

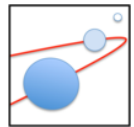
SATEX

Extraterrestrik mit Kleinsatelliten

Schlussbericht

Zuwendungsempfänger: Julius-Maximilians-Universität Würzburg Fakultät für Mathematik und Informatik Lehrstuhl VIII: Informationstechnik für Luft und Raumfahrt	Förderkennzeichen: 50 OO 2222
Vorhabenbezeichnung: SATEX - Extraterrestrik mit Kleinsatelliten	
Laufzeit des Vorhabens: 01.10.2022 – 30.04.2024	

Projektmanager J. Männel	Datum	Unterschrift
Projektleiter Prof. Dr.-Ing. Hakan Kayal	Datum	Unterschrift



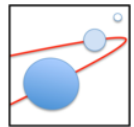
Version

Version	Datum	Änderung	Autor
0.1	08.08.2024	Erstellung Dokument	J. Männel
1.0	14.10.2024	Finale Version	J. Männel

Verteiler

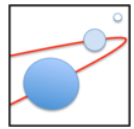
Anz.	Name	Org.

Anz.	Name	Org.



Inhalt

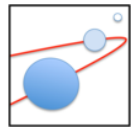
Kurzfassung	3
Teil I	4
1. Aufgabenstellung	4
2. Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde.....	4
3. Planung und Ablauf des Vorhabens	5
4. Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde	9
5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen	10
Teil II	10
1 Verwendung der Zuwendung und des erzielten Ergebnisses im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele.....	10
2 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises	16
3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit	16
4 Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere der Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans.....	16
5 Während der Durchführung des Vorhabens dem ZE bekannt gewordener Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen.....	16
6 Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen des Ergebnisses.....	17



Kurzfassung

Im Rahmen des SATEX Vorhabens wurde der Einsatz von Kleinsatelliten für wissenschaftliche Missionen in der Extraterrestrik untersucht. Ziel war es, technische Möglichkeiten und Einsatzschwerpunkte aus Nutzersicht zu identifizieren. Hierzu wurde eine Umfrage unter deutschen Wissenschaftlern durchgeführt und der aktuelle Stand der Kleinsatellitentechnologien erfasst. Eine Datenbank mit relevanten Missionen und Technologien sowie eine allgemeine Bewertung der Umweltbedingungen und Transportmöglichkeiten für interplanetare Missionen wurden erstellt. Anhand der analysierten Daten erfolgte eine Klassifikation von Kleinsatellitenmissionen, die als Grundlage zur Bewertung von Missionsideen diente.

Insgesamt wurden zehn Missionsideen formuliert und in einer Nutzwertanalyse bewertet. Daraus ergaben sich drei priorisierte Missionskonzepte: eine Beobachtungsmission im MeV-Bereich, eine cislunare Technologiedemonstration zur Exosphärencharakterisierung und eine Mission zum Asteroiden (99942) Apophis. Diese Konzepte wurden im Rahmen einer Vorhabensaufstockung vertieft untersucht, wobei technische und missionsbedingte Herausforderungen identifiziert und Lösungskonzepte erarbeitet wurden. Als ein Ergebnis wurde in Zusammenarbeit mit Partnern ein CubeSat für die europäische RAMSES-Mission entwickelt.



Teil I

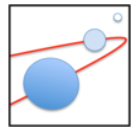
1. Aufgabenstellung

Im Rahmen der SATEX Untersuchung sollten mögliche Schwerpunkte für den Einsatz von Kleinsatellitenmissionen in der Extraterrestrik aus Nutzersicht ausgearbeitet und technische Möglichkeiten im nationalen, europäischen und internationalen Rahmen ermittelt werden, um die Machbarkeit von wissenschaftlichen Missionen mit Kleinsatelliten bewerten zu können. Die Ergebnisse sollten durch Bereitstellung einer bewerteten Datenbasis eine Priorisierung der Aktivitäten ermöglichen. In einem zweiten Schritt sollen konkrete Vorschläge für mögliche nationale Missionen ausgearbeitet und bewertet werden. Im Rahmen der Vorhabensaufstockung sollten drei dieser Missionsideen hinsichtlich konkreter Realisierungsmöglichkeiten und deren Machbarkeit untersucht werden. Im Rahmen dessen sollte die Evaluierung der Missionsarchitektur und die frühzeitige Identifikation von technischen oder missionsbedingten Herausforderungen zusammen mit der Erarbeitung von Lösungsansätzen auf konzeptioneller Ebene durchgeführt werden.

2. Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Das Vorhaben wurde an der Universität Würzburg an dem Interdisziplinärem Forschungszentrum für Extraterrestrik (IFEX) durchgeführt. Als dessen Schirmherr hat die Professur für Raumfahrttechnik langjährigen Erfahrung in der Durchführung, Planung und Gestaltung von Missionen, einschließlich CubeSat Projekten wie SONATE (FKZ 50RM1606) und SONATE-2 (FKZ 50RU2100) im niedrigen Erdorbit.

Im Rahmen des NACOMI (FKZ 50YB1608) Vorhabens wurden bereits Kommunikationstechnologien für Nanosatelliten in interplanetaren Missionen untersucht. Weitere Arbeiten im Bereich der Extraterrestrik umfassen z.B. Untersuchungen zu einem Nanosatelliten für Optical SETI und ein Konzept zur Blitzdetektion auf der Venus. Die Professur betreibt weiterhin ein eigenes ferngesteuertes Teleskop in Spanien zur Detektion von kurzzeitigen Leuchtphänomenen auf dem Mond. Außerdem werden Landesystemen für miniaturisierte Nutzlasten auf Basis von Autorotation für interplanetare Missionen erforscht. Ebenfalls hat die Professur mehrere Arbeiten in der Konzeption, dem Bau und dem Betrieb von Sternsensoren geleistet: STELLA (FKZ 50RM0901), AROS (FKZ 50RM1522), Multi-View (Bayern). Nach dem Berichtszeitraum wurde zusätzlich das Vorhaben VaMEx3-MarsSymphony (50RK2451A) zur Demonstration von Kommunikationstechnologien und Sensorsystemen in realistischen Explorationsszenarien im Hinblick auf eine zukünftige Marsmission in der Region Valles Marineris begonnen.



3. Planung und Ablauf des Vorhabens

Für die Umsetzung des Vorhabens wurden die anstehenden Aktivitäten in einzelne Arbeitspakete unterteilt (siehe Abbildung I-1, Abbildung I-2) und ein Zeitplan erstellt (siehe Abbildung I-4, Abbildung I-3). Das Vorhaben wurde nach einer kostenneutralen Verlängerung und einer Aufstockung abgeschlossen:

- 1 Ursprüngliche Vorhabenslaufzeit vom 01.10.2022 bis zum 30.09.2023
- 2 Kostenneutrale Verlängerung um einen Monat bis zum 31.10.2023
- 3 Vorhabenaufstockung mit einer geänderten Gesamtlaufzeit vom 01.10.2022 bis zum 30.04.2024

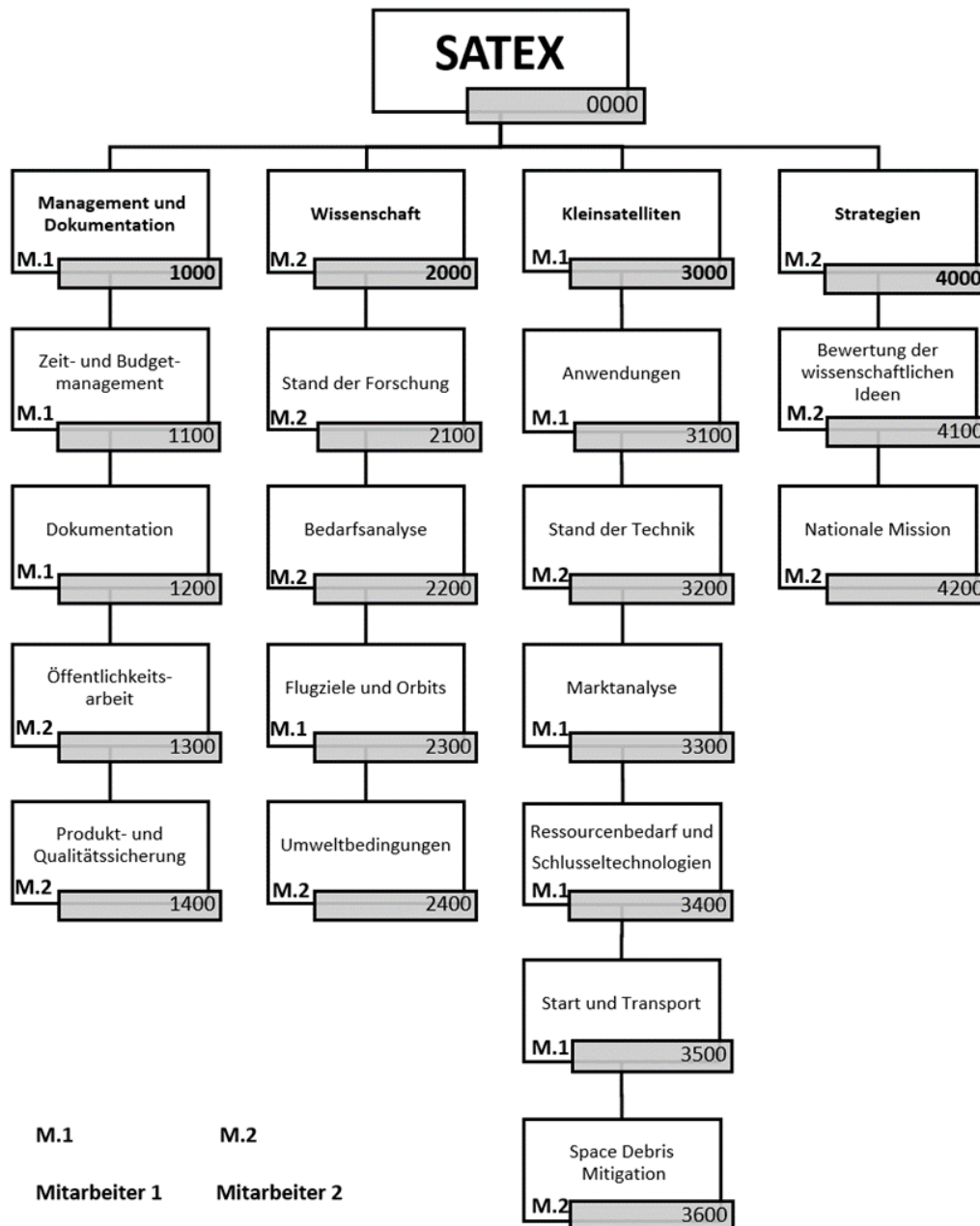
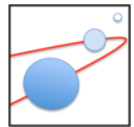


Abbildung I-1: Arbeitspaketstruktur für das SATEX Vorhaben (ohne Aufstockung)

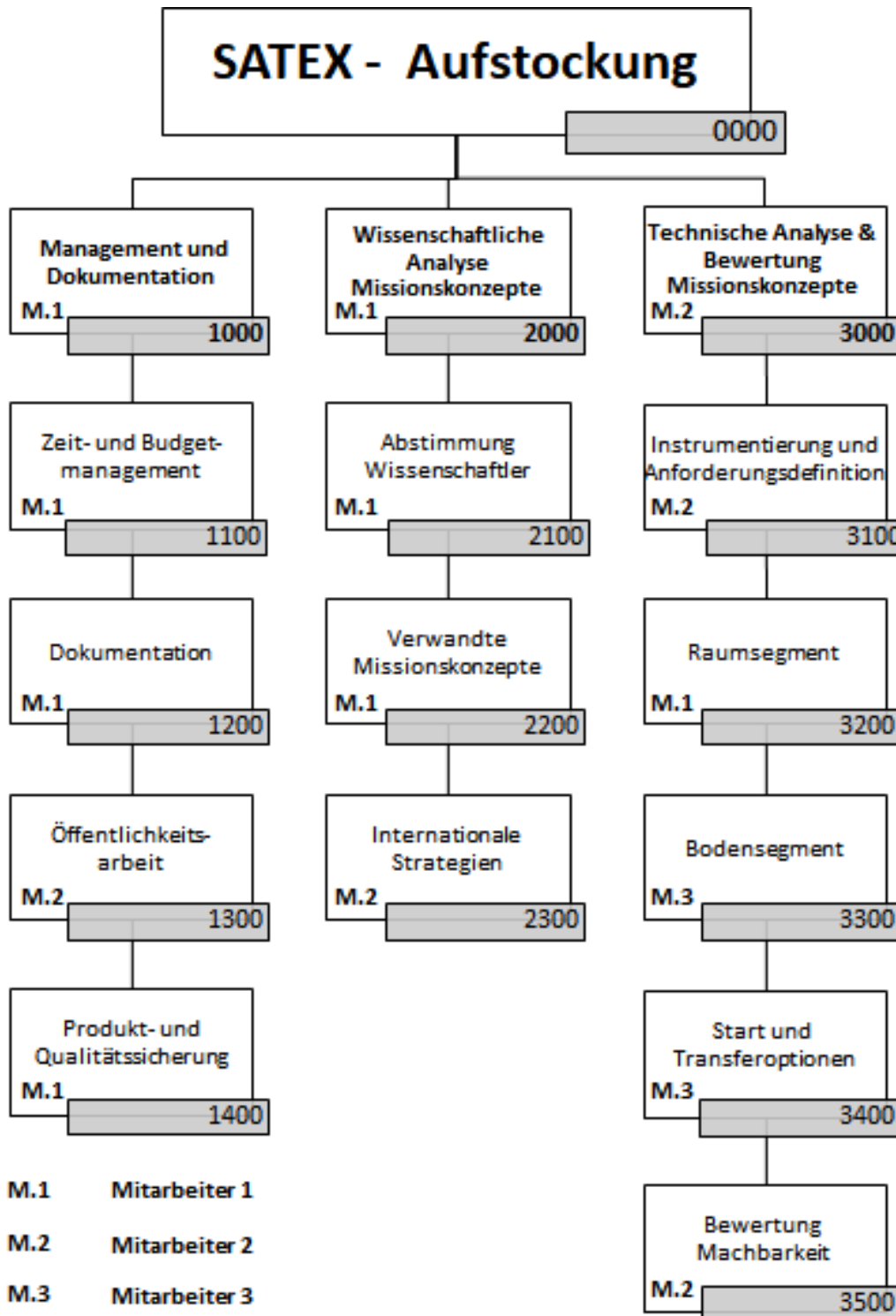
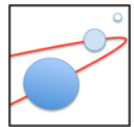
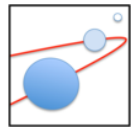


Abbildung I-2 Arbeitspaketstruktur für die Aufstockungsphase des SATEX Vorhabens

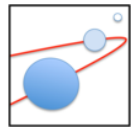


AP	AP-Beschreibung	Anfang	Ende	2022		2023			
				Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4
1000	Management und Dokumentation	01.10.2022	30.09.2023						
1100	Zeit- und Budgetmanagement	01.10.2022	30.09.2023						
1200	Dokumentation	01.10.2022	30.09.2023						
1300	Öffentlichkeitsarbeit	01.10.2022	30.09.2023						
1400	Produkt- und Qualitätssicherung	01.10.2022	30.09.2023						
1210	Kick-Off	15.10.2022			•				
1220	Zwischenpräsentation	13.04.2023					•		
1230	Abschlusspräsentation	24.09.2023							•
2000	Wissenschaft	01.10.2022	30.05.2023						
2100	Stand der Forschung	01.10.2022	28.02.2023						
2200	Bedarfsanalyse	01.02.2023	31.03.2023						
2300	Flugziele und Orbits	01.03.2023	30.04.2023						
2400	Umweltbedingungen	01.04.2023	31.05.2023						
3000	Kleinsatelliten	01.10.2022	30.09.2023						
3100	Anwendungen	01.10.2022	31.01.2023						
3200	Stand der Technik	01.11.2022	28.02.2023						
3300	Marktanalyse	01.03.2023	31.05.2023						
3400	Ressourcenbedarf und Schlüsseltechnologien	01.05.2023	31.07.2023						
3500	Start und Transport	01.07.2023	31.08.2023						
3600	Space Debris Mitigation	01.07.2023	31.07.2023						
4000	Strategien	01.05.2023	30.09.2023						
4100	Bewertung der wissenschaftlichen Ideen	01.05.2023	31.07.2023						
4200	Nationale Mission	01.07.2023	30.09.2023						

Abbildung I-4 Zeitplan für die Aufstockungsphase des SATEX Vorhabens

AP	AP-Beschreibung	Anfang	Ende	2023			2024				
				Okt	Nov	Dez	Jan	Feb	Mär	Apr	Mai
1000	Management und Dokumentation	01.11.2023	30.04.2024								
1100	Zeit- und Budgetmanagement	01.11.2023	30.04.2024								
1200	Dokumentation	01.11.2023	30.04.2024								
1300	Öffentlichkeitsarbeit	01.11.2023	30.04.2024								
1400	Produkt- und Qualitätssicherung	01.11.2023	30.04.2024								
1210	Kick-Off Meeting	08.11.2023			•						
1220	Abschlusspräsentation	24.04.2024									•
2000	Wissenschaftliche Analyse der Missionskonzepte	01.11.2023	15.02.2024								
2100	Abstimmung mit nationalen Wissenschaftlern	01.11.2023	15.02.2024								
2200	Verwandte Missionskonzepte / Missionen	01.11.2023	31.12.2023								
2300	Einordnung in internationale Strategien	01.12.2023	31.01.2024								
3000	Technische Analyse & Bewertung der Missionskonzepte	01.11.2023	30.04.2024								
3100	Instrumentierung und Anforderungsdefinition	01.11.2023	31.01.2024								
3200	Raumsegment Konzeption und Analyse	01.11.2023	15.02.2024								
3300	Bodensegment Konzeption und Analyse	01.01.2024	28.02.2024								
3400	Start und Transferoptionen	15.01.2024	15.04.2024								
3500	Bewertung der Machbarkeit der Missionskonzepte	01.03.2024	30.04.2024								

Abbildung I-3 Zeitplan für das SATEX Vorhabens (ohne Aufstockung)



4. Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde

Wie in Abschnitt 2 erläutert, baut das Vorhaben auf eine langjährige Erfahrung an der Professur in den Bereichen Missionsentwurf und -Durchführung sowie Komponentenentwicklung auf. Eine umfassende Erhebung zu Nutzerinteressen für wissenschaftliche Kleinsatellitenmissionen wurde auf breiter Basis allerdings bis zum Beginn des Vorhabens weder national noch international durchgeführt. Gleichwohl gab es in den vergangenen Jahren im internationalen und nationalen Kontext verschiedene Missionsstudien zum Einsatz von Kleinsatelliten in diesem Bereich. Zu Beginn des Vorhabens befanden sich bereits einige Konzepte in der Implementierung und erste Missionen hatten bereits erfolgreich die Leistungsfähigkeit von interplanetaren Kleinsatelliten demonstriert. Ein Beispiel hierfür sind die MarCO-Satelliten, die 2018 im Rahmen der InSight-Mission ein Kommunikationsrelais zur Erde demonstrierten. Weiterhin befanden sich die CubeSats, welche im Rahmen der ARTEMIS-1 Mission in den cislunaren Raum gestartet werden sollten, bereits in Startposition. Insgesamt handelte es sich bei den bisherigen Einsätzen von Kleinsatelliten im interplanetaren Raum jedoch überwiegend um Demonstrationsmissionen. Die geringe Verbreitung spiegelte sich auch in den begrenzten verfügbaren technischen Lösungen wider.

4.1 Angabe bekannter Konstruktionen, Verfahren und Schutzrechte, die für die Durchführung des Vorhabens benutzt wurden.

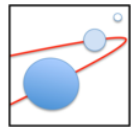
Es wurden keine rechtlich geschützten Technologien bzw. Verfahren angewendet.

4.2 Angabe der verwendeten Fachliteratur sowie der benutzten Informations- und Dokumentationsdienste

Im Rahmen des Vorhabens wurden zahlreiche Fachliteraturquellen herangezogen, um eine fundierte Grundlage für die Evaluierung von Technologien, Missionskonzepten und internationalen Strategien zu schaffen.

Für die Analyse des aktuellen Technologiestands diente der „State of the Art Small Spacecraft Technology Report“ der NASA als zentrale Grundlage. Zur Erfassung und technologischen und wissenschaftlichen Analyse bisheriger und geplanter Missionskonzepte wurden Veröffentlichungen der letzten zehn Jahre, insbesondere wissenschaftliche Paper und Konferenzbeiträge, herangezogen. Von besonderem Interesse waren hierbei die CubeSat-Erfahrungen der ARTEMIS-1-Mission, die unter anderem in dem Dokument *Interplanetary CubeSats: Summary of the Current Thinking, Approaches and Lessons Learned* in den Proceedings des *ASU Deep Space Summit* zusammengefasst wurden. Bedeutenden Input lieferten auch zahlreiche Beiträge der jährlich stattfindenden Konferenz *Inter-Planetary Small Satellite Conference*.

Für die Evaluierung der internationalen Raumfahrtstrategien und zentraler Fragestellungen in der Extraterrestrik wurden Strategieanalysen der unterschiedlichen Raumfahrtakteure ausgewertet, darunter die *Raumfahrtstrategie der Bundesregierung (2012 & 2023)* sowie die wissenschaftlichen



Programme der ESA, wie die *Cosmic Vision* (2015-2025) und die *Voyage Vision* (2035-2050). Die Strategien der NASA wurden insbesondere durch die „Decadal Survey“ der National Academy of Sciences, Engineering, and Medicine, sowie die Studien „Pathways to Discovery in Astronomy and Astrophysics for the 2020s“ und „Solar and Space Physics: A Science for a Technological Society“ (2013) untersucht.

Zudem flossen die Raumfahrtstrategien weiterer Raumfahrtagenturen wie der JAXA und der CNSA in die Betrachtung ein. Ergänzend wurden spezifische Mond-Explorationsprogramme wie das *ARTEMIS-Programm*, aber auch das *Chinese Lunar Exploration Program* in den Analysen hinsichtlich technologischer Möglichkeiten für Kleinsatellitenmissionen und wissenschaftlicher Fragestellungen ausgewertet.

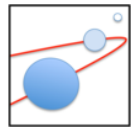
5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Alle Recherche- und Untersuchungsaufgaben wurden durch die eingestellten wissenschaftlichen Mitarbeiter durchgeführt. Im Rahmen der Nutzerbefragung, Marktrecherchen, der wissenschaftlichen Bewertung und Instrumentierung wurde auf freiwilliger Basis mit einer Vielzahl von Wissenschaftlern und Technologienentwicklern zusammengearbeitet. Im Rahmen des Vorhabens wurde eine Geheimhaltungsvereinbarung mit der Fa. Rocket Factory Augsburg AG geschlossen. Darüber hinaus gab es keine weiteren rechtsverbindlichen Kooperationen.

Teil II

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

Im Rahmen des Vorhabens wurden Schwerpunkte für den Einsatz von Kleinsatelliten in der Extraterrestrik aus Nutzersicht ausgearbeitet und technische Möglichkeiten im nationalen, europäischen und internationalen Rahmen ermittelt. Hierzu wurde eine Befragung unter Wissenschaftlern in Deutschland zum Einsatz von Kleinsatelliten in der Extraterrestrik durchgeführt. Parallel dazu wurde der aktuelle Stand der Kleinsatellitentechnologien, insbesondere in der Extraterrestrik, erfasst. Hierzu wurde eine Datenbank mit relevanten Missionen und Technologien erstellt. Weiterhin wurden die grundlegenden Umweltbedingungen und Start- und Transportmöglichkeiten für interplanetare Kleinsatellitenmissionen allgemein evaluiert. Anhand der analysierten extraterrestrischen Kleinsatellitenmissionen erfolgte eine Klassifikation von interplanetaren Kleinsatellitenmissionen und deren Anforderungen und Missionsprofilen sowie die Identifikation von Schlüsseltechnologien, die wiederum eine Basis für die Bewertung der Missionsideen darstellte.



Auf Basis der Nutzerwünsche und der identifizierten technischen Realisierungsmöglichkeiten und Herausforderungen für die Entwicklung und den Betrieb von Kleinsatelliten wurden 10 Missionsideen für eine nationale Kleinsatellitenmission formuliert und in einer Nutzwertanalyse bewertet. Die Ergebnisse der technischen Untersuchung und die Ergebnisse der Befragung wurden auf dem *DLRK 2023* in zwei Beiträgen, auf dem *Pico-Nano Satellite Workshop* und der *nationalen Kleinsatellitenkonferenz* präsentiert. Weiterhin wurden die Ergebnisse zusammenfassend in dem veröffentlichten Kurzbericht dargestellt.

Basierend auf der durchgeführten Nutzwertanalyse wurden Empfehlungen zur vertieften Untersuchung von drei Missionsideen erstellt. Diese Ideen umfassen eine Beobachtungsmission im MeV-Bereich, eine cislunare Technologiedemonstrationsmission zur Exosphärencharakterisierung und Bestimmung der Staubumgebung sowie eine nationale Kleinsatellitenmission zum Asteroiden (99942) Apophis. Im Rahmen der Vorhabensaufstockung wurden diese drei Missionsideen hinsichtlich ihrer Realisierbarkeit vertieft untersucht. Hierbei zeigte sich, dass die Möglichkeit einer Missionsbeteiligung an der europäischen RAMSES Mission zur Erforschung des Asteroiden 99942 Apophis mit einem eigenständigen CubeSat aufgrund der internationalen Kooperation und damit den gesteigerten Untersuchungsmöglichkeiten wissenschaftlich besonders vielversprechend erscheint. Gleichzeitig war aufgrund der zahlreichen Aktivitäten europäischer Partner eine Positionierung mit einer Missionsbeteiligung sehr zeitkritisch. Daher wurde in Absprache mit der deutschen Raumfahrtagentur im DLR entschieden, diese Missionsidee prioritär zu untersuchen. Als Ergebnis der Analysen wurde gemeinsam mit Partnern ein CubeSat für die europäische RAMSES Mission vorgeschlagen.

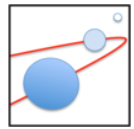
Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele

Im Antrag auf die Zuwendung wurde für SATEX eine Liste mit Zielen erstellt, welche nachfolgend einzeln betrachtet werden.

SATEX Vorhaben

A1 Bedarfsanalyse zu aktuellen wissenschaftlichen Fragestellungen und Trends in der Extraterrestrik im Allgemeinen

Im Rahmen des Vorhabens wurden sowohl aktuelle und geplante Missionsbemühungen als relevante Strategien für die Erforschung des Weltraums internationaler Akteure ausgewertet. Die Ergebnisse dienen als Grundlage für die weiteren Analysen in dem Vorhaben. Die untersuchten Missionen und Missionskonzepte wurden systematisch in einer Datenbank erfasst.



A2. Durchführung von Befragungen potenzieller Nutzer aus der Wissenschaft und Analyse von ggf. bereits existierenden, relevanten Untersuchungen

Zur Ausarbeitung von Schwerpunkten für den Einsatz von Kleinsatellitenmissionen in der Extraterrestrik aus Nutzersicht wurde eine Befragung unter Wissenschaftlern in Deutschland im Bereich der extraterrestrischen Forschung, der Satellitentechnologie, sowie verwandter Felder durchgeführt. Hierzu waren über 230 Wissenschaftler aus 69 Forschungseinrichtungen eingeladen. Die Teilnehmerliste wurde in enger Abstimmung mit den fachlichen Bearbeitern des Vorhabens (DLR RfA) erstellt. Die Umfrageergebnisse wurden statistisch ausgewertet und dienten als Grundlage zur Identifikation der nationalen Interessen zu Einsatzgebiete und Themenwünschen für Kleinsatellitenmissionen.

A3. Eingrenzung von identifizierten Themenfeldern, zu dem Kleinsatelliten aufgrund Ihrer Randbedingungen wie Masse, Energie und Kommunikation in der Extraterrestrik beitragen könnten

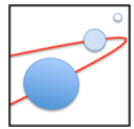
Auf Basis der Umfragedaten wurden die Themenwünsche zu Themenfeldern gruppiert und systematisch hinsichtlich ihrer Eignung für eine Kleinsatellitenmission bewertet. Als Bewertungsgrundlage der benötigten Randbedingungen diente die Datenbasis der untersuchten Missionen und Missionskonzepte für Kleinsatellitenmissionen in der Extraterrestrik, welche nach ihren Einsatzgebieten gruppiert wurden.

A4. Analyse relevanter Umweltbedingungen wie z.B. Orbits, Strahlung oder Gravitation

Die Umweltbedingungen wurden allgemein hinsichtlich ihrer Auswirkungen auf die Auslegung des Raumsegments untersucht. Dabei standen die Aspekte thermische Belastungen, Energieversorgung und Kommunikationsanforderungen im Fokus. Zudem wurden die Auswirkungen von Strahlung sowie die Einflussfaktoren von Startfenstern auf die Zielfindung analysiert. Die Erkenntnisse dienen u.a. zur Eingrenzung der Themenfelder und Bewertung der Missionsideen.

A5. Untersuchung möglicher Transportszenarien und Transportsysteme

Hierfür wurde eine Marktrecherche durchgeführt und nationale, sowie internationale Akteure befragt. Anhand der Rückmeldungen und Erfahrungen bisheriger, sowie geplanter Kleinsatellitenmissionen wurden verschiedene Transportszenarien definiert und deren Vor- und Nachteile evaluiert.



A6. Untersuchung der Potentiale von neuen Microlaunchern für zukünftige interplanetare Kleinsatellitenmissionen

Hierfür wurde eine Marktrecherche durchgeführt, sowie internationale und nationale Microlauncheranbieter befragt. Aus Basis der untersuchten Transportszenarien und der Themenfelder wurden Potentiale für Microlauncher Missionen identifiziert.

A7. Erfassung des Entwicklungsstandes und Identifikation von benötigten Schlüsseltechnologien für Kleinsatelliten in der Extraterrestrik. Untersuchung ausgewählter kommerzieller Komponenten, wie z.B. Sensoren, zur Einschätzung der Verwendbarkeit in Kleinsatelliten unter Einbindung des Fachgebiets EEE-Bauteile des DLR

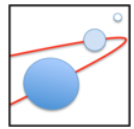
Im Rahmen einer breit angelegten Marktanalyse wurde der Entwicklungsstand für die zentralen Subsysteme von Kleinsatelliten erhoben. Das Fachgebiet EEE-Bauteile des DLR wurde hinsichtlich der Datenlage befragt, jedoch konnte hier nur eine sehr geringe inhaltliche Passung der Datenbanken festgestellt werden. Zusätzlich wurde auch die Förderprogrammatik Robotik der Raumfahrtagentur zu Förderungen, besonders im Bereich der Antriebsentwicklung, befragt. Weiterhin wurden Experten in den jeweiligen technologischen Gebieten befragt. Aus allen Inputs wurden die Schlüsseltechnologien identifiziert, sowie deren Entwicklungsstand und zukünftige Potentiale erfasst.

A8. Marktanalyse kommerziell verfügbarer, relevanter Systemelemente und Dienstleistungen für den Einsatz in der Extraterrestrik

Die Marktanalysen wurden durchgeführt, die erhobenen Daten wurden systematisch in einer Datenbank erfasst. Diese Daten dienten als Input für die Identifikation der Schlüsseltechnologien, sowie für die Machbarkeitsabschätzungen der Missionsideen.

A9. Untersuchung der Potentiale, Stärken und Schwächen in Deutschland

Auf Basis der Marktanalysen und dem Entwicklungsstand der Schlüsseltechnologien wurden technologische Potentiale, Stärken und Schwächen in Deutschland ausgewertet. Weiterhin wurden die aktuellen Fähigkeiten und Erfahrungen bei der Durchführung extraterrestrischer Kleinsatellitenmissionen in Deutschland im internationalen Kontext untersucht. Auf Basis dieser Ergebnisse wurden im Kurzbericht Empfehlungen für die Technologieentwicklung, das Missionsdesign und die Förderstrategien formuliert.



A10. Ausarbeitung von möglichen Kleinsatellitenprojekten. Analyse, Bewertung und Abschätzung des Ressourcenbedarfs für diese ausgewählten Missionsvorschläge

Anhand der in den Themenfeldern zusammenfassten Themenvorschläge wurden aus den geeigneten Themenfeldern zehn Missionsideen formuliert. Diese Missionsideen decken Themenfelder aus allen untersuchten Bereichen, von Astronomie über Heliophysik bis hin zu den planetaren Wissenschaften, ab. Die Missionsideen wurden im Rahmen einer Nutzwertanalyse hinsichtlich ihrer technischen und finanziellen Realisierbarkeit, aber auch hinsichtlich ihres wissenschaftlichen Impacts verglichen.

A11. Ausarbeitung des Endberichtes und Präsentation der Ergebnisse

In Abstimmung mit den fachlichen Bearbeitern wurde der Endbericht als Kurzbericht formuliert und nach Abschluss des Vorhabens veröffentlicht (siehe Publikationsliste). Ziel war es die wichtigsten Erkenntnisse in kompakter Form darzustellen. Die (Zwischen-) Ergebnisse wurden auf unterschiedlichen Konferenzen präsentiert (siehe Publikationsliste)

Vorhabensaufstockung

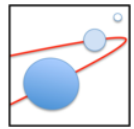
Im Rahmen der Vorhabensaufstockung wurden die Vorhabensziele erweitert, diese werden nachfolgend einzeln betrachtet.

A1. Wissenschaftliche Bewertung der ausgewählten Konzepte unter Einbeziehung der befragten Wissenschaftler/innen

Zur wissenschaftlichen Bewertung der Missionskonzepte wurden auf Grundlage der Umfrageergebnisse relevante Expertinnen und Experten identifiziert. Diese wurden in Interviews zu den spezifischen wissenschaftlichen Untersuchungen befragt, die im Rahmen der Mission angestrebt werden sollten. Die Antworten sowie die internationale Relevanz der Forschungsfragen dienten als Basis zur Bewertung der wissenschaftlichen Potenziale der Konzepte.

A2. Untersuchung verwandter Missionskonzepte und internationaler Relevanz in der Wissenschaft

Zur Untersuchung der Missionskonzepte im Vergleich zu verwandten Missionen wurden diese zunächst mit den in der Datenbank erfassten Missionen, sowohl im Bereich der Kleinsatelliten als auch darüber hinaus, abgeglichen. Im Anschluss erfolgte eine Überprüfung der Missionsziele im Hinblick auf aktuelle, offene wissenschaftliche Fragestellungen, die aus internationalen Strategeanalysen



abgeleitet wurden. Zudem wurde die Relevanz der Konzepte im Kontext bekannter internationalen Missionsbemühungen auf diesem Gebiet untersucht.

A3. Instrumentierung und Anforderungen der Nutzlast

Konkrete Vorschläge für die Instrumentierung und die wichtigsten Anforderungen wurden für die Kleinsatellitenidee zur Erforschung von Apophis ausgearbeitet. Für die MeVCube Idee war bereits eine Instrumentierung vorgegeben, sodass sich hier auf eine Analyse der Nutzlastanforderungen konzentriert wurde. Für die cislunare Missionsidee wurden potenzielle Nutzlasten diskutiert, aufgrund der Priorisierung der Arbeiten jedoch nicht ausgewählt.

A4. Konzeption der Missionen inklusive Boden- und Raumsegment unter Beachtung der Umweltbedingungen

Die Konzeption der Missionen wurde, in Abstimmung mit den fachlichen Bearbeitern, in unterschiedlichen Detailstufen für die drei Missionsideen durchgeführt. Eine umfassende Konzeption der Mission wurde nur für den CubeSat für die europäische RAMSES Mission zu Apophis durchgeführt.

A5. Untersuchung möglicher Transportszenarien und Transferoptionen

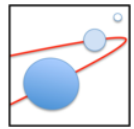
Für alle drei Missionskonzepte wurden auf Basis der SATEX Ergebnisse verschiedene Transferoptionen untersucht und in dem Bericht behandelt.

A6. Machbarkeitsuntersuchung der Missionskonzepte und Identifikation von Hürden

Analog zur Konzeption der Missionsideen, wurde auch die Machbarkeitsuntersuchung in unterschiedlichen Detailstufen für die drei Missionsideen durchgeführt. Für alle Missionsideen wurden die technischen Hürden für die einzelnen Subsysteme eines Kleinsatellitenbusses diskutiert.

A7. Ausarbeitung des Endberichtes und Präsentation der Ergebnisse

Ein Bericht über die Untersuchungsergebnisse wurde im Rahmen des Vorhabens erstellt, in welchem die Ergebnisse aufgeführt sind. Die Ergebnisse wurden im Rahmen der durchgeführten Konferenzreisen einem internationalen Fachpublikum präsentiert.



2 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Der Großteil der Zuwendungen wurde, wie beantragt, für Personalkosten aufgewendet. Weitere Aufwendungen entfielen auf Reisen im Rahmen des Vorhabens zur Präsentation der (Zwischen)-Ergebnisse. Weiterhin wurde ein Teil der Mittel im Rahmen der Aufstockung für die Beschaffung einer spezialisierten Analysesoftware eingesetzt.

3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Im Rahmen der Untersuchung konnte ein vielfältiges Interesse nationaler Wissenschaftler an Kleinsatellitenmissionen in der Extraterrestrik gezeigt werden. Zusätzlich konnten unterschiedliche technologische Schlüsseltechnologien identifiziert werden. Durch die vertiefte Untersuchung der Missionsideen konnten konkrete Vorschläge zu internationalen Missionsbemühungen mit Partner aus weiteren nationalen Forschungseinrichtungen erarbeitet werden. Insgesamt kann daher eingeschätzt werden, dass die geleistete Arbeit den Zielstellungen des Vorhabens angemessen war.

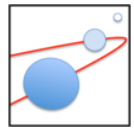
4 Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere der Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans

Die Ergebnisse des Vorhabens dienen als Grundlage für die Untersuchung der Machbarkeit von Kleinsatellitenmissionen zur Asteroidenforschung am Beispiel von (99942) Apophis im Rahmen des NEA-light Vorhabens. Das langfristige Verwertungsziel der Ergebnisse ist die Vorbereitung einer nationalen Kleinsatellitenmission für die Erforschung des Weltraums. Weiterhin können die erhobenen Daten einen Einfluss auf die Ausarbeitung von Strategien haben und die Vorbereitung von Missionsanträgen auf nationaler Ebene und darüber hinaus unterstützen.

5 Während der Durchführung des Vorhabens dem ZE bekannt gewordener Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Das Feld der interplanetaren Raumfahrtmissionen war erwartungsgemäß im Berichtszeitraum sehr dynamisch. Besonders relevant sind dabei folgende Entwicklungen:

Im Rahmen der ARTEMIS-1 Mission der NASA wurden Ende 2022 zehn CubeSats in den cislunaren Raum gestartet, welche sowohl Potentiale, aber auch durch zahlreiche Ausfälle technologische Herausforderungen eindrucksvoll demonstrierten. Auch die Aktivitäten anderer Raumfahrtagenturen, besonders im cislunaren Raum haben weiter zugenommen. Beispiele hierfür sind u.a. die Chandrayaan-3 Mission der ISRO, Start des SLIM Landers der JAXA oder die Chang'e 6 Mission der CNSA, welche auch einen lunaren Kleinsatelliten aus Pakistan an Bord hatte. Die kommerzielle Aktivitäten im interplanetaren Raum haben ebenfalls zugenommen, wie neben der Durchführung erster Lan-



demissionen auch die Ankündigungen weiterer privater cislunarer Missionen zeigt. Insgesamt erhöhen diese Aktivitäten die Anzahl der Kooperationsmöglichkeiten, verfügbarer Infrastruktur und Start- sowie Transferoptionen in den kommenden Jahren signifikant.

Im Sep. 2023 wurde zudem die neue Nationale Raumfahrtstrategie vorgestellt. Sie fordert die Nutzung der Potentiale von Kleinsatellitenmission auch bei der Erforschung des Weltraums und verdeutlicht damit die Bedeutung solcher Missionen, der damit verbundenen technologischen Entwicklungen und dem Aufbau von Know-How im nationalen Kontext insgesamt.

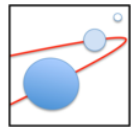
Für die Untersuchungen der Missionsideen im Rahmen der Aufstockung sind neben den cislunaren Entwicklungen besonders die Aktivitäten um die Erforschung von (99942) Apophis besonders relevant für die Durchführung. Hierzu zählt besonders die Konkretisierung der RAMSES-Mission durch die ESA und Vorstellung im Rahmen verschiedener Workshops. Auch die Durchführung eines nationalen Workshops zu den wissenschaftlichen Interessen aus der deutschen Community Ende 2023 hat wichtige Inputs für die Analyse des Missionskonzepts gegeben. Weiterhin haben der erfolgreiche Sample-Return der OSIRIS-REx-Mission und die anschließende Ankündigung zur Verlängerung zu OSIRIS-APEX Einflüsse auf die internationalen Aktivitäten rund um die Erforschung von Apophis gegeben.

6 Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen des Ergebnisses

Eine Liste aller Veröffentlichungen und Konferenzbeiträge ist nachfolgend angegeben.

2024

- Kayal, H.; Männel, J.; Neumann, T. & Riegler, C. (2024): *A possible German CubeSat Contribution to RAMSES*.
- Männel, J.; Auster, H. U.; Grott, M.; Herique, A.; Kayal, H.; Neumann, T.; Plaschke, F.; Plettmeier, D.; Riegler, C. & Vincent, J.-B. (2024): *Poster Contribution: A possible German CubeSat Contribution to RAMSES*. Noordwijk, The Netherlands
[\[Volltext\]](#)
- Männel, J.; Borschinsky, E.; Kayal, H.; Neumann, T. & Riegler, C. (2024): *SATEX: Extraterrestrik mit Kleinsatelliten - Kurzbericht*.
[\[Volltext\]](#)



2023

- Kayal, H.; Borschinsky, E.; Männel, J.; Neumann, T. & Riegler, C. (2023): *Kleinsatelliten in der Extraterrestrik: Stand, Bedeutung und Perspektiven*.
- Männel, J.; Borschinsky, E.; Kayal, H.; Neumann, T. & Riegler, C. (2023): Trends und Forschungswünsche in der Extraterrestrik und Ideen für eine nationale Kleinsatellitenmission: Analyse einer Umfrage unter Wissenschaftlern in Deutschland im Rahmen des Satexprojekts. In: Proceedings DLRK 2023, Bonn. [\[Volltext\]](#)
- Männel, J.; Borschinsky, E.; Kayal, H.; Neumann, T. & Riegler, C. (2023): *What can you do with a CubeSat in Deep Space? A Systematic Survey on Opportunities and Key Technologies for Extraterrestrial Small Satellites*. Würzburg, Germany
- Neumann, T.; Borschinsky, E.; Kayal, H.; Männel, J. & Riegler, C. (2023): Kleinsatellitentechnologien zur Beantwortung wissenschaftlicher Fragen in der Extraterrestrik. In: Proceedings DLRK 2023, Bonn. [\[Volltext\]](#)