Larissa III – Schlussbericht

Entwicklung eines Outdoor-fähigen, masse- und leistungsoptimierten Laserterminals für unbemannte Fluggeräte zur Vermessung von großen Antennenanlagen auf Basis einer Referenzsignalübertragung über weglängenstabilisierte Laserstrecken mit integrierter Distanzmessung.

Document no.:	109PRT33907
Revision no.:	1.00

Date: 2024-06-24

Mynaric Lasercom GmbH
Bertha Kipfmüller-Str. 2-8, 81249 Munich, Germany
T + 49 (0)89 5589 428 0, F + 49 (8105) 7999 950
info@mynaric.com

Managing Directors: Joachim Horwath
Legal: HRB 179806 (Local Court of Munich), VAT reg. no. DE266073663

www.mynaric.com

TPL # 0040 V9.0

Statement of Export Control

This document contains technical information that is Germany-origin. It does not contain Information subject to EU-Dual-use-Regulation or military items regulation (Ausfuhrliste).

Approval

ROLLE	NAME	FUNKTION
Ersteller	Federica Bonomo	Project Manager Future Technology
Ersteller	Miguel Machin	Electronics Engineer Future Technology
Technische Freigabe	Charles Garcia Stewart	Team Leader - Signal Processing and Communications
Technische Freigabe	Joachim Horwath	CTO

Change Record

REVISION	ÄNDERUNGSBESCHREIBUNG	DATUM
1.00	Erste Ausgabe	2024-06-24

Mitgeltende Dokumente

MD	DOKUMENTNUMMER	TITEL	AUSGABE	DATUM
AD01	-	Zuwendungsbescheid	-	2022-08-31

Referenzdokumente

RD	DOKUMENTNUMMER	TITEL	AUSGABE	DATUM
RD01	LARISSA-RP-01	LARISSA - *Laserstrahlbasierte Übertragung von phasenkritischen Hochfrequenz-Messsignalen bewegter Messplattformen und spezieller Nahfeld-Fernfeld Transformation für den Einsatz in der Antennenmesstechnik* Gemeinsamer Schlussbericht des BMWI-Verbundvorhabens		2017-11-22
RD02	LARISSA-II-RP-01	LARISSA II - *Laserstrahlbasierte Übertragung von phasenkritischen Hochfrequenz-messsignalen bewegter Messplattformen und spezieller Nahfeld-Fernfeld Transformation für den Einsatz in der Antennenmesstechnik* Gemeinsamer Schlussbericht des BMWI-Verbundvorhabens		2022-07-06

Inhaltsverzeichnis

Titelseite **1**

Change Record **2**

Mitgeltende Dokumente **3**

Referenzdokumente **3**

Inhaltsverzeichnis **4**

Abbildungsverzeichnis **4**

Abkürzungen **6**

1. Zweck des Dokuments **7**

2. Kurzbeschreibung des Projekts **7**

2.1. LARISSA-I 7

2.2. LARISSA-II 9

2.3. LARISSA-III 11

2.3.1. Planung und Ablauf 11

3. Ausführliche Beschreibung des Unterprojekts LARISSA III von Mynaric Lasercom GmbH **14**

3.1. WP3000 – Anpassung des Laserterminals 14

3.1.1. Frequenzanalyse der Drohne (WP 3100) 14

3.1.2. Systemanforderungen (WP 3200) 14

3.1.3. Link-Budget-Analyse (WP 3300) 14

3.1.4. Anpassung des Terminal-Designs (WP 3400) 15

3.1.5. Anpassung der Zeit-/Phasenkompensation (WP 3500) 18

3.2. WP4000 – Anpassung des Laserterminals 18

3.3. WP5000 – Integration des Laserterminals und Flugdemonstration 18

4. Zusammenfassung **19**

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Typisches Messszenario: PAMS-Kran-Gondel-System, das Messungen an einer eine Mesh-Antenne durchführt. 7

Abbildung 2: Konzeptioneller Aufbau des Antennenmesssystems für LARISSA-I. Schematische Darstellung der kohärenten Verbindung des HF-Signals mit Hilfe einer Laserübertragung. 8

Abbildung 3: Laserterminals als Ergänzung zu einem Lasertracker und an der Gondel (Sonde) zur optischen Übertragung des 10-MHz-Referenztaktes [RD01]. 9

Abbildung 4: Prüfung der Langzeit-Phasenstabilität im Rahmen von LARISSA-II. 9

Abbildung 5: LARISSA-II-Entfernungsmessungen für das Mynaric-Terminal und den Lasertracker. ... 10

Abbildung 6: Mynaric-Laserterminal auf der Gondel während der Messkampagne in LARISSA-II [RD02]. 11

Abbildung 7: Projektstrukturplan für LARISSA-III. 12
Abbildung 8 Ursprünglicher Zeitplan der einzelnen Arbeitspakete für Mynaric Lasercom GmbH. 12
Abbildung 9: Aktualisierter Zeitplan der einzelnen Arbeitspakete für Mynaric Lasercom GmbH, wie vom DLR im Sommer 2023 genehmigt. 13
Abbildung 10: Zeitplan der Aktivitäten, die bis zur Beendigung des Projekts von Mynaric Lasercom GmbH durchgeführt werden. 13
Abbildung 11: Berechnung des Link-Budgets für das in LARISSA-III zu verwendende Laserterminal vor jeglicher Designanpassung. 15
Abbildung 12: Beispiel für Signaloszillationen während der Bewegung des Terminals bei Drehung des Kardanrings. 16
Abbildung 13: Schema für einen Hybrid-Schleifring, der in den Kardanring eingebaut werden soll, um die Tracking-Stabilität zu verbessern. 16
Abbildung 14: Beispiel für ein mögliches optisches Design-Szenario für das LARISSA-III-Laserterminal. 17
Abbildung 15: Modularitätsschema der Architektur des LARISSA-III-Terminals. 17

Abkürzungen

CPA:	Coarse Pointing Assembly
COTS:	Commercial Off-The-Shelf
CZT:	Chirp-Z-Transform
DFT:	Discrete Fourier Transform
DUT:	Device Under Test
FF:	Far Field
FFT:	Fast Fourier Transform
FIAFTA:	Near Field – Far Field transformation algorithms
FMCW:	Frequency Modulated Continuous Wave
FPA.	Fine Pointing Assembly
FSO:	Free Space Optic
HFT:	Lehrstuhl für Hochfrequenztechnik
LEO:	Low Earth Orbit
NF:	Near Field
PLL:	Phase-Lock Loop
PAMS:	Portable Antenna Measurement System
RF:	Radio Frequency
Rx:	Receiver
Tx:	Transmitter
UAV:	Unmanned Aerial Vehicle
WP:	Work Package

1. Zweck des Dokuments

Dieses Dokument ist der technische Bericht über die Aktivitäten des Teams von Mynaric Lasercom GmbH im Rahmen des Projekts „Laserstrahlbasierte Übertragung von phasenkritischen Hochfrequenz-Messsignalen bewegter Messplattformen und spezieller Nahfeld-Fernfeld Transformation für den Einsatz in der Antennenmesstechnik (LARISSA-III)“.

LARISSA-III ist ein Gemeinschaftsprojekt der Joint-Venture-Partner „Airbus Defense and Space GmbH“, „Mynaric Lasercom GmbH“ sowie des Lehrstuhls für Hochfrequenztechnik (HFT) der Technischen Universität München (TUM).

Dieses Dokument umfasst ausschließlich den Abschlussbericht des Beitrags von Mynaric Lasercom GmbH und enthält die Beschreibung der Arbeiten sowie die wichtigsten Ergebnisse und Leistungen.

2. Kurzbeschreibung des Projekts

LARISSA steht für *„Laserstrahlbasierte Übertragung von phasenkritischen Hochfrequenz-Messsignalen bewegter Messplattformen und spezieller Nahfeld-Fernfeld Transformation für den Einsatz in der Antennenmesstechnik“*.

Das Projekt LARISSA-III ist die Fortsetzung des Projekts LARISSA-I und beinhaltet die Untersuchung von Möglichkeiten zur weiteren Erhöhung der Phasengenauigkeit der Übertragung.

2.1. LARISSA-I

Das Projekt LARISSA wurde als Alternative zur Signalübertragung durch Kabel für Nahfeld (NF)-Antennen entwickelt, wobei das Ziel darin bestand, ein Proof-of-Principle-Setup für NF-Antennenmessungen zu demonstrieren. Airbus DS (ADS) und die Technische Universität München (TUM) haben für diesen Zweck den Nahfeld-Fernfeld-Transformationsalgorithmus FIAFTA entwickelt.

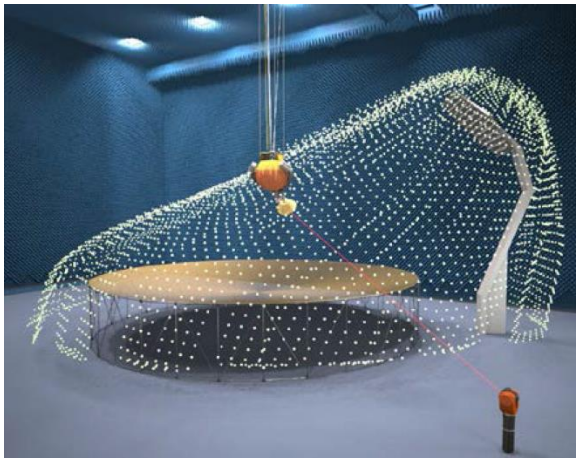

Abbildung 1: Typisches Messszenario: PAMS-Kran-Gondel-System, das Messungen an einer eine Mesh-Antenne durchführt.

Abbildung 1 zeigt ein konzeptionelles Layout des Portable Antenna Measurement System (PAMS) von ADS, das auf einem Kran/Gondel-NF-Scanner basiert. Das System bietet eine seitliche 3D-Freiheit der Kranachsen, so dass die NF-Abtastung auch entlang beliebiger Freiform-NF-Messkonturen jenseits der klassischen NF-Scan-Konturen mit festgelegter Form durchgeführt werden kann.

Das Fernfeld (FF)-Verhalten großer Antennengruppen kann im Nahfeldbereich durch den Einsatz einer Sondenantenne charakterisiert werden, die Amplitude und Phasengang der zu prüfenden Antenne räumlich abtastet. Um eine geeignete Charakterisierung der Antenne sicherzustellen, müssen diese Phasen- und Amplitudenmessungen eine garantierte Genauigkeit aufweisen. Die Antennen-Arrays können sehr groß sein und die zu prüfenden Frequenzen können zwischen 1 und 30 GHz liegen.

Um die zu prüfende Antenne und die Probeantenne zu synchronisieren, wird normalerweise ein Referenzsignal über ein langes Kabel oder eine Faser geteilt. Das erforderliche Kabelmanagement wird jedoch für sehr große Antennen unpraktikabel. Darüber hinaus führen Änderungen der Pfadlänge aufgrund der Ausdehnung des Kabels oder der Faser ebenfalls zu Phasenfehlern. Eine attraktive Alternative ist die Verwendung einer kabellosen Lösung, z. B. eines optischen Freiraum-Übertragungssystems. Dabei dient ein Laserstrahl als Kanal, über den der Referenzträger geteilt wird, und es wird eine aktive Phasenkorrektur eingesetzt, um die Auswirkungen von Schwankungen der Pfadlänge abzumildern.

LARISSA-I hat die grundsätzliche Machbarkeit einer Freistrahl-Referenzwellenübertragung für eine an einem Kran aufgehängte Gondel erfolgreich demonstriert [RD01]. Abbildung 2 zeigt einen konzeptionellen Aufbau des Antennenmesssystems für LARISSA-I. Das Hochfrequenzsignal treibt die Prüfsonde in der Gondel und wird über eine FSO-Verbindung an die Antenne des Prüflings (DUT) weitergeleitet, wodurch die induzierte Phasenverschiebung angepasst wird. Im Rahmen von LARISSA-I wurden verschiedene Alternativen für die Kompensation der induzierten Phasenverschiebung untersucht.

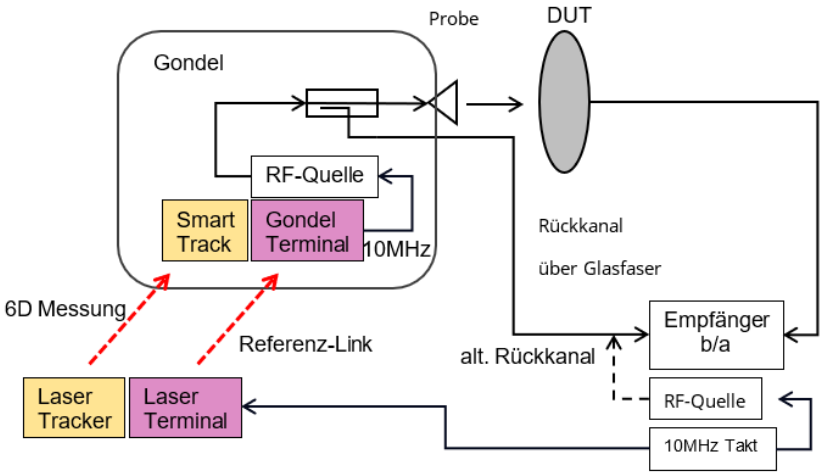

Abbildung 2: Konzeptioneller Aufbau des Antennenmesssystems für LARISSA-I. Schematische Darstellung der kohärenten Verbindung des HF-Signals mit Hilfe einer Laserübertragung.

In der Schlussfolgerung wurde hervorgehoben, dass der beste Ansatz die Übertragung eines modulierten Laserstrahls ist, der mit dem Ziel reflektiert wird, die Phase des Sende- und Empfangssignals mit Hilfe eines PLL-basierten Teilsystems zu vergleichen. Die gemessene Phasenverschiebung wird anschließend auf das Sendesignal angewendet, um die Time-of-Flight-Effekte abzuschwächen. Dadurch wird eine Phasenstabilität zwischen dem Sender und dem Prüfling erreicht [RD01].

Abbildung 3 zeigt den Aufbau des Lasers an der Gondel (Sonde) und am Boden als Ergänzung zu einem Lasertracker. Die Strahlstabilisierung wurde bei dieser Demonstration mit Standardkomponenten durchgeführt. Zur Validierung des Konzepts wurde ein Referenzsignal von 10 MHz verwendet. Die

Umgebungsbedingungen des Messsystems waren äußerst vorteilhaft, z. B. geringe Vibrationen, kontrollierte Temperaturbedingungen, ein hohes Maß an Sauberkeit (wenig Staub) und kein Hintergrundlicht durch Sonneneinstrahlung.

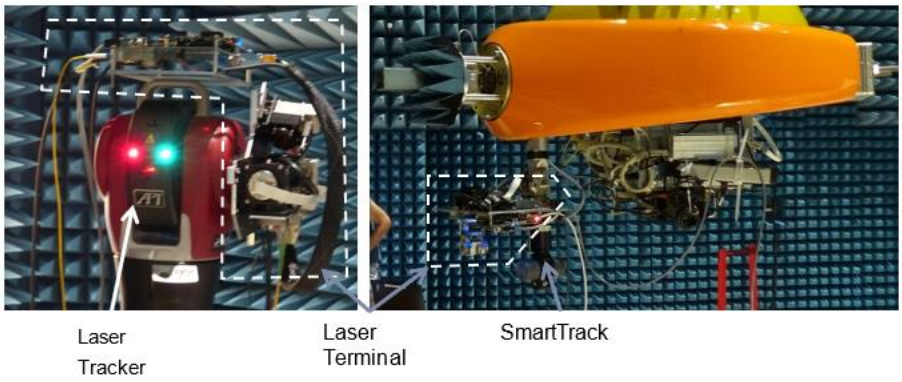

Abbildung 3: Laserterminals als Ergänzung zu einem Lasertracker und an der Gondel (Sonde) zur optischen Übertragung des 10-MHz-Referenztaktes [RD01].

2.2. LARISSA-II

Das Projekt LARISSA-II war die Fortsetzung des Projekts LARISSA-I und beinhaltete die Untersuchung von Möglichkeiten zur weiteren Erhöhung der Phasengenauigkeit der Übertragung.

Mynarics Beitrag zum Projekt LARISSA-II konzentrierte sich auf das ehrgeizige Ziel, ein hochmodernes System für Frequenzübertragung und Entfernungsmessung zu schaffen, das insbesondere für Antennenmessungen oberhalb von 1 GHz und idealerweise um 30 GHz geeignet ist. Das übergeordnete Ziel bestand darin, ein System zu entwickeln, das kompakt und robust genug ist, um in mobile Plattformen wie unbemannte Luftfahrzeuge (UAVs) integriert werden zu können, und gleichzeitig eine hohe Präzision und Stabilität erreicht [RD02].

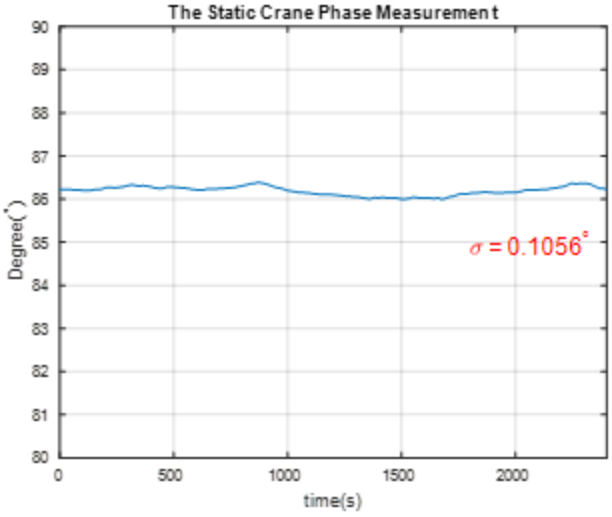

Abbildung 4: Prüfung der Langzeit-Phasenstabilität im Rahmen von LARISSA-II.

In der ersten Phase des Projekts, LARISSA-I, wurden verschiedene Methoden für den Phasenausgleich untersucht. Der primäre Ansatz bestand in der Verwendung einer Phase-Locked-Loop (PLL)-Struktur, um ein 10-MHz-Referenzsignal zu übertragen und so die durch die räumlichen Abstände zwischen Boden- und Gondelsystem verursachten Phasenunterschiede auszugleichen. Allerdings erwies sich dieses erste System als unzureichend für die Messung von Antennendiagrammen bei höheren Frequenzen, was zu weiteren Entwicklungsarbeiten im Rahmen von LARISSA-II führte.

Bei LARISSA-II wurden wesentliche Verbesserungen am Referenzübertragungssystem vorgenommen. Die Frequenz des Referenzsignals wurde auf 1 GHz erhöht, was sich besser für Antennenmessungen bei höheren Frequenzen eignet. Darüber hinaus wurde die dedizierte Hardware für die Phasenanpassung erheblich verbessert, was eine bessere Phasenkompensation ermöglicht. Mit dem verbesserten System wurde eine beeindruckende Langzeit-Phasenstabilität erreicht, wobei die Messungen eine Abweichung von weniger als ±0,2° und eine Standardabweichung von 0,1056° ergaben, wie in Abbildung 4 dargestellt. Diese Ergebnisse zeigen ein hohes Maß an Stabilität, das für präzise Langzeitmessungen entscheidend ist [RD02].

Allerdings bestanden weiterhin Probleme, insbesondere bei der Messung von Phasenänderungen aufgrund von Bewegungen. Das System schaffte es, eine Phasenänderung von insgesamt 360° für Bewegungen, die länger als eine Wellenlänge sind, auf eine kleinere Spanne von 22,24° zu komprimieren. Trotz dieser relativ hohen Kompression konnte die Phase des Referenzsignals mit Hilfe von Entfernungsdaten effektiv berücksichtigt werden, so dass es möglich war, Antennendiagramme bei Frequenzen über 10 GHz zu messen.

Darüber hinaus wurde eine neue Entfernungsmessungsfunktion für LARISSA-I eingeführt. Das Team untersuchte verschiedene Radarmethoden und entschied sich schließlich aufgrund der hohen Genauigkeit und der Einfachheit der Schaltung für das frequenzmodulierte Dauerstrichverfahren (FMCW). Diese neue Entfernungsmessung hat nicht nur Phasenanpassung verbessert, sondern stellt auch einen potenziellen Ersatz für den Lasertracker dar, ein Instrument, das traditionell für die Positionsschätzung bei Antennenmessungen im Nahfeld verwendet wird [RD02].

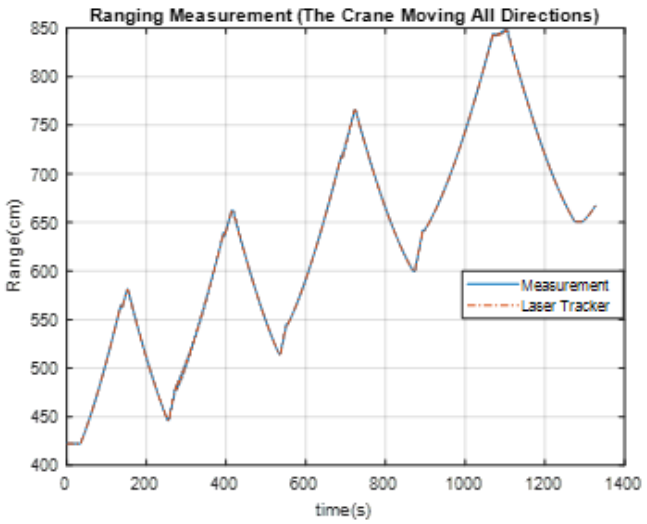

Abbildung 5: LARISSA-II-Entfernungsmessungen für das Mynaric-Terminal und den Lasertracker.

Die Leistung des neuen Entfernungsmesssystems wurde im Vergleich zum Lasertracker eingehend geprüft und bewertet. Das entwickelte System wies eine Entfernungsgenauigkeit von ±4 mm mit einer Standardabweichung von 1,248 mm auf, nachdem systematische Fehler entfernt wurden. Darüber hinaus konnte die Bereichsgenauigkeit durch Mittelwertbildung deutlich verbessert werden. Bei

zehnfacher Mittelwertbildung verringerte sich die Genauigkeitsgrenze auf ±0,5 mm und die Standardabweichung auf 0,315 mm. Durch die vorgeschlagenen Verbesserungen könnte die Genauigkeit in den Bereich von 50 µs gebracht werden, was das Potenzial für weitere Fortschritte verdeutlicht.

Die Integration dieses anspruchsvollen Systems in eine mobile Plattform erforderte die Entwicklung eines kompakten und kostengünstigen Terminals, das auf handelsüblichen Komponenten (COTS) basiert. Im Rahmen des Projekts wurden die Technologie bestehender kommerzieller Terminals angepasst und neue Konzepte zur Verbesserung künftiger Produkte integriert. Während der Entwicklungsphase wurden verschiedene Lösungen, wie beispielsweise 3D-gedruckte Teile und miniaturisierte Komponenten, getestet und überarbeitet, um das Design zu verfeinern. Dieses Verfahren resultierte in einer robusten Lösung, mit der das Konzept einer doppelten Apertur validiert wurde. Dabei sendet ein Terminal Signale aus, die vom anderen Terminal passiv reflektiert werden, wodurch eine effektive Verfolgung und Skalierbarkeit unter Verwendung kostengünstiger kommerzieller Komponenten demonstriert wurde.

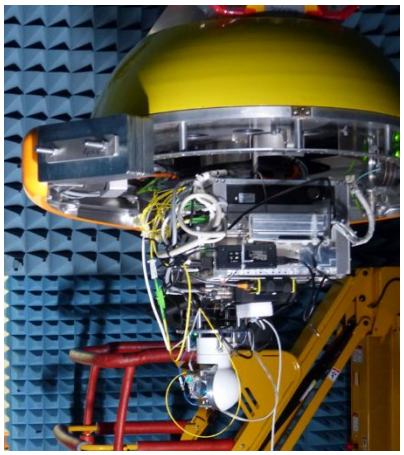

Abbildung 6: Mynaric-Laserterminal auf der Gondel während der Messkampagne in LARISSA-II [RD02].

2.3. LARISSA-III

Das Projekt LARISSA-III ist die Fortsetzung von LARISSA-I und LARISSA-II, wobei Möglichkeiten zur weiteren Verbesserung der Kompaktheit des Laserterminals wie auch zur Verbesserung des Dynamikbereichs für die übertragene Phasengenauigkeit untersucht werden sollen. Das Projekt LARISSA-III ist die Fortsetzung des Projekts LARISSA-I und beinhaltet die Untersuchung von Möglichkeiten zur weiteren Erhöhung der Phasengenauigkeit der Übertragung.

2.3.1. Planung und Ablauf

Die nachstehende Abbildung 7 zeigt den Projektstrukturplan für LARISSA-III für alle Partner, mit den einzelnen Hauptarbeitspaketen und deren Aufteilung in einzelne Arbeitspakete. Die den Partnern zugewiesenen Arbeitspakete sind durch unterschiedliche Farben gekennzeichnet.

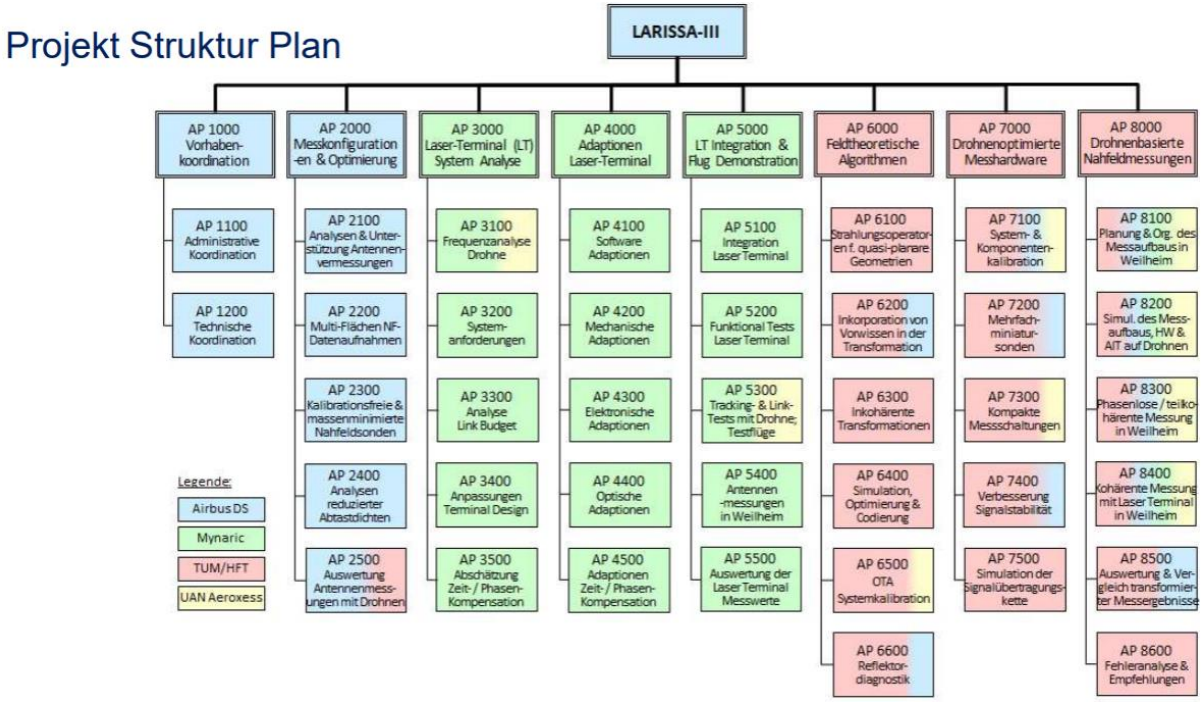

Abbildung 7: Projektstrukturplan für LARISSA-III.

Der ursprüngliche Plan für das Projekt LARISSA-III erstreckt sich vom 01.10.2022 bis zum 01.03.2024. Abbildung 8 zeigt den zeitlichen Ablauf der einzelnen Aktivitäten für Mynaric Lasercom GmbH, wie im ursprünglichen Plan vorgesehen.

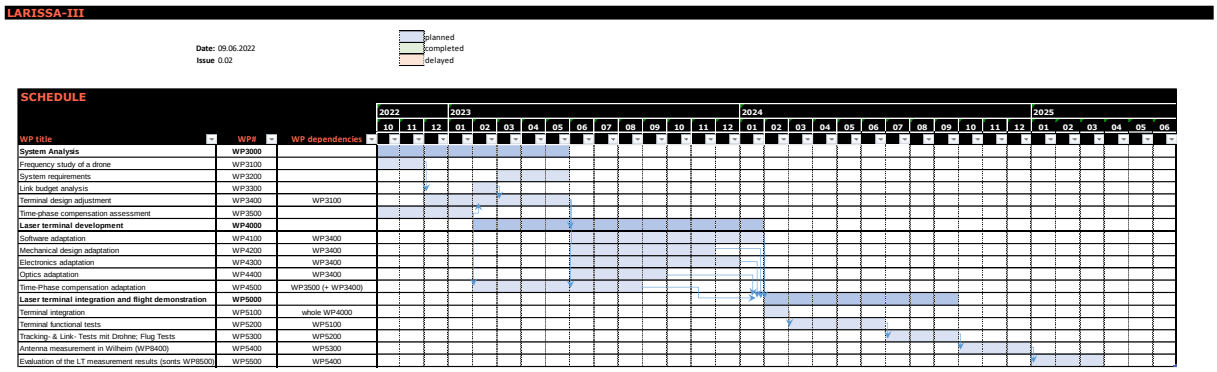

Abbildung 8 Ursprünglicher Zeitplan der einzelnen Arbeitspakete für Mynaric Lasercom GmbH.

Ein aktualisierter Plan der Aktivitäten von Mynaric Lasercom GmbH und deren Erweiterung während der gesamten Projektlaufzeit wurde vorgelegt und im Sommer 2023 vom DLR genehmigt. Der aktualisierte Plan ist in Abbildung 9 dargestellt.

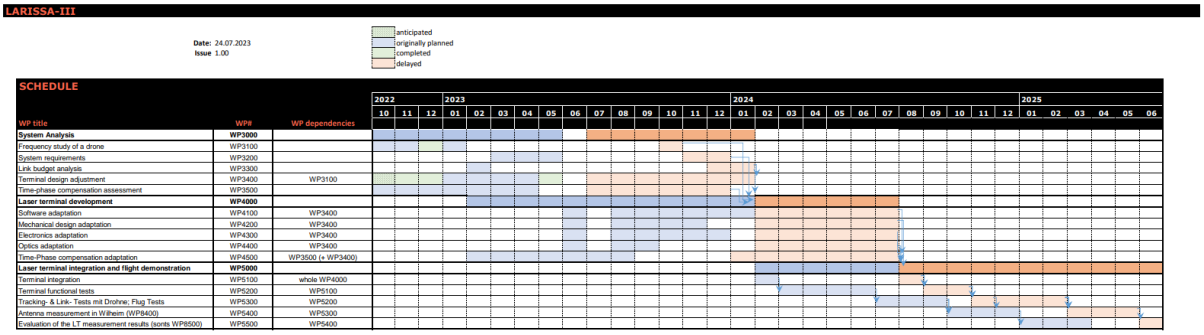

Abbildung 9: Aktualisierter Zeitplan der einzelnen Arbeitspakete für Mynaric Lasercom GmbH, wie vom DLR im Sommer 2023 genehmigt.

Die vorzeitige Beendigung des Beitrages von Mynaric Lasercom GmbH zum Projekt LARISSA-III zum 01.03.2024 wurde mit dem in Abbildung 10 dargestellten Zeitplan durchgeführt.

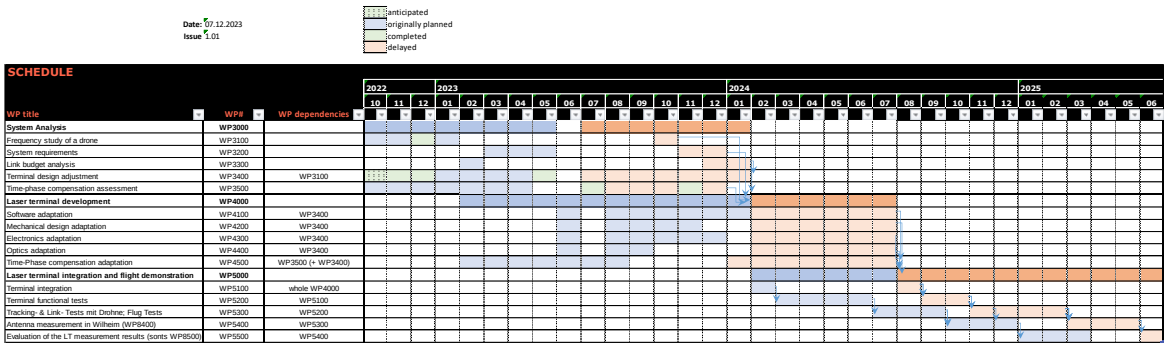

Abbildung 10: Zeitplan der Aktivitäten, die bis zur Beendigung des Projekts von Mynaric Lasercom GmbH durchgeführt werden.

3. Ausführliche Beschreibung des Unterprojekts LARISSA III von Mynaric Lasercom GmbH

Das Ziel des Teilprojekts der Mynaric Lasercom GmbH als Teil des Gesamtprojekts LARISSA-III war die Entwicklung eines Outdoor-fähigen, masse- und leistungsoptimierten Laserterminals für unbemannte Fluggeräte zur Vermessung von großen Antennenanlagen auf Basis einer Referenzsignal-übertragung über weglängenstabilisierte Laserstrecken mit integrierter Distanzmessung.

3.1. WP3000 – Anpassung des Laserterminals

3.1.1. Frequenzanalyse der Drohne (WP 3100)

Um eine Drohne betreiben zu können, muss die Dynamik der Drohne eindeutig identifiziert werden, um die Vibrations- und Geschwindigkeitsanforderungen für das Laserterminal zu bestimmen. Diese Anforderungen bilden die Grundlage für die Konzeption der mechanischen Struktur der optischen Pfade innerhalb des Terminals und der Schnittstelle zur Drohne.

Zu Beginn des Projekts stand die bereits im Projekt LARISSA-II eingesetzte Drohne, die auch im Projekt LARISSA-III verwendet werden soll, für einige Tests und die Erfassung von Vibrationsdaten zur Verfügung. Dabei wurde davon ausgegangen, dass einige Änderungen an der Drohne (aufgrund der noch nicht fertig gestellten Sondenantenne und der Drohnennutzlasten) keine nennenswerten Auswirkungen auf das Design des Terminals haben würden, so dass die Partner und ihr Unterauftragnehmer vorab Vibrationsdaten erfasst haben, die Mynaric zur Verfügung gestellt wurden.

Eine Vorabanalyse des Frequenzspektrums der Drohnenvibrationen ergab keine relevanten oder schwerwiegenden Probleme, wenngleich eine endgültige Bewertung aufgrund einer zu langsamen Zeitauflösung nicht möglich war. Es war eine zweite Kampagne zur Erfassung weiterer Daten geplant, wobei das Mynaric-Sensorsystem für eine angemessene zeitliche Auflösung der Messungen verwendet werden sollte. Diese Kampagne hat jedoch nicht stattgefunden, und es wurden keine weiteren Daten bewertet oder analysiert.

3.1.2. Systemanforderungen (WP 3200)

Dieses Arbeitspaket wurde während der eigentlichen Projektlaufzeit nicht behandelt.

3.1.3. Link-Budget-Analyse (WP 3300)

Die Analyse der Leistung des Kommunikationssystems für das Projekt LARISSA-II, bei dem ein Laserterminal verwendet wird, zeigt, dass die Zielgenauigkeit des Terminals im Wesentlichen durch die mechanischen Grenzen seiner Komponenten bestimmt wird. Insbesondere verwendet das Terminal ein Kardanringsystem zur Zielausrichtung. Dieser Kardanring hat zwar eine gewisse Präzision, ist aber nicht vollkommen stabil. Es unterliegt einer kleinen Bewegung, dem so genannten Jitter, was sich auf die Gesamtgenauigkeit der Ausrichtung auswirkt.

Für eine optimale Leistung sollte das System idealerweise eine minimale Streuung des Laserstrahls aufweisen, um ein starkes und fokussiertes Signal über große Entfernungen aufrechtzuerhalten. Mit dem derzeitigen Kardanring und dem damit verbundenen Jitter ist die Streuung des Strahls jedoch größer als gewünscht, was die effektive Kommunikationsreichweite einschränkt.

Ohne den Einsatz zusätzlicher Komponenten, wie beispielsweise eines SFP-Moduls oder eines optischen Verstärkers, kann das System nur über eine relativ kurze Distanz eine zuverlässige Verbindung aufrechterhalten. Durch den Einbau eines leistungsfähigen Verstärkers kann die Kommunikationsreichweite jedoch erheblich vergrößert werden. Dies bedeutet, dass das System wesentlich größere Entfernungen bewältigen kann, was seine Gesamtleistung steigert und es für verschiedene Anwendungen, die stabile und weitreichende Kommunikationsverbindungen erfordern, besser geeignet macht.

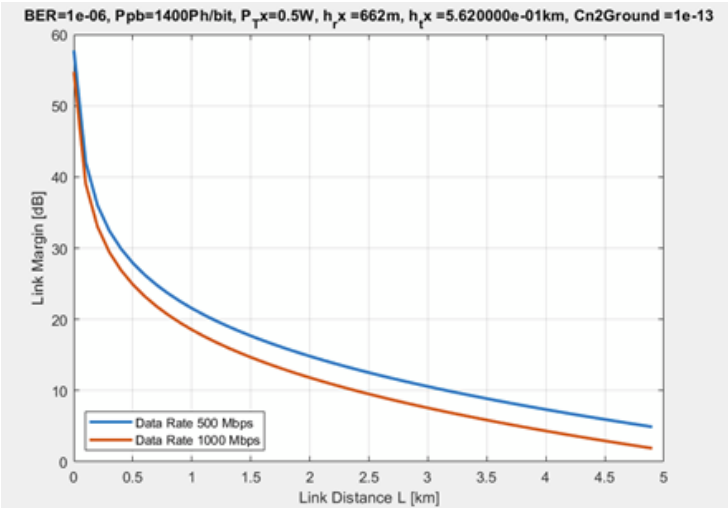

Abbildung 11: Berechnung des Link-Budgets für das in LARISSA-III zu verwendende Laserterminal vor jeglicher Designanpassung.

3.1.4. Anpassung des Terminal-Designs (WP 3400)

Schleifring und Tracking-Stabilität

Um ein kompakteres und leichteres Terminal zu entwickeln, das auf eine Drohne montiert werden kann, muss die für Larissa-II entwickelte Elektronik optimiert und verkleinert werden, damit sie in die geschlossene Struktur des Terminals passt. Das bedeutet zudem, dass alle Kabel und Fasern zwischen den Sensoren und Stellgliedern, die im LARISSA-II-Szenario an der Unterseite des Kardanrings angebracht waren und die die Tracking-Stabilität instabil machten und den Bewegungsbereich einschränkten, entfernt und ersetzt werden müssen. Eine mögliche Lösung für die externe Verlegung von Kabeln und Fasern besteht darin, den Original-Schleifring des Kardanrings durch einen angepassten Schleifring zu ersetzen, um alle benötigten Signale innerhalb des Kardanrings zu verlegen. Es wurden mehrere Tests mit dem aktuellen Schleifring des Herstellers des Kardanrings durchgeführt, wobei sich herausstellte, dass keines der HF-Signale geeignet war, wie in Abbildung 12 zu sehen ist.

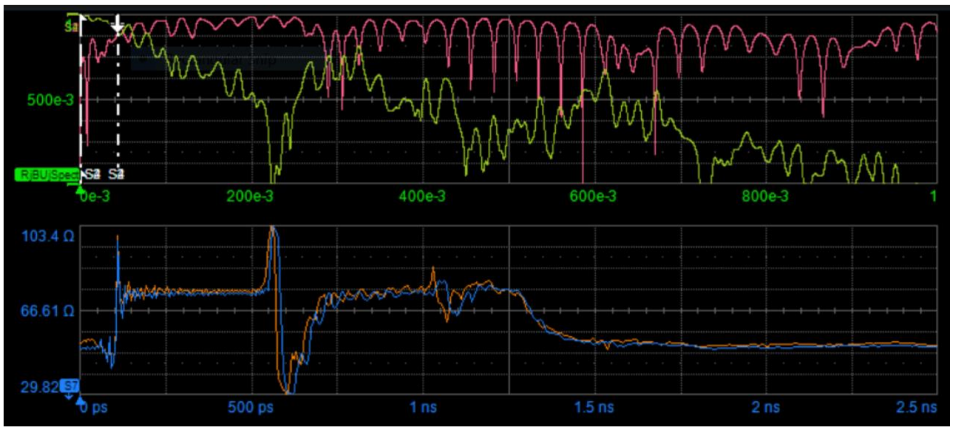

Abbildung 12: Beispiel für Signaloszillationen während der Bewegung des Terminals bei Drehung des Kardanrings.

Es wurden Gespräche mit potenziellen Lieferanten geführt, um eine geeignete Lösung zu entwickeln und zu integrieren, wobei eine Hybridlösung aus Glasfaser und elektronischem Schleifring vorgeschlagen wurde. Der limitierende Faktor für das mögliche Design war der sehr begrenzte Platz im Kardanring in Kombination mit der hohen Datenrate (> 1 GHz), die für das Terminal benötigt wird, wie in Abbildung 13 dargestellt. Eine endgültige Lösung, die umgesetzt werden soll, wurde jedoch nicht ermittelt. Es waren Vorversuche mit Prototypen erforderlich, die während der Projektlaufzeit nicht stattfanden.

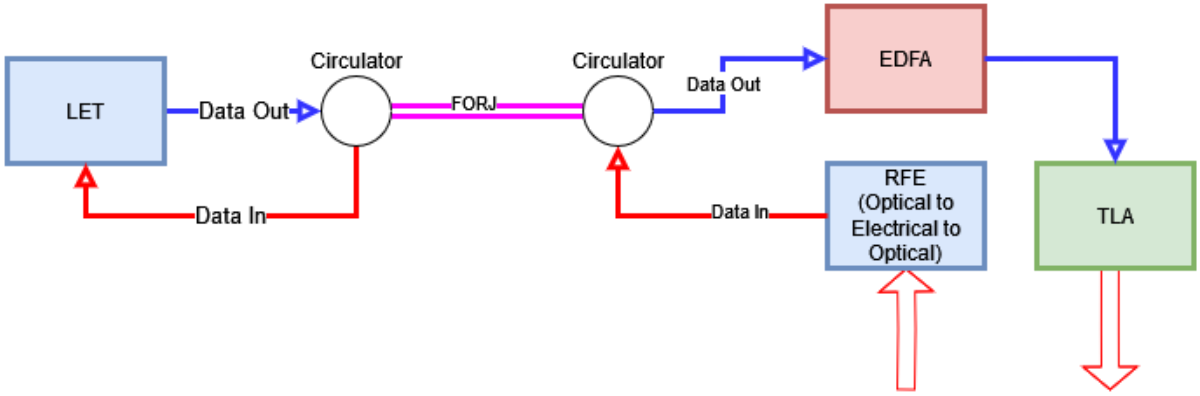

Abbildung 13: Schema für einen Hybrid-Schleifring, der in den Kardanring eingebaut werden soll, um die Tracking-Stabilität zu verbessern.

Parallel dazu wurde die Bandbreite des Tracking-Systems weiterentwickelt, mit dem Ziel, einen Teil des bei Mynaric bereits für andere luftgestützte Terminals des Unternehmens entwickelten Steuerungssystems in Mikrocontroller zu implementieren, um so die Möglichkeit zu schaffen, auf spezifische Funktionen und Optionen des Kardanrings wie interne IMU und Beschleunigungssensoren zugreifen zu können. Die Bewertung der möglichen Lösung bezüglich der Implementierung der Änderungen und der Mikrocontroller in den Kardanring wurde nicht abgeschlossen, so dass eine endgültige Lösung weder ermittelt noch umgesetzt wurde.

Anpassung des optischen Modells

Um den Entfernungsbereich von 10 m bei LARISSA-II auf ca. 100 m bei LARISSA-III (und in zukünftigen Anwendungen auch darüber hinaus) zu erweitern, sollten Komponenten und optische Lösungen, die in anderen Mynaric-Produkten und -Terminals eingesetzt werden, in dieses Terminal integriert und

optimiert werden. Die Bemühungen richten sich vor allem auf die Wiederverwendung von Komponenten anderer Mynaric-Produkte zur Aufteilung des Lichts auf den Sender- und den Empfängerpfad, mit dem Ziel, eine einzige größere Apertur zu verwenden oder die Gesamtgröße der Aperturen zu erhöhen. Ziel des Redesigns war es, die doppelte Funktionalität des Terminals beizubehalten: Es sollte sowohl für das aktuelle als auch für ein normales Kommunikationsszenario ohne das Zeit-/Phasenkompensationssignal geeignet sein. Die verschiedenen Möglichkeiten wurden mehrere Durchläufen und Bewertungen unterzogen, ohne dass man sich auf eine endgültige, für das Projekt geeignete Lösung einigen konnte.

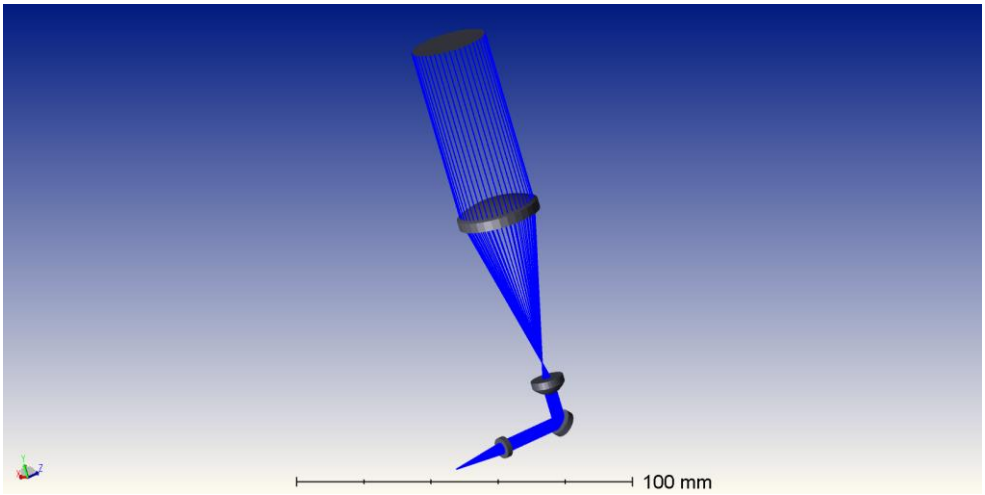

Abbildung 14: Beispiel für ein mögliches optisches Design-Szenario für das LARISSA-III-Laserterminal.

Terminal-Architektur

Die oben genannten Änderungen und ihre Implementierung in das Terminal hätten neben den für die Flugdemonstration erforderlichen Modifikationen zudem eine Anpassung der gesamten Terminalarchitektur erfordert. Auf diese Weise wäre das LARISSA-III-Terminal näher an den anderen luftgestützten Produkten von Mynaric und könnte dieselbe Systemarchitektur nutzen und implementieren, mit einem modulareren System, das eine einfache Kommunikation über einen Schleifring ermöglichen würde.

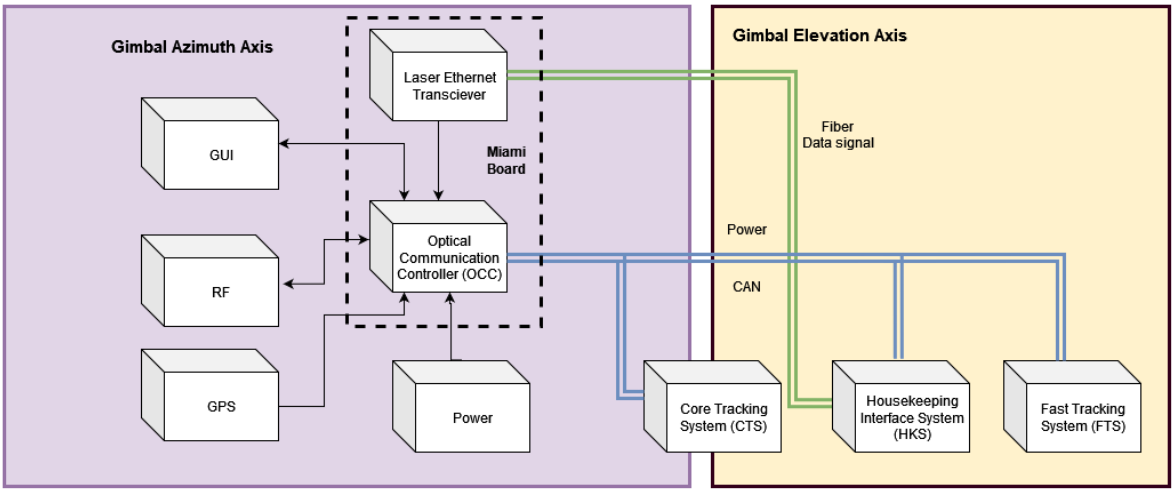

Abbildung 15: Modularitätsschema der Architektur des LARISSA-III-Terminals.

3.1.5. Anpassung der Zeit-/Phasenkompensation (WP 3500)

Ziel des Projekts LARISSA-III ist es, das im Projekt LARISSA-II entwickelte Terminal für Messungen in Innenräumen in einer Laborumgebung so anzupassen, dass es für die zeit-/phasenkompensierte Übertragung von Referenzsignalen in Außenbereichen mit einem kleinen UAV verwendet werden kann. Für das Zeit-/Phasen-Kompensationssignal ist das gleiche Konzept wie bei LARISSA-II vorgesehen, da keine Änderung der Signalfrequenz geplant war. Allerdings waren für Messungen mit hochdynamischen Bewegungen wie dies bei der Drohne der Fall ist, einige Optimierungen erforderlich. Das LARISSA-II-HF-Teilsystem funktionierte im statischen Modus erwartungsgemäß, musste jedoch für dynamische Bereiche verbessert werden. Bei Tests in einem dynamischen Bereich, wobei das Teilsystem in einem Terminal, eingebettet war, das sich auf einer Gondel bewegt, wurden starke Oszillationen des Signals beobachtet.

Das erste Ziel bestand darin, das Auftreten dieser Oszillationen zu untersuchen und deren Ursache zu ermitteln, um das System so aufzurüsten, dass es in einem Outdoor-Szenario funktioniert. Leider standen die erforderlichen Mitarbeiter nicht zur Verfügung, und es wurden zwei verschiedene Einstellungsverfahren eingeleitet, um HF-Experten für diesen Zweck zu gewinnen. In beiden Fällen wurden die entsprechenden Prozesse durchlaufen und geeignete Experten identifiziert und eingestellt: Die Zeit, die für das Onboarding in das Projekt und die Einarbeitung in das HF-Teilsystem aufgewendet wurde, ist jedoch verloren gegangen, da die Mitarbeiter das Projekt verlassen haben oder anderweitig eingesetzt worden sind. Auf diese Weise war es nicht möglich, das Phänomen der Oszillationen zu untersuchen, und es konnten keine Ursachen ermittelt werden. Während der Projektlaufzeit war somit keine Weiterentwicklung oder Anpassung des HF-Teilsystems möglich.

3.2. WP4000 – Anpassung des Laserterminals

Dieses Arbeitspaket wurde während der aktuellen Projektlaufzeit nicht bearbeitet.

3.3. WP5000 – Integration des Laserterminals und Flugdemonstration

Dieses Arbeitspaket wurde während der aktuellen Projektlaufzeit nicht bearbeitet.

4. Zusammenfassung

Das Hauptziel des Beitrags von Mynaric zum Projekt LARISSA-III bestand darin, ein System weiter zu verbessern, das in der Lage ist, Frequenzen für Antennenmessungen oberhalb von 1 GHz zu übertragen und gleichzeitig kompakt, klein und robust genug ist, um in eine mobile Plattform wie ein UAV integriert werden. zu können.

Ausgangspunkt war dabei das im Rahmen des Projekts LARISSA-II entwickelte Terminal, das in Bezug auf Größe, Gewicht und Leistung weiter verbessert und optimiert werden sollte, um HF-Antennenmessungen im Freien an einer Drohne durchführen zu können.

Das gesendete Signal mit Zeit-/Phasenkompensation musste untersucht und geprüft werden, um die Hauptursachen für die starken Oszillationen zu ermitteln, die im dynamischen Bereich beobachtet werden, und die im statischen Messmodus nicht auftreten. Aufgrund der sich ständig ändernden Verfügbarkeit von Mitarbeitern konnte die Untersuchung jedoch nicht durchgeführt werden, und es wurden weder Ursachen noch mögliche Lösungen ermittelt, um das System dahingehend zu verbessern, dass es eine Leistungsfähigkeit erreicht, die für in UAVs einzubauende Terminals geeignet ist.

Das optische Design des Terminals wurde mit dem Ziel bewertet, Lösungen zu übernehmen und zu implementieren, die bereits in anderen luft- oder weltraumgestützten Terminals von Mynaric verwendet werden. Die Bewertung war jedoch nur vorläufig, und es war nicht möglich, in der Projektlaufzeit eine für den Zweck geeignete endgültige Lösung auszuwählen.

Bei den Bemühungen, das Terminal kompakter und leichter zu machen, wurde eine Möglichkeit gefunden, den vorhandenen Schleifring des Kardanrings durch einen angepassten Hybridring zu ersetzen, der jedoch weder im Detail untersucht noch im Labor getestet wurde. Für eine endgültige Auswahl der richtigen Lösung und Komponenten sind weitere Untersuchungen und Bewertungen erforderlich.

Es wurden zahlreiche Maßnahmen zur Verbesserung der Tracking-Stabilität des Terminals ermittelt, die jedoch weder abgeschlossen noch innerhalb der Projektlaufzeit in Angriff genommen werden konnten.

Insgesamt ermöglichten die während der Projektlaufzeit durchgeführten Aktivitäten eine vorläufige Bewertung einiger Schlüsselbereiche für die Verbesserung des Laserterminals und seiner Anwendung auf einer UAV-Plattform. Es wurde jedoch keine endgültige Lösung identifiziert oder im Rahmen der Entwicklungsaktivitäten umgesetzt. Um die ursprünglich für den Beitrag von Mynaric im Rahmen des LARISSA-III-Projekts geplanten Ziele zu erreichen, müssen weitere Aktivitäten zur Anpassung des Designs (optischer Pfad, Tracking-System, Zeit-/Phasenkompensation) durchgeführt werden.

---------- *Ende des Dokuments* ----------

DLR BO | AR-ZF
Eing. 27. Juni 2024
Lfd. Nr. _____ / profil: _____

Berichtsblatt

1. ISBN oder ISSN	**2. Berichtsart** Abschlussbericht

3a. Titel des Berichts
Mynaric Lasercom GmbH Schlussbericht des BMWI-Verbundvorhabens
LARISSA-III: Laserstrahlbasierte Übertragung von phasenkritischen Hochfrequenzmesssignalen bewegter Mess-Plattformen und spezieller Nahfeld-Fernfeld Transformation für den Einsatz in der Antennenmesstechnik

3b. Titel der Publikation
Mynaric Lasercom GmbH Schlussbericht des BMWI-Verbundvorhabens
Entwicklung eines Outdoor-fähigen, masse- und leistungsoptimierten Laserterminals für unbemannte Fluggeräte zur Vermessung von großen Antennenanlagen auf Basis einer Referenzsignalübertragung über weglängenstabilisierte Laserstrecken mit integrierter Distanzmessung.

4a. Autoren des Berichts (Name, Vorname(n)) BONOMO Federica, MACHIN Miguel	**5. Abschlussdatum des Vorhabens** 01.03.2024
	6. Veröffentlichungsdatum
4b. Autoren der Publikation (Name, Vorname(n)) BONOMO Federica, MACHIN Miguel	**7. Form der Publikation** Aufnahme in öffentlicher Bibliothek (TIB)
8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse) Mynaric Lasercom GmbH, Bertha-Kipfmüller-Straße 2-8, 81249 Munich	**9. Ber.Nr. Durchführende Institution** 109PRT33907
	10. Förderkennzeichen 50 RK 2221 B
	11a. Seitenzahl Bericht 18
	11b. Seitenzahl Publikation 18
13. Fördernde Institution (Name, Adresse) Deutsche Raumfahrtagentur im Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. Königswinterer Str. 522-524 53227 Bonn	**12. Literaturangaben** 2
	14. Tabellen 0
	15. Abbildungen 13

16. Zusätzliche Angaben
Keine

17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum)
Keine Buchvorstellung

18. Kurzfassung

Hochwertige Antennenmesstechnik ist bis auf wenige Ausnahmen auf stationäre Messsysteme im Innenbereich beschränkt. Angesichts der immer größer werdenden SATCOM-Satelliten und Antennenfarmen stoßen die aktuellen Antennenmessverfahren zunehmend an ihre Skalierbarkeitsgrenzen, was sich vor allem in den relativ hohen Systemkosten niederschlägt. Aus diesem Grund, aber auch wegen der fehlenden Mobilität, existiert praktisch keine hochwertige Antennenmesstechnik für den Außenbereich. Zwar vereinfachen neueste Nahfeld-Fernfeld-Transformationsalgorithmen (z.B. FIAFTA) die Abtastung von Antennennahfeldern deutlich, allerdings ist die Übertragung der phasenkritischen Messsignale von der bewegten Nahfeldsonde zum Boden bei großen Systemen bei hohen Frequenzen noch immer ein dominierendes Problem und verursacht hohe Fehlerbeiträge in den transformierten Fernfelddiagrammen. Eine Lösung für dieses Problem war Gegenstand der im Projekt LARISSA-III durchgeführten Entwicklungen. Da selbst hochwertige Koaxialkabel zu hohe Übertragungsfehler für die oben beschriebenen Anwendungen verursachen, wurde im Projekt LARISSA die Entwicklung einer laserstrahlbasierten Übertragung kohärenter und analoger Hochfrequenzmesssignale initiiert und zunächst während LARISSA-II und jetzt in LARISSA-III weiterentwickelt.
Die Kernaufgabe der kohärenten und laserstrahlbasierten Signalübertragung war die Kompensation der Signalphase, die durch die sich ständig ändernde Laserstrahllänge beim Scannen des Nahfelds der Antenne verursacht wird. Der Beitrag von Mynaric sollte sich auf die Untersuchung möglicher Verbesserungsmethoden für die Phasenkompensationsfunktionalität in Bezug auf LARISSA-II bei einer Frequenz (1 GHz) konzentrieren, um ein besseres Ergebnis für den Transformationsalgorithmus für die Antennenmessung vom Nah- zum Fernfeld zu erhalten. Dies sollte mit der Entwicklung eines kompakteren und leichteren Laserterminals kombiniert werden.
Während der Laufzeit des LARISSA-III-Projekts, das kurzfristig beendet werden musste, beschränkte sich der Beitrag der Mynaric Lasercom GmbH auf die Untersuchung und vorläufige Bewertung möglicher optischer Lösungen für das Laserterminal. Auch optimierte Methoden zur Hochfrequenzsignalverteilung (1 GHz) innerhalb des Terminals wurden diskutiert, aber keine endgültige Lösung gefunden. Für das HF-Subsystem konnte keine Lösung für eine stabile phasenkompensierte Signalübertragung in Szenarien mit hohem Dynamikbereich gefunden werden.
Ein endgültiges optimiertes Design, das den Umfang von LARISSA-II erreicht, konnte weder identifiziert noch fertiggestellt oder entwickelt werden.

Die Integration des gesamten Systems in eine mobile Plattform hätte zur Entwicklung eines neuen, kostengünstigen Kompaktterminals auf COTS-Basis geführt, die Technologie der kommerziellen Terminals des Unternehmens skaliert und neue Konzepte getestet werden sollen, die in zukünftige Unternehmensprojekte integriert hätten werden können und sollen. Die Entwicklung wurde jedoch aufgrund geplanter Parallelentwicklungen, die jedoch wegen fehlender Ressourcen nicht ausgeführt werden konnten, nicht innerhalb der Projektdauer abgeschlossen.

19. Schlagwörter
Kohärente Signalübertragung, laserbasiert, Lasertechnik, Free Space Optics, FSO, Nahfeld-Fernfeld Transformation, FIAFTA, Satellitenbodenstationsantennen, Nahfeld-Antennenmesstechnik im Außenbereich

20. Verlag	**21. Preis**
Technische Informationsbibliothek (TIB); 30167 Hannover	

Document Control Sheet

1. ISBN oder ISSN	**2. Type of Report** Final Report
3a. Report Title Mynaric Lasercom GmbH Schlussbericht des BMWI-Verbundvorhabens LARISSA-III: Laserstrahlbasierte Übertragung von phasenkritischen Hochfrequenzmesssignalen bewegter Mess-Plattformen und spezieller Nahfeld-Fernfeld Transformation für den Einsatz in der Antennenmesstechnik	
3b. Title of Publication Mynaric Lasercom GmbH Schlussbericht des BMWI-Verbundvorhabens Entwicklung eines Outdoor-fähigen, masse- und leistungsoptimierten Laserterminals für unbemannte Fluggeräte zur Vermessung von großen Antennenanlagen auf Basis einer Referenzsignalübertragung über weglängenstabilisierte Laserstrecken mit integrierter Distanzmessung	
4a. Author(s) of the Report (Family Name, First Name(s)) BONOMO Federica, MACHIN Miguel	**5. End of Project** 01.03.2024
	6. Publication Date
4b. Author(s) of the Publication (Family Name, First Name(s)) BONOMO Federica, MACHIN Miguel	**7. Form der Publikation** Admission to public library (TIB)
8. Performing Organization(s) (Name, Address) Mynaric Lasercom GmbH, Bertha-Kipfmüller-Straße 2-8, 81249 Munich	**9. Originator's Report No.** 109PRT33907
	10. Reference No. 50 RK 2221 B
	11a. No. of Pages Report 18
	11b. No. of Pages Publication 18
13. Sponsoring Agency (Name, Address) Deutsche Raumfahrtagentur im Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. Königswinterer Str. 522-524 53227 Bonn	**12. No. of References** 2
	14. No. of Tables 0
	15. No. of Figures 13
16. Supplementary Notes No additional notes	
17. Presented at (Title, Place, Date) No book launch foreseen	

18. Abstract

With few exceptions, high-quality antenna measurement technology is limited to stationary measurement systems indoors. In view of the ever-growing SATCOM satellites and antenna farms, the current antenna measurement methods are increasingly reaching their scalability limits, which is reflected above all in the relatively high system costs. For this reason, but also because of the lack of mobility, there is practically no high-quality antenna measurement technology for outdoor use. Although the latest near-field-far-field transformation algorithms (e.g. FIAFTA) significantly simplify the scanning of antenna near fields, the transmission of the phase-critical measurement signals from the moving near-field probe to the ground is still a dominant problem in large systems at high frequencies and causes high error contributions in the transformed far-field diagrams. A solution to this problem was the subject of the developments carried out in the LARISSA-III project. Since even high-quality coaxial cables cause transmission errors that are too high for the applications outlined above, the development of a laser beam-based transmission of coherent and analog high-frequency measurement signals was initiated in LARISSA project and further developed first during LARISSA-II, and now in LARISSA-III.

The core task of the coherent and laser beam-based signal transmission was the compensation of the signal phase caused by the constantly changing laser beam length while scanning the near field of the antenna. Mynaric contribution was meant to focus on the investigation of possible improvements methods for the phase compensation functionality with respect to LARISSA-II at a frequency (1 GHz), in order to get a better result for the near-to-far-field antenna measurement transformation algorithm. This to be combined to a more compact in size and light weight laser terminal development.

During the duration of the LARISSA-III project, which was early terminated, the contribution of Mynaric Lasercom GmbH was limited to the investigation and preliminary evaluation of possible optical solutions for the laser terminal. Also optimized methods for high-frequency signal distribution (1 GHz) within the terminal have been discussed but not a final solution identified. On the RF sub-system, no identification of a solution for a stable phase-compensation signal transmission in high-dynamic range scenarios could be carried out.

A final optimized design achieving the scope of LARISSA-II could not been identified and finalized, nor developed.

The integration of the whole system into a mobile platform would have led to develop a new low-cost compact terminal based on COTS, scaling the technology of the company's commercial terminals and testing new concepts to incorporate into future company projects. However, the development has not been completed and accomplish within the duration of the project, due to non-availability of resources for required parallel developments.

19. Keywords Coherent Signal Transmission, Laser-based, Laser Technology, Free Space Optics, FSO, Near-field Far-field Transformation, FIAFTA, satellite-ground station antennas, outdoor near-field antenna measurement technology	
20. Publisher Technische Informationsbibliothek (TIB); 30167 Hannover	**21. Price**