

SERANIS: IN-ORBIT-DEMONSTRATION VON SPITZENTECHNOLOGIE AUF EINEM KLEINSATELLITEN

Johannes Bachmann*, Artur Kinzel*, Francesco Porcelli*, Alexander Schmidt*, Robert Schwarz†, Christian Hofmann†, Roger Förstner*, Andreas Knopp†

* Institut für Raumfahrttechnik und Weltraumnutzung, Universität der Bundeswehr München,
Werner-Heisenberg-Weg 39, 85579 Neubiberg, Deutschland

† Institut für Informationstechnik, Universität der Bundeswehr München, Werner-Heisenberg-Weg 39, 85579
Neubiberg, Deutschland

Zusammenfassung

Durch den Einsatz innovativer Technologien im Weltraum haben weltraumgestützte Dienste in den letzten Jahren deutlich an Bedeutung gewonnen. In der Entwicklung neuer Ansätze und Technologien ist es unerlässlich die Funktionalität und Robustheit direkt im Weltraum unter realen Einsatzbedingungen zu testen. Dies stellt jedoch auch heute noch eine Schwierigkeit dar, da die Möglichkeiten solcher In-Orbit-Demonstrationen den Forschern und Entwicklern nicht ohne erhebliche Vorlaufzeit und Kosten zur Verfügung stehen.

Die Universität der Bundeswehr München (UniBw M) leistet in verschiedenen Forschungszentren innovative Entwicklungs- und Forschungsarbeit zu einer Vielzahl relevanter Themen für die Raumfahrt und weltraumgestützter Dienste. Komplementär zur etablierten Forschungsarbeit im Labor am Boden, ist als nächster Schritt zu einem agilen Forschungs- und Entwicklungsprozess ein In-Orbit-Demonstrations- und Testprogramm eingeführt worden. Im Mittelpunkt dieses Programms führt die UniBw M ein Projekt zur Technologiedemonstration mit der Bezeichnung Seamless Radio Access Networks for Internet of Space (SeRANIS) durch.

Ziel von SeRANIS ist es, eine schnell einsetzbare, multifunktionale Weltraummission mit einer großen Anzahl innovativer Experimente auf dem Kleinsatelliten ATHENE-1 im Low Earth Orbit bereitzustellen. Der Start von ATHENE-1 in den Weltraum ist für das Jahr 2025 geplant. SeRANIS bietet eine wissenschaftliche Umgebung für Forscher zur gemeinsamen Untersuchung, Bewertung, Entwicklung, Verifikation und Demonstration neuartiger Methoden und Technologien im Weltraum und am Boden. Zu den wissenschaftlichen Bereichen gehören Weltraumkommunikation, einschließlich Breitbandkommunikation und Internet of Things, Radio-Science, Artificial Intelligence basierte Autonomie, Global Navigation Satellite System Technologien, optische und infrarote Erdbeobachtung sowie Algorithmen zur Objekterkennung. Zusätzlich werden neue Konzepte für den Betrieb von Satelliten, moderne Strukturen, innovative Techniken zur Überwachung des Systemzustands und elektrische Antriebe im Weltraum demonstriert.

Diese Veröffentlichung stellt das Projekt SeRANIS vor. Dabei werden der Projektrahmen, der Zeitplan und der aktuelle Projektstatus sowie die Auswahl der Satellitenplattform präsentiert. Zusätzlich wird die Mission mit den wissenschaftlichen Forschungsbereichen, der Missionsarchitektur, dem Basisdesign sowie der Orbitauswahl erläutert.

Keywords

SeRANIS; Kleinsatellitenmission; Forschungsnetzwerk; In-Orbit Demonstration; Raumfahrtinnovation; New Space

Abkürzungen

5G	Fifth-Generation Wireless	CTE	Coefficient of Thermal Expansion
6G	Sixth-Generation Wireless	DHS	Data-Handling System
AI	Artificial Intelligence	dtec.bw	Zentrum für Digitalisierungs- und Technologieforschung der Bundeswehr
AOCS	Attitude and Orbit Control System	FDIR	Fault Detection, Isolation, and Recovery
AR	Acceptance Review	FMA	Full Motion Antenna
C3	Command-Control-Communications	GEO	Geosynchronous Equatorial Orbit
CDR	Critical Design Review		

GNSS	Global Navigation Satellite System
IoT	Internet of Things
LCT	Laser Communication Terminal
LEO	Low Earth Orbit
LTAN	Local Time of Ascending Node
MDR	Mission Definition Review
MMU	Mass-Memory Unit
MOSAIC	Multispectral Object Sensing by AI-processed Cameras
OBC	On-Board Computer
OGS	Optical Ground Station
P/F	Platform
P/L	Payload
PCS	Payload Control Subsystem
PDR	Preliminary Design Review
QR	Qualification Review
RAAN	Right Ascension of the Ascending Node
SeRANIS	Seamless Radio Access Networks for Internet of Space
SRR	System Requirements Review
SSO	Sonnensynchroner Orbit
TTC	Telemetry, Tracking, and Command
UniBw M	Universität der Bundeswehr München

1. EINFÜHRUNG

Weltraumgestützte Dienste haben in den letzten Jahren in ihrer Bedeutung deutlich zugenommen. Dienste wie Kommunikation, Erdbeobachtung, Navigation, Aufklärung, Sicherheit und Weltraumforschung sind aus dem alltäglichen Leben nicht mehr wegzudenken. Einer der wichtigsten Faktoren hinter den jüngsten Entwicklungen im Raumfahrtsektor ist der Erfolg innovativer Technologien, die im Weltraum getestet, verifiziert und eingesetzt werden [1].

Neuartige Technologien in der Raumfahrtanwendung werden in erster Linie am Boden erforscht, entwickelt und getestet. Um ihren technischen Reifegrad zu überprüfen, ist es unumgänglich ihre Leistung im Weltraum zu verifizieren [2, 3]. Zusätzlich können neuartige Technologien für die Raumfahrt und dessen Funktionen nicht vollständig am Boden getestet werden.

Tests und Verifikationen im Weltraum sind für Forscher und Entwickler im Hinblick auf die verfügbaren Möglichkeiten schwierig durchzuführen, da die damit verbundenen Kosten und Vorlaufzeiten sehr hoch

sind. Dieser Aspekt ist auch im Rahmen der Arbeit am Projekt Flying Laptop [4–6] aufgegriffen. Flying Laptop, der an der Universität Stuttgart in Zusammenarbeit mit der Airbus DS GmbH entwickelte Satellit, wurde 2017 erfolgreich in den Low Earth Orbit (LEO) gebracht. Seit der Inbetriebnahme werden die Vorteile eines Kleinsatelliten als kosten- und zeiteffiziente In-Orbit-Plattform für die Erprobung neuartiger Technologien demonstriert.

Eine weiteres erfolgreiches Projekt in der Demonstration von Technologie auf einem Kleinsatellit ist ESAIL [7], welches im Rahmen eines Programms der European Space Agency zur Erfassung von Schiffen auf See realisiert wurde. Der Kleinsatellit der ESAIL Mission basiert auf der Plattform Triton-2, entwickelt und hergestellt von LuxSpace Sàrl. ESAIL ist im Jahr 2020 in den Orbit gebracht worden und ermöglicht seither das Erfassen von zwei Millionen Nachrichten am Tag, ausgesendet von 70000 verschiedenen Schiffen. Das ESAIL Projekt demonstriert den Wert von Kleinsatelliten im Hinblick auf schnelle Entwicklungszeiten, Kosteneinsparungen und die Erprobung neuer Technologien im Weltraum.

1.1. Kleinsatelliteninnovation an der UniBw M

Seit ihrer Gründung ist die Erforschung und Entwicklung innovativer Technologien und Methoden für die Raumfahrt und weltraumgestützter Dienste ein großer Schwerpunkt der Universität der Bundeswehr München (UniBw M). Nun wird mit dem Projekt Seamless Radio Access Networks for Internet of Space (SeRANIS) ein öffentlich zugängliches multifunktionales Experimentallabor im Orbit bereitgestellt. Somit dient SeRANIS als gemeinsames Forschungslabor und Demonstrator von interdisziplinären Innovationen aus der Wissenschaft, Industrie, Bundeswehr und Gesellschaft.

Das Projekt SeRANIS wird von der Bundesregierung Deutschland gefördert und ist Teil des Zentrums für Digitalisierungs- und Technologieforschung der Bundeswehr (dtec.bw), das zahlreiche Schlüssel- und Zukunftstechnologien strategisch bündelt sowie neue Forschungskooperationen mit Wissenschaft, Wirtschaft, Verwaltung und Gesellschaft anstrebt.

SeRANIS dient als zentrales Element in dtec.bw, in dem Missionsplanung, Bodenstationen und Auswertungszentren möglichst effizient und effektiv gestaltet und genutzt werden [9].

Im Gegensatz zu isolierten Forschungen an Einzeltechnologien, werden die Potenziale aus dem Zusammenschluss von vielen Innovationen betrachtet. Es entsteht eine Technologieplattform, an der sich Wissenschaftler aus unterschiedlichen Disziplinen beteiligen können. Darüber hinaus soll die Forschungsumgebung auch als eine Demonstrationsplattform für Anwender dienen, die an der Erforschung und Erprobung von neuen Methoden und Technologien in der Raumfahrt interessiert sind. Das Projekt SeRANIS bietet Möglichkeiten für Start-ups und die Industrie neue Technologien zu

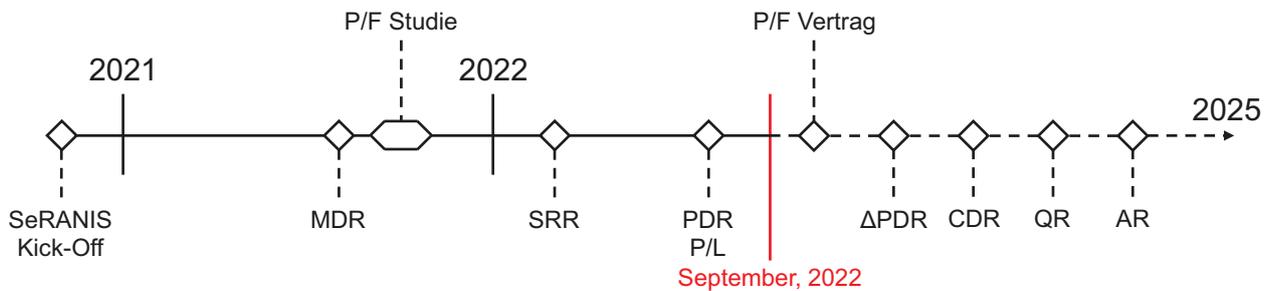


BILD 1. Zeitplan des SeRANIS Projekts [8]

testen und sie der Bundeswehr zu demonstrieren. Innerhalb von SeRANIS werden eine Vielzahl von Technologien kohärent kombiniert und zum Einsatz gebracht. Daraus entsteht ein vollkommen neuartiger Ansatz für Digitalisierung vom und im Weltraum.

2. PROJEKT SERANIS

Dieser Abschnitt enthält Details zum Projektrahmen von SeRANIS, dem Zeitplan und dem aktuellen Status des Projekts sowie dem Auswahlprozess einer geeigneten Satellitenplattform.

2.1. Projektrahmen

Der Projektrahmen von SeRANIS ist durch verschiedene Interessengruppen motiviert, zu denen das Bundesministerium der Verteidigung, die Bundeswehr, das dtec.bw und die UniBw M gehören. Das Projekt SeRANIS soll die Forschung und Entwicklung von Schlüsseltechnologien in den Bereichen Kommunikation, Navigation, Artificial Intelligence (AI) und moderner Betrieb von Satelliten in einer Satellitenmission ermöglichen. Darüber hinaus soll die technologische Reife aller Schlüsseltechnologien, die im Rahmen des Projekts erforscht und entwickelt werden, im Orbit und am Boden untersucht und verifiziert werden [9].

Die entwickelten Schlüsseltechnologien werden auf dem Kleinsatelliten von SeRANIS, genannt ATHENE-1, und in neu etablierten Bodeneinrichtungen an der UniBw M demonstriert. Der Start von ATHENE-1 in den LEO ist für das Jahr 2025 geplant (siehe TAB 1).

Die an der UniBw M errichtete experimentelle Bodenstation stellt einen zentralen Knoten für die bodengestützte Forschung des SeRANIS Projekts und für den an Bord von ATHENE-1 durchgeführten Nutzlastbetrieb dar.

Im Rahmen von SeRANIS werden mehr als 15 technologische Entwicklungen auf einer einzigen Satellitenplattform im Orbit untersucht und getestet. Darüber hinaus werden neue modellbasierte Methoden der Entwicklung, des Systems Engineering und des Betriebs (Industrie 4.0) innerhalb des Projekts entwickelt und angewandt. Die Schlüsseltechnologien werden in Abschnitt 3.1 und [8] detaillierter vorgestellt.

ATHENE-1

Start	2025
Plattformmasse	< 200 kg
Nutzlastmasse	< 90 kg
Orbit	SSO, 500 km - 600 km

TAB 1. Kennzahlen von ATHENE-1

In dem Projekt sollen nicht nur wissenschaftliche Ergebnisse erzeugt, sondern auch geteilt werden. Die Verbreitung des gesammelten Wissens und der Expertise innerhalb des Projekts soll durch Veröffentlichungen und Kooperationen erfolgen.

2.2. Zeitplan und Projektstatus

Das Projekt SeRANIS wurde Ende 2020 gestartet und plant den Start von ATHENE-1 in 2025. Dieser kurze Zeitplan wird durch den Hybrid-Space Projektansatz [8] und der Verwendung einer kommerziellen Satellitenplattform ermöglicht, wodurch ein reaktives Gesamtprojekt von Konzept bis Fertigstellung entsteht [10].

Der Projektplan folgt den typischen Meilensteinen aus Raumfahrtprojekten [11] (siehe BILD 1), dem Mission Definition Review (MDR), dem System Requirement Review (SRR), Preliminary Design Review (PDR), Critical Design Review (CDR), Qualification Review (QR) und dem Acceptance Review (AR). Die Anzahl der Meilensteine ist auf ein Minimum beschränkt, um den Fokus auf die Entwicklung der experimentellen Nutzlast zu legen, aber auch um einen zufriedenstellenden Standard der Produktabsicherung für den Erfolg der Mission zu gewährleisten. Im Juli 2022 hat das Projekt erfolgreich den PDR der Nutzlast durchgeführt.

2.3. Auswahl der Plattform

Der Forschungsschwerpunkt im Rahmen des Projekts SeRANIS ist die wissenschaftliche Innovation, die von verschiedenen Instituten innerhalb der UniBw M und von Kooperationspartnern entwickelt wird. Die Kombination dieser Experimente bildet die Nutzlast an Bord des Satelliten ATHENE-1. Die Entwicklung und Produktion des Satelliten inklusive der Integration der Nutzlast wird von der Industrie durchgeführt.

Angesichts des anspruchsvollen Zeitplans, des begrenzten finanziellen Budgets und des Bedarfs an einer zuverlässigen Plattform, soll eine bereits etablierte Plattform an die Anforderungen von SeRANIS angepasst werden. Dabei ist es wichtig, dass die bestehende Plattform nur geringfügige Änderungen benötigt. Darüber hinaus ermöglicht die Beschaffung einer bereits bestehenden Plattform den Fokus auf die Entwicklung und möglichst effektive Nutzung der wissenschaftlichen Nutzlast von SeRANIS. Eine nicht-wissenschaftliche und bereits bestehende Plattform hat zudem den Vorteil, dass plattformbasierte Randbedingungen bereits definiert sind. Dadurch können alle Experimente, die an Bord von ATHENE-1 durchgeführt werden, besser auf die Plattform abgestimmt und mit einer höheren Erfolgsquote im Hinblick auf den Zeitplan des SeRANIS Projekts abgeschlossen werden.

3. MISSION

Die Mission innerhalb des SeRANIS Projekts besteht aus vielen unterschiedlichen Aspekten und Randbedingungen, die berücksichtigt werden müssen, um die definierten Projektziele zu erreichen. Das übergeordnete Missionsziel ist die Ermöglichung und Unterstützung der Forschung und Entwicklung von Schlüsseltechnologien in allen Digitalisierungsbereichen. Darüber hinaus soll die technologische Reife aller Schlüsseltechnologien, die im Rahmen des Projekts erforscht und entwickelt werden, untersucht und verifiziert werden. Im Fokus stehen Technologien in den Bereichen wie Kommunikation, Navigation, AI und moderne Satellitenbetriebsmethoden. Diese Forschungsvorhaben werden im folgenden Abschnitt detaillierter vorgestellt. Nachfolgend wird die Missionsarchitektur, das Basisdesign sowie der Prozess der Orbitauswahl erläutert.

3.1. Forschungsbereiche

Die einzelnen Forschungsbereiche und ihre wichtigsten Aspekte, die im Rahmen des SeRANIS Projekts im Weltraum und am Boden durchgeführt werden, sind in BILD 2 dargestellt. Dabei sind die Forschungsbereiche in vier Kategorien unterteilt:

- **ATHENE-1**
Experimente sowie Demonstratoren die an Bord des SeRANIS Satelliten ATHENE-1 durchgeführt werden.
- **UniBw M Bodenstation**
Weiterentwicklungen und Forschungen an der UniBw M Bodenstation.
- **ATHENE-1 & UniBw M**
Experimente die eine Kombination aus Entwicklungen an Bord von ATHENE-1 sowie an der UniBw M Bodenstation demonstrieren.
- **Mission**
Forschungen die im Bereich der Missionsplanung für Raumfahrtprojekte durchgeführt werden.

Nachfolgend sind die einzelnen Experimente, Demonstratoren und Forschungseinrichtungen kurz vorgestellt.

3.1.1. 5G/6G-Netzwerke

Im Rahmen des SeRANIS Projekts soll eine realistische Testumgebung für Fifth Generation (5G) und zukünftige Sixth Generation (6G) New Radio-Technologien auf dem Campus der UniBw M aufgebaut werden. Dieses Testnetzwerk umfasst kommerzielle Basisstationen, die den gesamten Campus abdecken, Indoor-Software-Defined-Radio-Basisstationen in den Laboren der UniBw M, ein flexibles 3rd Generation Partnership Program konformes Kernnetzwerk und ATHENE-1 als zentrales nicht-terrestrisches Element des Netzwerks [12, 13].

3.1.2. Full Motion Antenna und Optical Ground Station

An der UniBw M wird eine Full Motion Antenna (FMA) und eine Optical Ground Station (OGS) für die Integration von ATHENE-1 in terrestrische Netzwerke aufgebaut. Dabei dient die FMA als Schnittstelle für ATHENE-1 in der Kommunikation im X- und Ka-Band. Die OGS wird zur Untersuchung des optischen Funkkanals und für die Entwicklung spezifischer Übertragungsverfahren für den Free Space Optical (FSO) Kanal eingesetzt. Zusätzlich ermöglicht die OGS eine Demonstration von hohen Datenraten und eine breitbandige Anbindung von ATHENE-1.

3.1.3. IoT-Kommunikation

Satellitengestützte Systeme wie SeRANIS ermöglichen für Technologien wie Internet of Things (IoT) globale Abdeckung, insbesondere für Endgeräte an abgelegenen Orten und in Gebieten ohne terrestrischer Infrastruktur. In SeRANIS werden IoT-Dienste angewendet, um diese Schlüsseltechnologie zu erweitern und für die Standardisierung in 5G- und zukünftigen 6G-Technologien zu untersuchen [14, 15].

3.1.4. Laser-Kommunikationsterminal

Im Rahmen des SeRANIS Projekts soll ein Laser Communication Terminal (LCT) in ATHENE-1 integriert werden. Das LCT soll die Machbarkeit optischer Kommunikationsverbindungen zwischen Boden und LEO für den Routinebetrieb demonstrieren. Zusätzlich wird ein speziellerer Mechanismus für eine unabhängige Ausrichtung des LCT in Richtung OGS eingesetzt [16].

3.1.5. Hybride Beamforming-Technologie

Um einen qualitativ hochwertigen Dienst für künftige 5G- und 6G- Kommunikationsnetzwerke zu bieten, wird im Rahmen des SeRANIS Projekts eine phasengesteuerte Satellitenantenne mit hybrider (analoger/digitaler) Beamforming-Technologie entwickelt. Ziel des hybriden Beamforming-Technologie Experi-

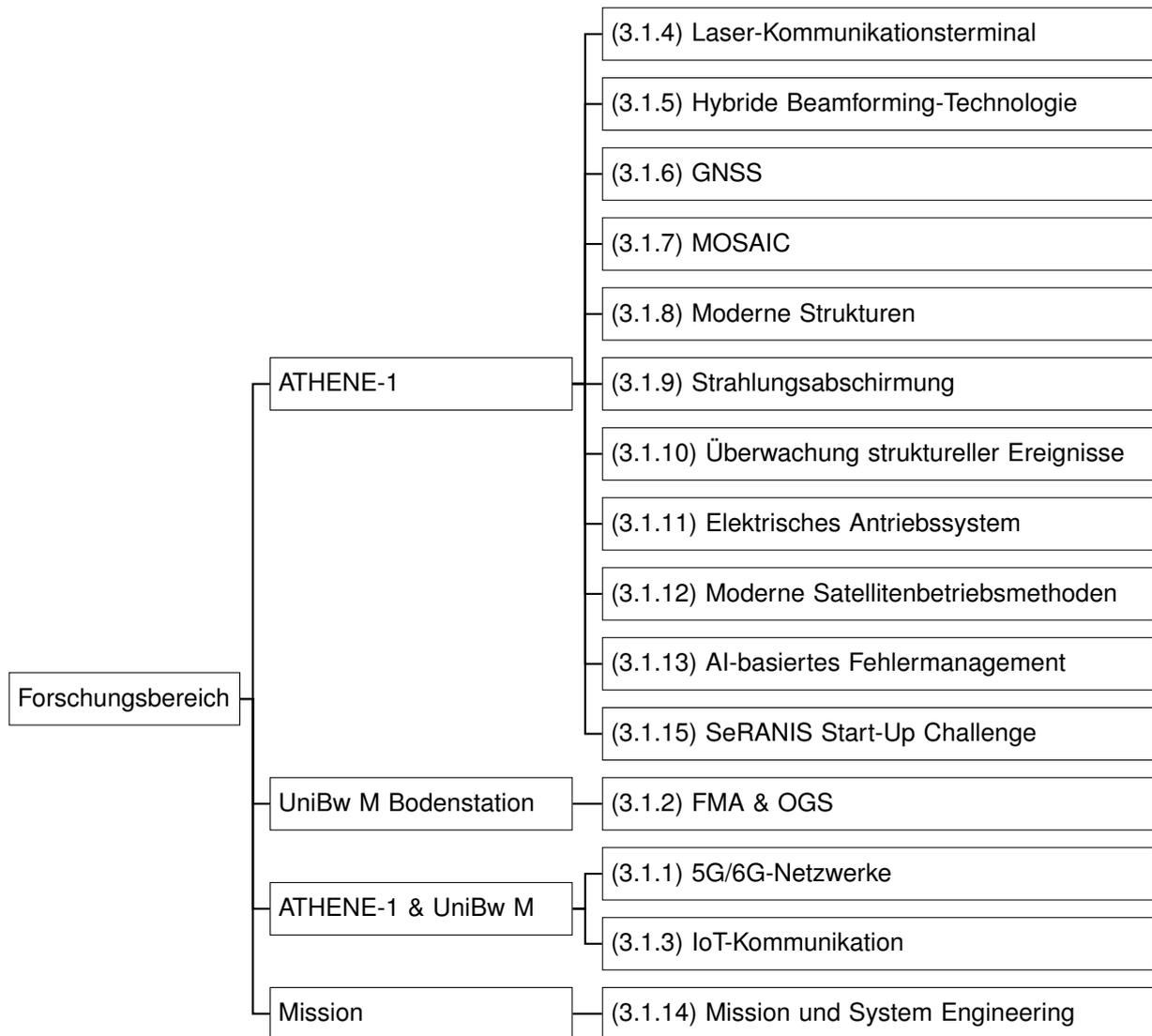


BILD 2. Forschungsbereiche im Projekt SeRANIS

ments ist es, das Design der digitalen Verarbeitung zu untersuchen und einen optimalen Kompromiss zwischen Strahlformungsleistung und Energieverbrauch an Bord des Satelliten zu finden [17].

3.1.6. GNSS

Das Global Navigation Satellite System (GNSS)-basierte Experiment an Bord ATHENE-1 unterteilt sich in zwei Bereiche:

- Untersuchung der räumlichen und zeitlichen Verteilung von GNSS-Störquellen (Spoofers und Störsender) auf der ganzen Welt [18].
- Nutzung von GNSS-Signalen für die Fernerkundung der Erdatmosphäre durch Radio-Okkultationsmessungen und der Erdoberfläche durch Radio-Reflektometriemessungen [19,20].

Beides erfolgt durch eine analytische Untersuchung der an Bord von ATHENE-1 empfangenen GNSS-Daten.

3.1.7. MOSAIC

Innerhalb des Experiments Multispectral Object Sensing by AI-processed Cameras (MOSAIC) wird ein infrarot- und ein visuelles Detektionssystem an Bord von ATHENE-1 eingesetzt. Die geplanten Detektionssysteme werden durch erweiterte Verarbeitungsmethoden an Bord des Satelliten ergänzt, um relevante Objekte in der oberen Erdatmosphäre zuverlässig zu erkennen, zu identifizieren und zu verfolgen [21].

3.1.8. Moderne Strukturen

Das Ziel dieser Forschung besteht darin, die Auswirkungen der thermischen Ausdehnung von Strukturen zu kompensieren. Ein neuartiger Ansatz ist die Verwendung von sogenannten Metamaterialien [22], die einen negativen Wärmeausdehnungskoeffizienten (CTE) haben. Dieser negative CTE ermöglicht a) eine erhebliche Verbesserung der passiven thermischen Stabilität von Satellitenstrukturen [23] und b) die Erforschung neuer Möglichkeiten zur aktiven Stabilisierung von Satellitenstrukturen durch

das gezielte Erhitzen an ausgewählten Stellen der Struktur [24, 25].

3.1.9. Strahlungsabschirmung

Innerhalb dieser Forschungsgruppe werden integrierte Funktionsschichten in Strukturbauteilen aus faserverstärkten Verbundwerkstoffen entwickelt. Dabei werden zwei Ansätze untersucht: die Verbesserung der Strahlungsabschirmung im Weltraum und die Verbesserung der Fähigkeit zur langfristigen Lagerung von gasförmigen Treibstoffen in Satellitentanks.

3.1.10. Überwachung struktureller Ereignisse

Das Ziel dieses Experiments ist die Entwicklung und Anwendung von Methoden zur Erkennung von Einschlagereignissen durch Mikrometeoriten und Weltraummüll auf der Grundlage von gesammelten Schwingungsdaten.

3.1.11. Elektrisches Antriebssystem

Dieses Experiment untersucht die Fähigkeiten von elektrischen Antriebssystemen bei der Durchführung von Orbitalmanövern sowie im Einsatz zur Lageregelung von Raumfahrzeugen. Der Aufbau des elektrischen Antriebssystems besteht aus einem neuartigen elektrostatischen Plasmtriebwerk für Orbitalmanöver und mehreren Vakuum-Arc-Triebwerken für die Feinausrichtung des Satelliten [26, 27].

3.1.12. Moderne Satellitenbetriebmethoden

Im Rahmen des Projekts SeRANIS werden Schlüsseltechnologien und -methoden für den modernen Satellitenbetrieb erarbeitet:

- Bewertung und Verbesserung von Betriebskonzepten für die Nahbereichs-Rendezvous-Phase einer On-Orbit-Servicing-Mission.
- Bereitstellung von numerisch optimierten Steuerungssequenzen für das Lageregelungssystem des Satelliten.
- Untersuchung eines hochentwickelten Bodenplanungssystems, zusammen mit einem einfachen Mechanismus zur Entscheidungsfindung an Bord, zur Optimierung des Betriebs für die verbesserte Nutzung der Ressourcen an Bord [28].
- Nutzung satellitengestützter Echtzeit-Telekommunikationsnetze mit geringer Latenz, die für die Nutzung von Satellitentelefonen am Boden in Kombination mit der Extraktion von Informationen an Bord konzipiert sind.
- Bereitstellung einer Möglichkeit, anspruchsvolle Uplink-Szenarien zuverlässig zu betreiben.
- Implementierung des Unified Space Link Protocol [29] auf ATHENE-1 um wichtige Erfahrungen mit diesem Übertragungsprotokoll der nächsten Generation zu sammeln.
- Untersuchung von Methoden für eine autonome Launch and Early Operations Phase.

- Fault Detection, Isolation, and Recovery (FDIR) Funktionalitäten auf der Grundlage von dem European Cooperation for Space Standardization - Packet Utilization Standard [30].
- Automatische Erstellung und autonome Durchführung von Übertragungsverfahren an Bord bei Kontakt mit der Bodenstation.
- Realisierung regelmäßiger Live-Übertragung von Schlüsseldaten der Satellitentelemetrie.

3.1.13. AI-basiertes Fehlermanagement und Beseitigung von Weltraummüll

Das AI-basierte Fehlermanagement Experiment untersucht AI-Methoden zur Erweiterung des FDIR-Systems. Dabei werden potenzielle Fehler des Satelliten mit Hilfe der Satellitentelemetrie und AI-basierten Methoden vorhergesagt, erklärt und vermieden [31, 32].

Zusätzlich wird in dieser Forschungsgruppe die Entwicklung eines AI-basierten Reglers für die Durchführung von autonomen Andockmanövern für Aktivitäten wie die Entfernung von Weltraummüll mittels autonomer und optimaler Kontrollmethoden umgesetzt [33].

3.1.14. Mission und System Engineering

Innerhalb des SeRANIS Projekts hat das Mission und System Engineering das Ziel, zusätzlich zu den klassischen Methoden, neue Lösungen für Aufgaben wie das Management von Anforderungen, Meilensteinen und Informationen zu erforschen und zu implementieren. Darüber hinaus werden neue Methoden für die Missionsplanung und -analyse, die Missionsabsicherung, den autonomen Betrieb von Nutzlasten, die Systemoptimierung mittels AI, das modellbasierte System Engineering und die schnelle Entwicklung von Satelliten geforscht.

3.1.15. SeRANIS Start-Up Challenge

Innerhalb des Projekts SeRANIS ist die Start-Up Challenge 'Per Anhalter in den Orbit' [34] initiiert worden, mit dem Ziel, die Erforschung, Entwicklung, Tests und Demonstration von technischen Anwendungen für den Einsatz im Weltraum zu fördern.

3.2. Missionsarchitektur

Die im Abschnitt 3 und 3.1 genannten Ziele und Forschungsaspekte führen zur Definition der Missionsarchitektur. Die Missionsarchitektur, wie im BILD 3 dargestellt, besteht aus dem übergeordneten Missionskonzept und acht Hauptsegmenten. Die acht Hauptsegmente beinhalten alle Gegenstände der Forschung (Subjects), die Nutzlast (Payload), die Satellitenplattform (Spacecraft Bus), das Launch Segment, den Orbit, die Command-Control-Communications (C3) Architektur, das Bodensegment (Ground Segment) und das Mission Operations Segment [35].

Das Missionskonzept beschreibt das Zusammenwirken aller acht Missionssegmente, um die Forschung,

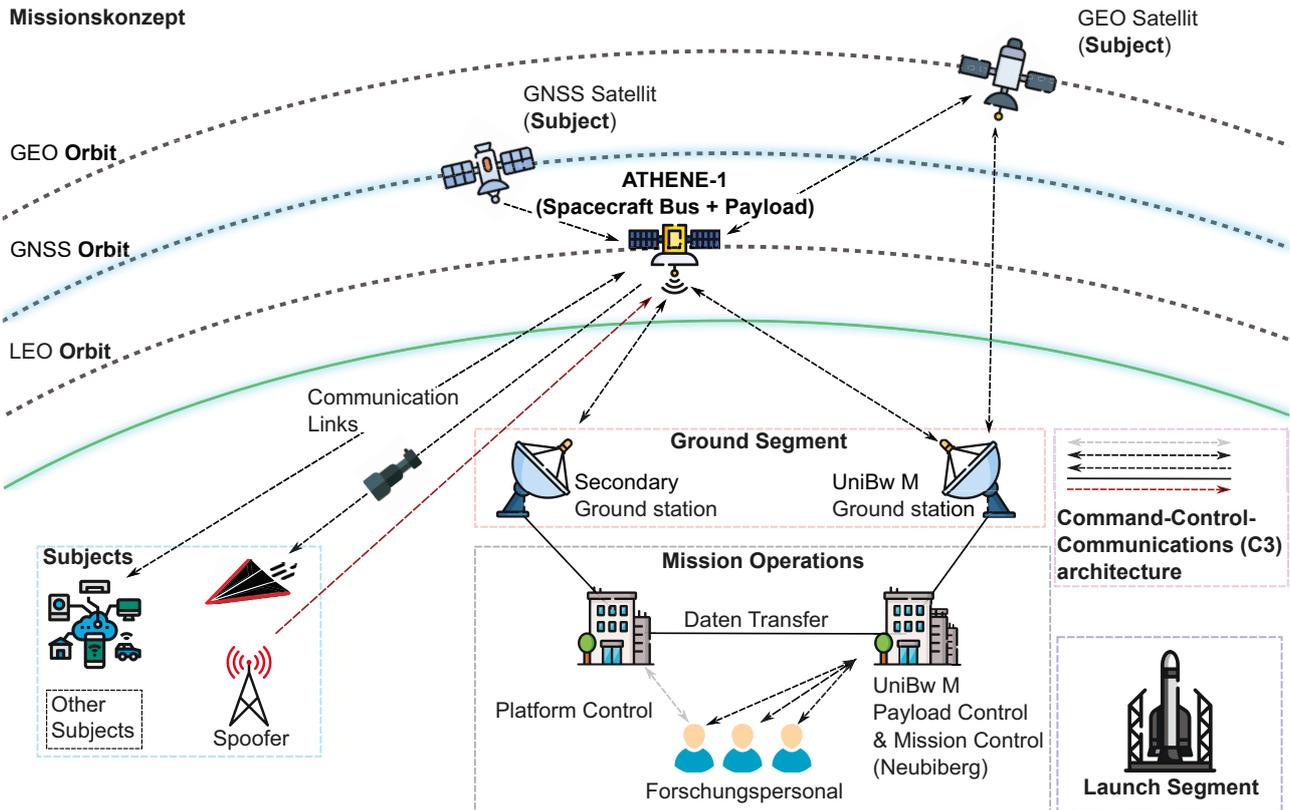


BILD 3. Missionsarchitektur innerhalb des SeRANIS Projekts [8]

Entwicklung und Erprobung von Schlüsseltechnologien im Rahmen des SeRANIS Projekts zu ermöglichen und zu unterstützen.

Die Subjects sind alle Aktivitäten und Forschungsgegenstände, die von den verschiedenen Nutzlasten an Bord von ATHENE-1 und in speziellen Bodeneinrichtungen an der UniBw M durchgeführt werden. Dazu gehören auch Satelliten im GNSS sowie Satelliten im Geosynchronous Equatorial Orbit (GEO), aber auch Zielobjekte für die Forschungsschwerpunkte in den Bereichen der Detektion und Kommunikation.

Das Launch Segment ist die Kombination aus der integrierten Trägerrakete und den für die Herstellung, Erprobung und Auslieferung von Trägerelementen erforderlichen Einrichtungen. Das Launch Segment umfasst die Startanlage, die Trägerrakete und alle Oberstufen, die nötig sind, um den Satellit in die Umlaufbahn zu bringen. Zusätzlich deckt das Launch Segment die erforderlichen Schnittstellen zwischen Trägerrakete und Satellit sowie die Nutzlastverkleidung und die zugehörigen Bodengeräte und Einrichtungen ab.

Der Orbit definiert die Flugbahn aller Raumfahrzeuge um die Erde, die an der Durchführung der Mission beteiligt sind. Inkludiert im Orbit Segment von SeRANIS ist der GEO, GNSS Orbit und der LEO.

Die C3 Architektur beschreibt die Anordnung der Komponenten, die die Kommunikations-, Kommando- und Kontrollfunktionen für die Mission bereitstellen. Die C3 Architektur definiert somit das Netzwerk zwischen allen Segmenten der SeRANIS Mission.

In dem folgenden Basisdesign werden die Hauptsegmente Nutzlast, Plattform, Bodensegment und Mission Operations Segment aus der Missionsarchitektur detaillierter dargestellt.

3.3. Basisdesign

Wie in Abschnitt 3.2 beschrieben, wird die Architektur der Mission durch das Missionskonzept definiert, das beschreibt, wie alle Missionssegmente zusammenarbeiten, um die Missionsziele zu erreichen. Das Basisdesign, dargestellt in BILD 4, umfasst die Entwicklung im Weltraum- und Bodensegment.

Das Weltraumsegment, repräsentiert von ATHENE-1, besteht aus der Nutzlast und der Plattform. Die Nutzlast setzt sich zusammen aus den verschiedenen Experimenten und In-Orbit-Demonstrationen, die an der UniBw M und bei Kooperationspartnern entwickelt werden. Nutzlasten die eine hohe Rechenleistung erfordern, werden auf einem speziellen AI-On-Board Computer (OBC) ausgeführt. Der AI-OBC wird von der UniBw M verwaltet und soll als Hauptverarbeitungseinheit für die sehr anspruchsvollen Prozessierungsaufgaben, mit und ohne AI, an Bord von ATHENE-1 dienen. Die Kommunikationsnutzlasten verfügen über eigene digitale Signalprozessoren für die Ansteuerung der Antennen in den verschiedenen Frequenzbändern. Wissenschaftliche Daten und Telemetriedaten der Nutzlast werden über den Satellitenbus an die Plattform transferiert.

Die Plattform besteht aus den für den Satellitenbetrieb erforderlichen Subsystemen. Diese sind das

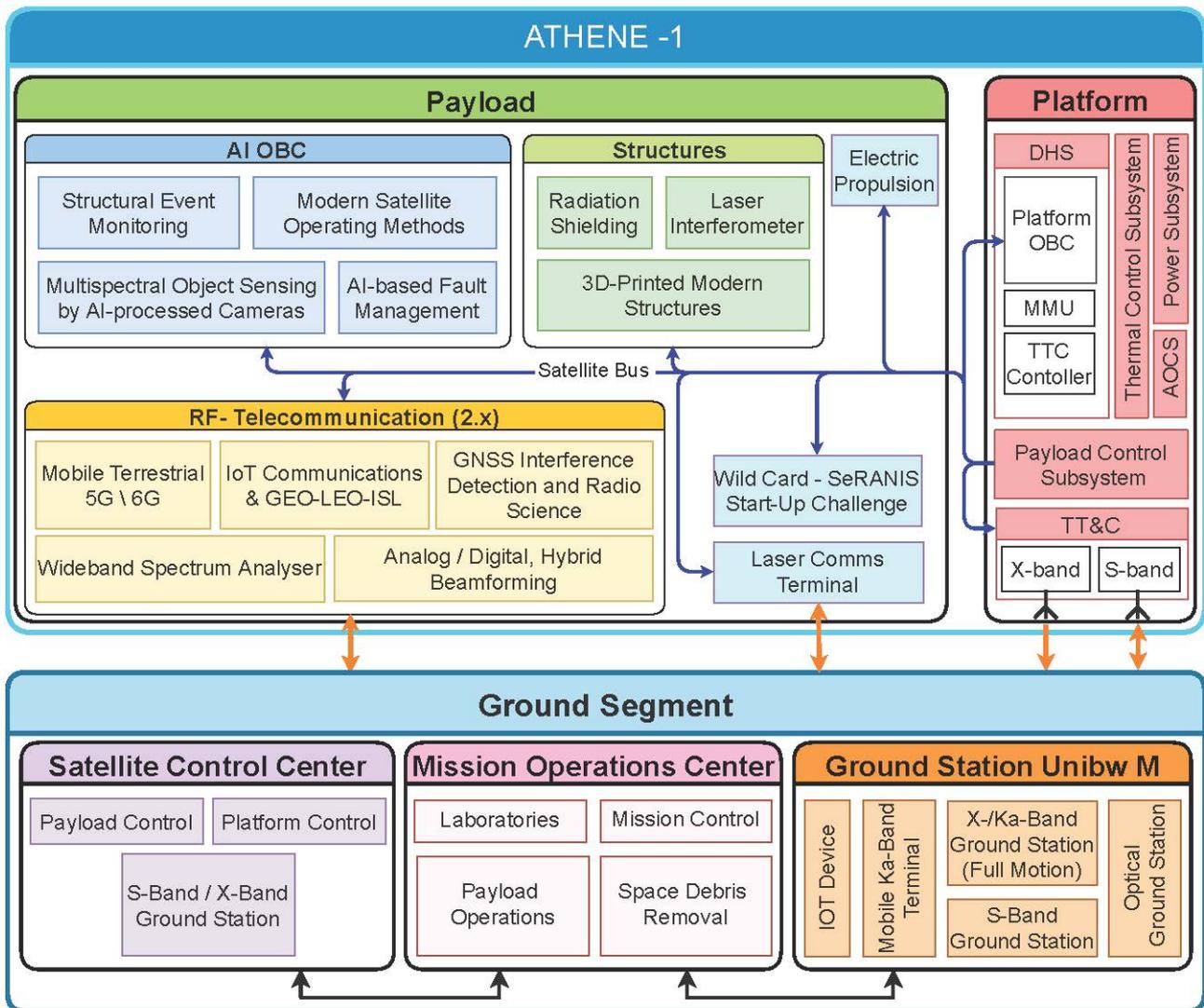


BILD 4. Basisdesign der Mission [8]

Data Handling System (DHS), das Thermal Control Subsystem, das Power Subsystem, das Attitude and Orbit Control System (AOCS) sowie das Telemetry, Tracking und Command (TT&C) Subsystem. Zusätzlich ist in der Plattform das Payload Control Subsystem (PCS) integriert. Das PCS fungiert als Steuereinheit für den Betrieb der Nutzlasten und des AI-OBC sowie als Schnittstelle zwischen Nutzlast und Plattform. Zusätzlich können Nutzlasten mit niedrigen Rechenanforderungen das PCS für einfache Datenverarbeitungen nutzen.

Das Bodensegment umfasst die Einrichtungen und Kommunikationsgeräte, die mit festen und mobilen Bodenstationen auf der ganzen Welt über verschiedene Netzwerke verbunden sind. Mehrere Experimente interagieren mit den Bodenstationen über ein breites Spektrum an Kommunikationsverbindungen. Folgende Kommunikationsverbindungen sind in der Mission vorgesehen:

- **S-Band-Kommunikationsverbindung 1:** Bidirektionale Kommunikationsverbindung für den Downlink von Satellitentelemetrie und den Uplink

von Befehlen zwischen der S-Band Antenne der Plattform und dem Satellitenkontrollzentrum.

- **S-Band-Kommunikationsverbindung 2:** Bidirektionale Kommunikationsverbindung zwischen der S-Band Antenne der Nutzlast und den IoT-Geräten am Boden.
- **UHF-Kommunikationsverbindung:** Bidirektionale Kommunikationsverbindung zwischen der UHF Antenne der Nutzlast und den IoT-Geräten am Boden.
- **Laserkommunikationsverbindung:** Bidirektionale Laserkommunikationsverbindung für wissenschaftliche Daten zwischen dem LCT der Nutzlast und der OGS an der UniBw M.
- **X-Band-Kommunikationsverbindung 1:** Unidirektionale Kommunikationsverbindung für den Downlink von wissenschaftlichen Daten zwischen der X-Band Antenne der Plattform und der FMA an der UniBw M.
- **X-Band-Kommunikationsverbindung 2:** Unidirektionale Kommunikationsverbindung für den Downlink von wissenschaftlichen Daten zwischen

Parameter	Orbit A (rot)	Orbit B (schwarz)	Visualisierung
Orbit Typ	Stationärer SSO	Stationärer SSO	
LTAN	11:00 Uhr	09:00 Uhr	
Epoche (UTC)	2025-11-01T00:00:00	2025-11-01T00:00:00	
Große Halbachse a	6882,396 km	6945,137 km	
Exzentrizität e	0,001256	0,001236	
Periapsis	495,514 km	558,415 km	
Apoapsis	512,803 km	575,584 km	
Inklination i	97,4177°	97,6585°	
RAAN Ω	201,0892°	171,0892°	
Argument der Periapsis ω	90,0°	90,0°	
Mittlere Anomalie ν	0,0°	0,0°	

TAB 2. Bahnelemente von Orbit A und B

der X-Band Antenne der Plattform und dem Satellitenkontrollzentrum.

- **Ka-Band-Kommunikationsverbindung:**

Bidirektionale Kommunikationsverbindung zwischen der Ka-Band Antenne der Nutzlast und der FMA an der UniBw M. Eine zusätzliche Kommunikationsverbindung ist auch zwischen dieser Nutzlast und einem mobilen Ka-Band-Terminal am Boden vorgesehen.

Das Missionsbetriebszentrum (Mission Operations Center) steuert den Satelliten einschließlich der Nutzlast, indem es die Befehle an das Satellitenkontrollzentrum (Satellite Control Center) sendet. Das Satellitenkontrollzentrum ist eine Einrichtung die für die Kommunikation mit der Satellitenplattform zuständig ist. Das heißt, jegliche Befehle an ATHENE-1 werden vom Satellitenkontrollzentrum über die S-Band Schnittstelle an die Plattform gesendet. Umgekehrt, sämtliche Telemetrie der Plattform wird von ATHENE-1 an das Satellitenkontrollzentrum gesendet. Die wissenschaftlichen Daten der Nutzlast können über eine X-Band-Kommunikationsverbindung entweder an das Satellitenkontrollzentrum oder an die UniBw M Bodenstation weitergeleitet werden. Die Nutzlastdaten können auch breitbandig über die experimentelle Ka-Band Antenne oder die experimentelle optische Verbindung übertragen werden. Für die experimentelle optische Verbindung wird die OGS an der UniBw M verwendet. Am Boden angekommen, werden die Daten über das Missionsbetriebszentrum an die jeweiligen wissenschaftlichen Labore im Rahmen des Projekts weitergeleitet und dort verarbeitet.

3.4. Orbitauswahl

Die Anforderungen der Satellitenmission bzw. der durchzuführenden Experimente bestimmen die Auswahl der Umlaufbahn des Satelliten. Zwei für die Orbitauswahl relevante Anforderungen der Experimente sind folgende:

- Das MOSAIC Experiment (3.1.7) hat eine Anforderung an die Orbithöhe über der Erdoberfläche von

unterhalb 600 km. Dadurch soll eine minimale Bodenauflösung der Detektoren eingehalten werden.

- Die Forschungsgruppe IoT-Kommunikation (3.1.3) fordert eine globale Abdeckung innerhalb von 24 Stunden.

Die Orbitauswahl hat wiederum einen großen Einfluss auf das Design der Satellitenplattform. Wie in Abschnitt 2.3 beschrieben, soll eine bereits etablierte Plattform an die Anforderungen von SeRANIS nur minimal angepasst werden. Um die Auswahl geeigneter Plattformen nicht zu minimieren, muss daher der ausgewählte Orbit mit verschiedenen Plattformkonstruktionen kompatibel sein.

Es können viele Arten von Umlaufbahnen verwendet werden. Dazu gehören zum Beispiel: Sonnensynchroner Orbit (SSO), Bahnen mit wiederholender Bodenspur, Bahnen mit minimaler Höhenabweichung und stationäre Bahnen. Diese Umlaufbahnen weisen jeweils spezifische Charakteristiken auf, die das Design der Plattform beeinflussen sowie den Anforderungen der Mission entsprechen können oder nicht.

Die detaillierte Auswahl eines Orbits beinhaltet mehrere Freiheitsgrade die berücksichtigt werden müssen, dies sind der Local Time of Ascending Node (LTAN), die große Halbachse, die Exzentrizität, die Inklination, der Right Ascension of the Ascending Node (RAAN) und das Argument des Periapsis. Im Fall von SeRANIS werden die Freiheitsgrade der Umlaufbahn von einzelnen Experimenten eingeschränkt.

Nach einer vorläufigen Analyse der Umlaufbahn fällt die Wahl auf einen SSO, da dieser, im Gegensatz zu anderen Orbits, eine stabile Sonnenlichtabdeckung über die Umlaufbahn bietet und somit eine weniger komplexe Konstruktion der Satellitenplattform ermöglicht.

Nach abschließender Analyse der Umlaufbahn wurde der Auswahlprozess auf zwei finale SSO-Optionen eingegrenzt. Beide Bahnen sind so gewählt, dass die Exzentrizität und das Argument der Periapsis (90°) fest sind. Dadurch wird die langfristigen periodischen Schwankungen der Exzentrizität und des Arguments des Perigäums aufgehoben und dieses Zusammen-

spiel minimiert zusätzlich Höhenschwankungen. Die beiden Bahnen wurden so gewählt, dass sie einen LTAN von 11:00 Uhr und 09:00 Uhr besitzen, um eine Möglichkeit zur unterschiedlichen Ausrichtungen der Solarpaneele zu haben. Die Bahnelemente sowie eine Visualisierung der beiden Umlaufbahnen sind in TAB 2 dargestellt. Für beide Referenzorbits wurde im November 2021 das Frequenzvergabeverfahren eingeleitet. Beide Umlaufbahnen gewährleisteten zweimal pro Tag, jeweils drei aufeinander folgende, Kontakte mit der Bodenstation in München die für die Kommunikation mit ATHENE-1 genutzt werden können.

Am Ende der Lebensdauer von ATHENE-1 wird der Orbit nicht mehr aktiv beeinflusst und ATHENE-1 verliert durch den Restwiderstand der Erdatmosphäre langsam an Höhe. Bei Orbit A würde der Satellit im ungünstigsten Fall in 6 Jahren nach dem Ende der Lebensdauer in die Erdatmosphäre wieder eintreten, was den Anforderungen der Space Debris Mitigation [36] entspricht. Bei Orbit B würde der Satellit unter normalen Bedingungen innerhalb von 20 Jahren, jedoch im ungünstigsten Fall erst in 38 Jahren, nach dem Ende der Lebensdauer in die Erdatmosphäre wieder eintreten. Da ein aktiver De-Orbit-Mechanismus an Bord von ATHENE-1 vorgesehen ist, ist der Prozess des Wiedereintritts des Satelliten doppelt abgesichert.

4. ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

In dieser Veröffentlichung wird das Projekt SeRANIS vorgestellt. SeRANIS wird von der UniBw M geleitet, mit dem Ziel, Innovationen sowohl im Weltraum als auch auf dem Boden zu demonstrieren. Damit bildet SeRANIS einen einzigartigen Rahmen für gemeinsame Forschung und Entwicklung zwischen der UniBw M und Kooperationspartnern und führt zu innovativen Technologien für Weltraumanwendungen.

Kontaktadresse:

johannes.bachmann@unibw.de

Literatur

- [1] Organisation for Economic Co-operation and Development's Space. Space economy for people, planet and prosperity. <https://oecd.org>, 2021.
- [2] European Space Agency. In-orbit demonstration testing new technology in earth orbit. <https://esa.int>, 2009.
- [3] F. Teston. In-orbit demonstration activities. ESA, 2015.
- [4] G. Grillmayer, M. Lengowski, S. Walz, H-P. Roeser, F. Huber, M. v. Schoenermark, and T. Wegmann. Flying laptop-micro satellite of the university of stuttgart for earth observation and technology demonstration. In *55th International Astronautical Congress of the International Astronautical Federation, the International Academy of Astronautics, and the International Institute of Space Law*, pages IAA-4, 2004.
- [5] Jens Eickhoff. *The FLP Microsatellite Platform: Flight Operations Manual*. Springer, 2015.
- [6] Christian Fuchs, Florian Moll, Dirk Giggenbach, Christopher Schmidt, Jonas Keim, and Steffen Gaisser. Osirisv1 on flying laptop: Measurement results and outlook. In *2019 IEEE International Conference on Space Optical Systems and Applications (ICSOS)*, pages 1–5, 2019. DOI: [10.1109/ICSOS45490.2019.8978984](https://doi.org/10.1109/ICSOS45490.2019.8978984).
- [7] Yago Isasi Parache, José Valdez, Andriy Muntyanov, and Serge Valera. The esail emcs an egse and mission control system for the triton platform. In *Workshop on Simulation and EG-SE for Space Programmes (SESP)*, volume 30, page 01, 2021.
- [8] Artur Kinzel, Johannes Bachmann, Rishi Jaiswal, Manohar Karnal, Ernesto Rama Novo, Francesco Porcelli, Alexander Schmidt, Robert Schwarz, Christian Hofmann, Roger Förstner, and Andreas Knopp. Seamless radio access network for internet of space (seranis): New space mission for research, development, and in-orbit demonstration of cutting-edge technologies. Proceeding of the 73rd International Astronautical Congress (IAC) Paris, France, 2022.
- [9] Zentrum für Digitalisierungs- und Technologieforschung der Bundeswehr. Seranis a multifunctional satellite laboratory. <https://dtecbw.de>, 2022.
- [10] Alexander Schmidt, Manohar Karnal, Florian Möller, Johannes Bachmann, and Förstner Roger. Product assurance for small satellites in responsive space with modular payload and cots-platform. Proceedings of the 73rd International Astronautical Congress (IAC) Paris, France, 2022.
- [11] ECSS Secretariat. Esa-estec, requirements & standards division: Ecss-m-st-10c rev. 1 project planning and implementation. *Space Project Management standards*. Noordwijk, The Netherlands., 2009.
- [12] Florian Völk, Thomas Schlichter, Florian Kaltenberger, Thomas Heyn, Guido Casati, Robert T Schwarz, and Andreas Knopp. Field trial of a 5g non-terrestrial network using openairinterface. *IEEE Open Journal of Vehicular Technology*, 3:243–250, 2022.
- [13] Azar Abid Salih, S.R. Zeebaree, Ahmed Sinali Abdulraheem, Rizagr R. Zebari, M.A. Sadeeq, and Omar M. Ahmed. Evolution of mobile wireless communication to 5g revolution. *Technology Reports of Kansai University*, 62(5):2139–2151, 2020.

- [14] Christian A. Hofmann and Andreas Knopp. Tracking of remote iot devices by satellite assisted geolocation. In *ICC 2020 - 2020 IEEE International Conference on Communications (ICC)*, pages 1–6, 2020. DOI: [10.1109/ICC40277.2020.9149073](https://doi.org/10.1109/ICC40277.2020.9149073).
- [15] Yazhou Zhu, Christian A. Hofmann, and Andreas Knopp. Ka-band leo satellite internet of things channel characterization: Survey and measurement. In *ICC 2022 - IEEE International Conference on Communications*, pages 3076–3081, 2022. DOI: [10.1109/ICC45855.2022.9838878](https://doi.org/10.1109/ICC45855.2022.9838878).
- [16] Gregor Johannes Rossmanith, Sven Kuhlmann, and Thorsten Beck. The different roles of the dlr german space operations center in recent laser communication projects. 2017.
- [17] Thomas Delamotte, Matthias G. Schraml, Robert T. Schwarz, Kai-Uwe Storek, and Andreas Knopp. Multi-antenna-enabled 6g satellite systems: Roadmap, challenges and opportunities. In *WSA 2021; 25th International ITG Workshop on Smart Antennas*, pages 1–6. VDE, 2021.
- [18] Nikolas Dütsch, Rishi Jaiswal, Hepzibah Ernest, Roger Förstner, and Thomas Pany. Seamless radio access network for internet of space (seranis): Design and development of a dedicated leo satellite payload for detection and localization of earth-bounded gnss interference sources. Proceedings of the 73rd International Astronautical Congress (IAC) Paris, France, 2022.
- [19] Adonees Semaan, Mohd Bilal, and Tom Andert. Experiment setup for an airborne gnss-reflectometry experiment. Proceedings of the 73rd International Astronautical Congress (IAC) Paris, France, 2022.
- [20] Mohd Bilal, Adonees Semaan, and Tom Andert. Comparison of data processing methods for gnss reflectometry. Proceedings of the 73rd International Astronautical Congress (IAC) Paris, France, 2022.
- [21] Markus C. Müller, Tobias Sander, and Christian Mundt. Seranis' multispectral object sensing by ai-processed cameras experiment - a preliminary design study. Proceedings of the 2nd International Conference on Flight Vehicles, Aerothermodynamics and Re-entry Missions & Engineering (FAR), Heilbronn, Germany, 2022.
- [22] Amir A Zadpoor. Mechanical meta-materials. *Materials Horizons*, 3(5):371–381, 2016.
- [23] Erhard Buchmann, Frank Hadwiger, Christoph Petroll, Christoph Zauner, Alexander Horoschenkoff, and Philipp Höfer. A unit cell with tailorable negative thermal expansion based on a bolted additively manufactured auxetic mechanical metamaterial structure: Development and investigation. In *Proceedings of the Munich Symposium on Lightweight Design 2021*, pages 198–211. Springer, 2021.
- [24] Eloi Ferrer Gil. *Framework for active stabilization of thermomechanical distortions in space structures*. PhD thesis, Universitätsbibliothek der Universität der Bundeswehr München, 2019.
- [25] Florian Möller, Jan Grundhöfer, Lukas Maschino, Alexander Schmidt, and Roger Förstner. Initial validation of a closed loop filter and controller approach for active stabilization of thermomechanical distortions. Proceedings of the 73rd International Astronautical Congress (IAC) Paris, France, 2022.
- [26] Pavel Smirnov, Ruslan Kozakov, and Jochen Schein. Experimental characterization of the capacitively coupled rf-plasma thruster. *Applied Sciences*, 11(15):6799, 2021.
- [27] Marvin Kühn and Jochen Schein. Development of a high-reliability vacuum arc thruster system. *Journal of Propulsion and Power*, pages 1–7, 2022.
- [28] Benjamin Wille, Maria Theresia Wörle, and Christoph Lenzen. Vamos—verification of autonomous mission planning on-board a spacecraft. *IFAC Proceedings Volumes*, 46(19):382–387, 2013.
- [29] CCSDS Secretariat. Unified space data link protocol. 2021.
- [30] ECSS Secretariat. Esa-estec, ecss-e-st-70-41c – telemetry and telecommand packet utilization. *Space Project Management standards. Noordwijk, The Netherlands.*, 2016.
- [31] Maren Hülsmann and Roger Förstner. Predictive maintenance as enhancement of fault detection, isolation and recovery strategies of spacecraft. In *71st International Astronautical Congress*, 2020.
- [32] Maren Hülsmann, Artur Kinzel, and Johannes Bachmann. Overview of the ai-based fault management concept onboard the unibw m seranis mission. Proceedings of the 73rd International Astronautical Congress (IAC) Paris, France, 2022.
- [33] Alberto De Marchi, Axel Dreves, Matthias Gerds, Simon Gottschalk, and Sergejs Rogovs. A function approximation approach for parametric optimization [manuscript submitted for publication]. 2021.
- [34] SeRANIS x founders. 'per anhalter in den orbit'-challenge. <https://www.seranisxfounders.de/>, 2022.

- [35] James Richard Wertz, Wiley J. Larson, Douglas Kirkpatrick, and Donna Klungle. *Space mission analysis and design*, volume 8. Springer, 1999.
- [36] Inter-Agency Debris Coordination Committee. *IADC Space Debris Mitigation Guidelines*. Inter-Agency Debris Coordination Committee, 2020.