase 2	
3b. Titel der Publikation Infrarot Astronomie Satelliten Schwarm Interferometrie (Teilprojekt AP6)	
4a. Autoren des Berichts (Name, Vorname(n)) M. Lezius, R. Holzwarth	5. Abschlussdatum des Vorhabens 30.9.2019
4b. Autoren der Publikation (Name, Vorname(n)) M. Lezius, R. Holzwarth	6. Veröffentlichungsdatum 1.5.2020
8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse) Menlo Systems GmbH Bunsenstraße 5 D-82152 Martinsried	7. Form der Publikation Bericht
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
	10. Förderkennzeichen 50NA1819
	11a. Seitenzahl Bericht 23
	11b. Seitenzahl Publikation 23
	12. Literaturangaben 13
	14. Tabellen 2
	15. Abbildungen 7
16. Zusätzliche Angaben	
17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum) DLR Raumfahrtmanagement	
18. Kurzfassung <p>In diesem Bericht wird die Aufgabenstellung des Projekts 50N A1819 aus dem Verbundprojekt IRASSI-2 Phase 2 erläutert. Die Voraussetzungen werden beschrieben und die Planung und der Ablauf des Vorhabens werden detailliert. Nach einer Diskussion des aktuellen Stands der Technik und der Notwendigkeit der Zusammenarbeit im Verbundprojekt erfolgt die Darstellung über die Verwendung der Zuwendung und der erzielten Ergebnisse. Die ursprüngliche Ziele und die erreichten Ergebnisse werden gegenüber gestellt und abweichungen erläutert. Die wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises werden beschrieben. Im Anschluss daran wird auf die Notwendigkeit der geleisteten Arbeit, ihre Verwertung und sonstige Fortschritte auf dem Forschungsgebiet eingegangen. Der Bericht enthält eine Veröffentlichungsliste und ein Literaturverzeichnis.</p>	
19. Schlagwörter Entfernungsmessung mit optischen Frequenzkämmen für Formationsflüge	
20. Verlag	21. Preis

Document Control Sheet

1. ISBN or ISSN	2. Type of Report Final Report
3a. Report Title Final Report for the Project IRASSI 2 Phase 2	
3b. Title of Publication Infrared Astronomy Satellite Swarm Interferometry (Subproject AP6)	
4a. Author(s) of the Report (Family Name, First Name(s)) M. Lezius, R. Holzwarth	5. End of Project 30.9.2019
4b. Author(s) of the Publication (Family Name, First Name(s)) M. Lezius, R. Holzwarth	6. Publication Date 1.5.2020
8. Performing Organization(s) (Name, Address) Menlo Systems GmbH Bunsenstr��e 5 D-82152 Martinsried	7. Form of Publication Report
13. Sponsoring Agency (Name, Address) Raumfahrtmanagement des Deutschen Zentrums f��r Luft- und Raumfahrt e.V. K��nigswinterer Str. 522-524 53227 Bonn	9. Originator's Report No.
16. Supplementary Notes	10. Reference No. 50NA1819
17. Presented at (Title, Place, Date) DLR Raumfahrtmanagement	11a. No. of Pages Report 23
18. Abstract In this report the tasks of project 50NA1819 as part of the joint project IRASSI-2 phase 2 are described. The initial situation and the project plan will be detailed. After a discussion of the state-of-the-art of the technology and the need for funding the use of the funding is described and the project results are listed. Original goals and results are compared. Major budget positions are compared with the original budget applied for. The necessity for funding and the work performed will be justified. Future use of the results and recent progress in the research area are discussed. The report contains a publication list and a bibliography.	11b. No. of Pages Publication 23
19. Keywords Dual comb ranging for satellite formation flying	12. No. of References 13
20. Publisher	14. No. of Tables 2
21. Price	15. No. of Figures 7