

# TRENDS UND FORSCHUNGSWÜNSCHE IN DER EXTRATERRESTRIK UND IDEEN FÜR EINE NATIONALE KLEINSATELLITENMISSION: ANALYSE EINER UMFRAGE UNTER WISSENSCHAFTLERN IN DEUTSCHLAND IM RAHMEN DES SATEX- PROJEKTS

J. Männel<sup>#</sup>, E. Borschinsky<sup>#</sup>, H. Kayal<sup>#</sup>, T. Neumann<sup>#</sup>, C. Riegler<sup>#</sup>

<sup>#</sup>JMU Würzburg, Institut für Informatik VIII Raumfahrttechnik, Würzburg, Deutschland

## Zusammenfassung

Kleinsatelliten und besonders CubeSats fanden in den vergangenen Jahren immer mehr Anwendungsmöglichkeiten in der extraterrestrischen Forschung. Im Rahmen des SATEX Projekts (FKZ 5000222) wurde der Einsatz von Kleinsatelliten in der Extraterrestrik systematisch untersucht. Zur Erfassung allgemeiner Forschungstrends und Wünsche in der Extraterrestrik in Deutschland, sowie zur Identifikation möglicher Schwerpunkte für den Einsatz von Kleinsatellitenmissionen aus Nutzersicht, wurde eine Befragung unter deutschen Wissenschaftlern durchgeführt. In dieser Arbeit werden die wichtigsten Erkenntnisse aus der Befragung zusammenfassend präsentiert und Missionsideen für nationale Kleinsatellitenmissionen auf Grundlage der genannten Wünsche vorgestellt. Insgesamt konnte ein breites Spektrum an Einsatzmöglichkeiten für alle untersuchten Nutzergruppen ermittelt werden, u.a. im Bereich der Astronomie zur Langzeitbeobachtung einzelner Quellen, verteilte Messungen im Bereich Heliophysik oder zur Erforschung von Kleinen Körpern im Sonnensystem, sowie zum Test und Demonstration von Deep-Space Hardware für Kleinsatelliten.

## Keywords

Extraterrestrik; Kleinsatellitenmissionen

## 1. EINFÜHRUNG

Durch gestiegene Leistungsfähigkeit und Flexibilität von Kleinsatelliten (KS)<sup>1</sup>, insbesondere CubeSats, in der vergangenen Dekade befindet sich der Satellitenmarkt im Erdorbit in großer Veränderung. Während zunächst ausschließlich Universitäten und Forschungseinrichtungen CubeSats zur Technologie-demonstration einsetzten, haben in den vergangenen Jahren immer mehr kommerzielle Anbieter das Potential von CubeSats optimiert und durch den Aufbau von Konstellationen für Telekommunikations- und Erdbeobachtungsservices neue Geschäftsfelder erschlossen [2]. Diese Kommerzialisierung der

Raumfahrt und ihre zunehmende Verzahnung mit der klassischen Wirtschaft wird auch als *New Space* bezeichnet [3].

Mit der gestiegenen Leistungsfähigkeit von Kleinsatelliten und insbesondere CubeSats ergeben sich auch eine Vielzahl wissenschaftlicher Anwendungsmöglichkeiten. Einen guten Überblick über die Einsatzmöglichkeiten von CubeSats inkl. interplanetare Missionen bietet das *CubeSat Handbook* [4]. Im Rahmen der SATEX Untersuchung (FKZ 5000222) wurden explizit potentielle Anwendungen im Bereich der extraterrestrisch (extr.) Forschung untersucht. Anwendungsbereiche für extr. Kleinsatellitenmissionen sind hierbei u.a. wissenschaftlichen Missionen in der Astronomie, Heliophysik, der Erforschung des Weltraumwetters, aber auch in der Planetaren Wissenschaft, wie der Erforschung von Kleinen Körpern im Sonnensystem oder der Astrobiologie. Weiterhin können Kleinsatelliten einen wichtigen Beitrag im Bereich der Missionsunterstützung großer wissenschaftlicher Missionen und zur Technologiedemonstration spezieller Subsysteme oder Instrumente

<sup>1</sup>Im Rahmen der **SATEX-Untersuchung werden Satelliten bis zu einer Masse von 54kg als Kleinsatelliten bezeichnet**. Diese Definition bietet eine gute Abgrenzung gegenüber traditionellen Missionen in der Extraterrestrik mit deutlich höheren Massen und fokussiert sich zugleich auf tatsächlich miniaturisierte Satelliten, welche auch mit Microlaunchern direkt zu Cislunar / interplanetar (CL/IP) Trajektorien gestartet werden können. Mit der Massendefinition von 54 kg wird der bisher größte CubeSat Standard mit 27U unterstützt [1]. Besonders im Rahmen von zukünftigen Missionsdesigns ist diese Grenze aber als weiche Grenze zu verstehen.

für interplanetare Missionen leisten. Wichtig ist hierbei zu beachten, dass die Anwendungen für extr. Forschung mit Kleinsatellitenmissionen im Erdorbit sehr limitiert sind. Die Mehrheit der extr. Missionen muss im cislunaren / interplanetaren (CL/IP) Raum stationiert werden. Da diese Missionen jedoch signifikant herausfordernderen Umgebungsbedingungen ausgesetzt sind und somit andere Anforderungen an das Missionsdesign stellen, wurde diese dediziert analysiert und nachfolgend als CL/IP Missionen bezeichnet<sup>2</sup>.

### 1.1. Kleinsatelliten für extr. Missionen

In dem Bereich der Astronomie gibt es bereits einige Beispiele für den erfolgreichen Einsatz von CubeSats. Dazu zählen u.a. die Mission *ASTERIA* (2017) [6], welche Exoplaneten über die Transitmethode entdeckte oder auch die beiden Cubesats *GRBA/alpha* (2021) und *VZLUSAT-2* (2022) [7], welche Gamma-Ray Burst (GRB) Detektoren als Nutzlast hatten. In diesem Bereich können auch Netzwerke aus vielen (>10) Satelliten im niedrigen Erdorbit einen wichtigen Beitrag leisten, wie Missionsideen wie das *HERMES* Projekt zeigt [8, 9]. Im Bereich Heliophysik und Weltraumwetter wurden in den vergangenen Jahren bereits zahlreiche Missionen durchgeführt und vorbereitet. Allerdings waren auch hier nahezu alle Missionen im Erdorbit stationiert. Beispiele für solche Missionen sind unter anderem die Missionen *FIREBIRD* (2013) und *FIREBIRD II* (2015) zur Untersuchung von Microburst Events und deren räumliches und zeitliches Verhalten in den Van-Allen-Strahlungsgürteln der Erde [10]. Weitere Beispiele sind der 2U große CubeSat der *SUNSTORM* Mission, welcher 2021 gestartet wurde und primär zur Technologieerprobung eines hoch miniaturisierten, solaren *X-Ray Flux Monitor (XFM)* Instruments für zukünftige Space Weather Missionen an den Lagrangepunkten dient [11]. Neben diesen Missionen wurde 2022 die *CuSP* Mission gestartet, welche einen heliozentrischen Orbit einnehmen sollte und damit die erste interplanetare CubeSat Mission in diesem Bereich ist [12]. Allerdings konnte nach dem Start im Rahmen der *Artemis 1* Mission nur ein einziger erfolgreicher Kontakt verzeichnet werden [13]. Ziel der Mission war die Untersuchung solarer Partikel und Magnetfelder im interplanetaren Raum.

<sup>2</sup>Eine umfassende Analyse der technologische Einsatzbereitschaft und wichtige Schlüsseltechnologien für CL/IP Missionen wurde im Rahmen der SATEX Untersuchung von *Neumann et al* [5] durchgeführt.

CL/IP Kleinsatellitenmissionen nach Startjahr und Missionstyp sortiert

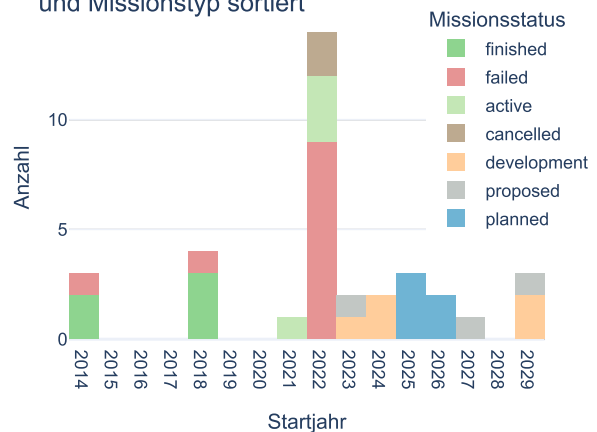


BILD 1: Abbildung 1: Übersicht über alle untersuchten CL/IP Kleinsatellitenmissionen mit einem offiziellen Startjahr. 56 Missionskonzepte ohne Startjahr sind nicht dargestellt (Stand Jul. 2023).

Eine gute Übersicht über bisherige CubeSat-Missionen, besonders im Bereich der Weltraumwetterforschung, bietet der Bericht *Achievements and Lessons Learned from Successful Small Satellite Missions for Space Weather-Oriented Research* (2022) [14].

Analog zu den Entwicklungen im Erdorbit wurden erste Kleinsatelliten- und CubeSat Pioniermissionen im CL/IP Raum im Rahmen der Technologiedemonstration und extr. Forschung entwickelt und eingesetzt. Mit der japanischen *Hayabusa-2* Mission sind 2014 erstmals KS (*PROCYON, Shin'en 2 und DESPATCH*) in den CL/IP Raum als Rideshare gestartet wurden. Im Jahr 2018 sind mit *MarCO-A & -B* erstmals CL/IPen Kleinsatellitenmissionen im CubeSat-Format gestartet, mit dem Ziel während dem Eintritt des *InSight* Mars Lander in die Marsatmosphäre als Kommunikationsrelay zu fungieren. Drei Jahre später wurde *LICIACube* ebenfalls als Missionsunterstützung zusammen mit der *Double Asteroid Redirection Test (DART)* Mission gestartet.

Mit *Artemis-1* ist 2022 die Anzahl der gestarteten CL/IP KS-Missionen sprunghaft angestiegen, da hierbei insgesamt 10 Missionen parallel gestartet wurden. Im selben Jahr ist wurde mit der *CAPSTONE* Mission zum ersten Mal ein CL/IP CubeSat als dedizierte Hauptmission auf einem Microlauncher gestartet und nicht als sekundäre Nutzlast einer größeren Mission. BILD 1 gibt einen Überblick über die Verteilung der Startjahre und den Missionsstatus untersuchter CL/IP Missionen. In BILD 2 ist zusätzlich einer der beiden

Satelliten der *MarCO* Mission als Referenz für einen extr. Kleinsatelliten dargestellt.

In der vorliegenden Arbeit werden in Abschnitt 2 die Methodik, der Aufbau und die wichtigsten Ergebnisse der Befragung diskutiert und anschließend in Abschnitt 3 die Extraktion der Missionsideen und Schwerpunktthemen für den Einsatz von Kleinsatelliten in der Extraterrestrik erläutert. Im Anschluss werden die, im Rahmen der Umfrage, formulierten Missionsideen in Abschnitt 3.3 vorgestellt.

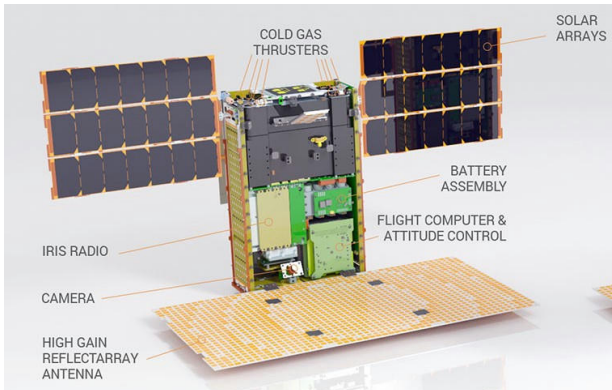


BILD 2: Abbildung 2: Abbildung einer der beiden *MarCO*-Satelliten als Beispiel für einen CL/IP Kleinsatelliten, Credit: NASA/JPL [15]

## 2. NATIONALE BEFRAGUNG

Um im Rahmen der SATEX Untersuchung die Anwendungsmöglichkeiten für extr. Kleinsatelliten systematisch untersuchen zu können, wurden durchgeführte und vorgeschlagene Missionskonzepte für extr. KS analysiert und eine Befragung unter Wissenschaftlern in Deutschland durchgeführt. Ziel der Befragung war es allgemeine Forschungstrends in der Extraterrestrik, wichtige Messungen und Nutzerwünsche zu erfassen und aus diesen dann potentielle Missionsideen für extr. Kleinsatellitenmissionen abzuleiten. Im nachfolgenden Abschnitt wird zunächst kurz auf die angewendete Methodik eingegangen und im Anschluss die Erstellung, Durchführung und Auswertung der nationalen Befragung erörtert<sup>3</sup>.

### 2.1. Methodik

Mit der Befragung sollten zwei Ziele erreicht werden, zum einen allgemein Trends und Forscherwünsche

<sup>3</sup>Eine umfassende Auswertung der Befragung einschließlich einer Druckversion des Fragebogens soll im weiteren Verlauf des SATEX Projekts unter dem Titel *Auswertung der Befragung zur Extraterrestrischen Forschung in Deutschland* in der Schriftenreihe *Advances in Space Technology and Exploration* (ISSN 2747-9374) veröffentlicht.

in der Extraterrestrik zu erfassen um ein grobes Gesamtbild der deutschen Forschungslandschaft und Ihrer Wünsche in den kommenden Jahren zu skizzieren und zum anderen Wünsche und Ideen für Kleinsatellitenmissionen in der Extraterrestrik zu sammeln, welche die genannten Forschungswünsche unterstützt.

Für die Sammlung und Bewertung von Missionsideen ist eine verbreitete Vorgehensweise, von befragten Wissenschaftlern eingereichte Whitepaper auszuwerten. Dieses Vorgehen erscheint aber im Kontext der sehr begrenzten Untersuchung aus zwei Gründen nicht passend, wie nachfolgend dargestellt.

1. Da weltweit bisher vergleichsweise nur wenige Satelliten in der extr. Forschung eingesetzt wurden, wurde angenommen, dass auch die befragten Wissenschaftler bisher nur sehr wenig Erfahrung mit Kleinsatelliten in ihren Fachgebieten gesammelt haben. Diese Annahme konnte im Rahmen der Umfrage bestätigt werden, wie BILD 3 zeigt. Eine zu starke Fokussierung auf Kleinsatelliten in der Befragung hätte dazu führen können, dass wertvolle Nutzerwünsche und innovative Ideen verloren gegangen wären, da sie von den Nutzern nicht als nicht relevant für Kleinsatellitenmissionen angesehen wurden, z.B. im Bereich Astrophysik/Astronomie.
2. Da es sich um eine vergleichsweise sehr kleine Untersuchung handelt, hätte eine Erfassung der Missionsideen über Whitepaper Interessensgruppen stark bevorzugt, die bereits fertige Missionskonzepte ausgearbeitet haben. Es ist anzunehmen, dass für viele Teilnehmer die Ausarbeitung eines Whitepapers explizit für diese Untersuchung einen unverhältnismäßig hohen Aufwand mit sehr kurzer Bearbeitungszeit bedeutet hätte.

Frage 3.5 Haben Sie bereits Erfahrungen mit Kleinsatelliten (Masse < 54kg) im Rahmen Ihrer Forschung (insbesondere CubeSats)?

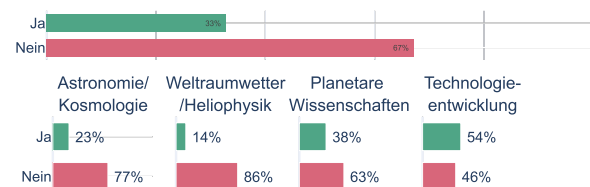


BILD 3: Abbildung 3: Auswertung der bisherigen Erfahrungen der Befragungsteilnehmer mit Kleinsatelliten

Aufgrund der aufgeführten Argumente wurde entschieden die Missionsideen manuell aus den Nutzerantworten extrahiert wurden, auch wenn dabei eine Verzerrung durch die Umfrageauswertung in Kauf genommen werden muss.

## 2.2. Aufbau und Durchführung der Befragung

Der Fragebogen wurde in Abstimmung mit der Deutschen Raumfahrtagentur im Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), Abt. Erforschung des Weltraums, erstellt und hatte einen Umfang von ca. 15 Minuten Bearbeitungszeit. Der Fragebogen erfasst, in 5 Abschnitte gegliedert, die aktuellen Forschungsthemen und Forschungstrends der Wissenschaftler, bisherige Erfahrungen in der Satelliten- und Instrumentenentwicklung, sowie wichtige Schwerpunkte bei der Durchführung zukünftiger Missionen in der Extraterrestrik. Weiterhin wurden wichtige zukünftige Messungen und konkrete Missionswünsche der Forschenden abgefragt. Die Teilnehmer der Befragung bildeten Wissenschaftler im Bereich der extraterrestrischen Forschung, der Satellitentechnologie, sowie verwandter Felder in Deutschland. Insgesamt konnten 226 Wissenschaftler an insgesamt 69 deutschen Professuren oder Forschungseinrichtungen zur Teilnahme an der Umfrage eingeladen werden. Für eine breitere Abdeckung der Umfrageteilnehmer wurden die angeschriebene Umfrageteilnehmer gebeten die Umfrage intern auch an Kollegen und Mitarbeiter mit thematisch passenden Fachgebieten weiterzugeben.

Die Umfrage wurde mit Hilfe des Befragungs- und Evaluierungssystem der Universität Würzburg im Januar 2023 digital durchgeführt. Insgesamt konnten 64 Rückmeldungen verzeichnet werden. Die erzielte Rücklaufquote von 28% ist hinreichend für eine aussagekräftige Untersuchung und kann im Vergleich zu den Standardwerten für Online-Befragungen als durchschnittlich bis gut eingestuft werden [16].

## 2.3. Befragungsergebnisse

Um die Befragungsergebnisse angemessen einordnen zu können, wurde die Teilnehmer gebeten ihre Forschung vorgegeben Themenbereiche zuzuordnen. Diese Kategorisierung diente als Grundlage zur Einordnung des wissenschaftlichen Hintergrunds in nachfolgenden Analysen. Das Ergebnis dieser Selbsteinordnung ist in BILD 4 dargestellt.

Frage 2.1 Welchem der folgenden Themenbereiche würden Sie ihre Forschung zuordnen?

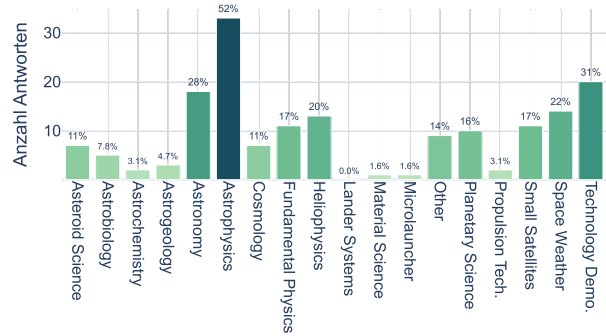


BILD 4: Abbildung 4: Verteilung der Forschungsgebiete der Befragungsteilnehmer

Aus der Grafik lassen sich mehrere Erkenntnisse über fachlichen Hintergründe der befragten Wissenschaftler und damit auch über die extraterrestrische Forschung in Deutschland ableiten. Entsprechend der Antworten steht ein bedeutender Schwerpunkt in der extraterrestrischen Forschung in Deutschland in Bezug zu astrophysikalischen Themen. Weiterhin ist bemerkenswert, dass kein Teilnehmer angegeben hat, dass seine Forschung in den Bereich *Landesysteme* fällt, was darauf hindeutet, dass dieser Bereich in der deutschen Forschungslandschaft nur sehr wenig vertreten ist. Diese Erkenntnisse decken sich mit den Beobachtungen der Autoren während der Recherchen zu dem Stand der extaterrestrischen Forschungslandschaft in Deutschland.

### 2.3.1. Clustering

Zur Auswertung der Umfrage wurde eine Clusteranalyse durchgeführt, um verschiedene Gruppen von Wissenschaftlern mit ähnlichen Forschungsschwerpunkten zu identifizieren. Dies ermöglicht eine differenzierte Betrachtung der Umfrageergebnisse und trägt dazu bei, fachspezifische Bedürfnisse und Potentiale für den Einsatz von Kleinsatelliten besser zu identifizieren. Die Grundlage des Clusterings bildete die eigenständige Zuordnung der Forschungsaktivitäten zu verschiedenen Themenbereichen, welche bereits diskutiert wurde und in BILD 4 dargestellt ist. Das Optimierungsziel bei der Clusterzuordnung war es die cluster-internen Überschneidungen zu maximieren und gleichzeitig die Überschneidungen zu anderen Clustern zu minimieren. Insgesamt konnten vier grundlegende Cluster definiert werden: drei wissenschaftlichen Fachgruppen und eine Fachgruppe zu Technologieentwicklung.

- Astronomie und Kosmologie (A/K)
- Heliophysik und Weltraumwetter (H/W)
- Planetare Wissenschaften (PW)
- Technologieentwicklung (TE)

Wichtig hierbei ist zu beachten, dass die Zuordnung zu den jeweiligen Cluster (Fachgruppen) nicht exklusiv erfolgt, d.h. die Antworten von einem Wissenschaftler in zwei unterschiedlichen Clustern berücksichtigt werden können. Bei diesem Ansatz muss in Kauf genommen werden, dass einzelne Stimmen von Wissenschaftlern mit Querschnittsthemen potentiell stärker gewichtet werden, allerdings kann nur so gewährleistet werden, dass alle fachgruppenspezifische Wünsche und Bedürfnisse der Umfrageteilnehmer mit Expertise in den jeweiligen Themengebieten umfassend berücksichtigt werden. In einer sehr kleinen Anzahl an Fällen war eine manuelle Zuordnung notwendig, da sich hierbei der ausgewählte Themenbereich als zu mehrdeutig erwiesen hat. Diese Zuordnung war jedoch aufgrund der Angaben und Antworten auf die anderen Fragen eindeutig möglich. In TAB. 1 ist die Aufteilung der einzelnen Cluster und die Anzahl der Überschneidungen zwischen den einzelnen Gruppen dargestellt.

	A/K	W/H	PW	TE	Gruppengröße
A/K	10*	1	5	8	22
W/H		17*	1	4	22
PW			5*	8	16
TE				11*	28

TAB. 1: Tabelle 1: Mehrfachberücksichtigung von Datensätzen zwischen den Clustergruppen. Dargestellt ist die Anzahl an Datensatzdopplungen. Die mit \* gekennzeichneten Werte geben jeweils die Anzahl an Datensätzen an, welche ausschließlich in dieser Fachgruppe betrachtet werden. Die Gruppengröße der Fachgruppen ist jeweils als Referenz mit angegeben.

### 2.3.2. Aktuelle Forschung und Forschungstrends

Zunächst wurde in der Befragung die aktuelle Forschungsthemen erhoben, diese sind nachfolgend für die einzelnen Gruppen zusammenfassend dargestellt.

**Astronomie und Kosmologie** Im Rahmen der Befragung genannte, aktuelle Forschungsthemen im Bereich der Astronomie und Kosmologie umfassen u.a. die Erforschung der inneren Struktur und Entwicklung von Sternen, von kompakten Objekten und Galaxien, die Suche nach Schwarzen Löchern und die Erforschung der Natur Dunkler Materie und Dunkler Energie, sowie die Untersuchung spezifischer Phänomene wie Supernovae, GRB oder Gravitationswellen. Wichtige Themen sind weiterhin die Entwicklung neuer Instrumente, besonders im Bereich der UV- und Röntgenastronomie, unterschiedliche Ansätze im Bereich Multimessenger und Time-Domain Astronomie und die Suche und Charakterisierung von Exoplaneten.

**Heliophysik und Weltraumwetter** Im Rahmen der Befragung genannte, aktuelle Forschungsthemen im Bereich Heliophysik und Weltraumwetter umfassen u.a. die Beobachtung der Sonne durch bodengebundene, ballongetragene und weltraumbasierte Sonnenteleskope, die Untersuchung von Parametern welche die Aktivität der Sonne beeinflussen, sowie die Charakterisierung und Vorhersage des Weltraumwetters. Dazu wird besonders die Funktionsweise des Sonnendynamos, der Aufbau und die Wechselwirkung der unterschiedlichen solaren Magnetfelder und die physikalischen Prozesse in der Sonnenatmosphäre erforscht. Ein weiterer wichtiger Bestandteil ist die Untersuchung der Strahlung in der Heliosphäre, die Auswirkungen von Sonneneruptionen auf die erdnahe Umgebung und das Leben auf der Erde, sowie Untersuchungen zu Ursprüngen und die Ausbreitung von Strahlung in der gesamten Heliosphäre.

**Planetare Wissenschaften** Der Bereich der Planetaren Wissenschaften umfasst eine Vielzahl unterschiedlicher Forschungsrichtungen und Themen welche sich mit Objekten im Sonnensystem und der Habitabilität von Planeten befassen u.a. die Untersuchung von kleinsten und kleinen Objekten im Sonnensystem wie Staub, Mikrometeoroiden und Meteoriten bis hin zu der Erforschung von Monden, Planeten und des Sonnensystems im Allgemeinen. Dabei werden unterschiedlichste Teilaspekte untersucht, u.a. die Oberflächen und Atmosphären von Himmelskörpern, sowie deren potenzielle Habitabilität, aber auch Verteilung von erdnahen Asteroiden/Meteoroiden und die Charakteristiken von Meteoriten, sowie die Erkundung von Weltraumressourcen und deren zukünftige Nutzungsmöglichkeiten.

**Technologieentwicklung** Im Bereich der Technologieentwicklung kann zwischen der Entwicklung neuer Satellitensubsysteme, beispielsweise Antriebstechnologien oder Antennen, und der Entwicklung neuer Nutzlastinstrumente und Messmethoden, beispielsweise auf Basis von Quantentechnologien, unterschieden werden. Weiterhin umfasst die Technologieentwicklung auch die Entwicklung robotischer Plattformen wie Rover zur Exploration unbekannter planetarer Umgebungen und deren intelligenten und robusten Steuerung, sowie die Untersuchung von Kleinsatellitenschwärmen und deren Regelung für unterschiedliche Einsatzzwecke.

**Forschungstrends** Die genannten Forschungstrends lassen sich aufgrund der sehr großen inhaltlichen Diversität nicht in diesem Format wiedergeben, ohne den Inhalt stark zu verzerren oder bis zur Aussageslosigkeit zu abstrahieren. Daher sind die genannten, wichtigen Untersuchungen und Messungen in den kommenden Jahren im Anhang A.1 dargestellt. Zusätzlich wurden die Teilnehmer gebeten aus einer vorgegebenen Liste bis zu 3 Stichworte außerhalb des eigenen Forschungsbereichs auszuwählen, welche sie persönlich als die wichtigsten Trendthemen in der extraterrestrischen Forschung in den nächsten Jahren sehen. Um eine größtmögliche Neutralität bei den vorgeschlagenen Stichworten zu gewähren, wurde dazu die *Tabelle für Topical Team Members* zur Erstellung der *ESA Voyage Vision* verwendet [17]. Bei der Auswertung der Ergebnisse sortiert nach Fachgruppen, wie in BILD 5 dargestellt, lassen sich einzelne Trends innerhalb der Fachgruppen ablesen. Besonders eindeutige Prioritäten haben die Wissenschaftler in der Gruppe Planetare Wissenschaften. Dort haben 69% die Erforschung von Small Solar System Bodies und 50% Planetray Sciene als Priorität angegeben. Der Bereich der Technologieentwicklung weist insgesamt die größte Diversität auf, da die Wissenschaftler aus sehr unterschiedlichen Fachbereichen kommen, aber auch hier haben 39% für den Bereich Planetray Sciene gestimmt. In der Fachgruppe Heliophysik und Weltraumwetter haben 55% die weitere Erforschung von Space Weather als sehr wichtige Priorität in der zukünftigen Forschung gesehen, gefolgt von dem Bereich Heliophysik mit 32%. Für die Fachgruppe Astronomie und Kosmologie sind die Schwerpunkte innerhalb des Fachgruppe deutlich weniger stark ausgeprägt, allerdings zeichnet sich die Erforschung der Dunklen Energie mit 32%, sowie Forschung jenseits des Standardmodells und

Gewünschte zukünftige Themen außerhalb des individuellen Forschungsgebietes

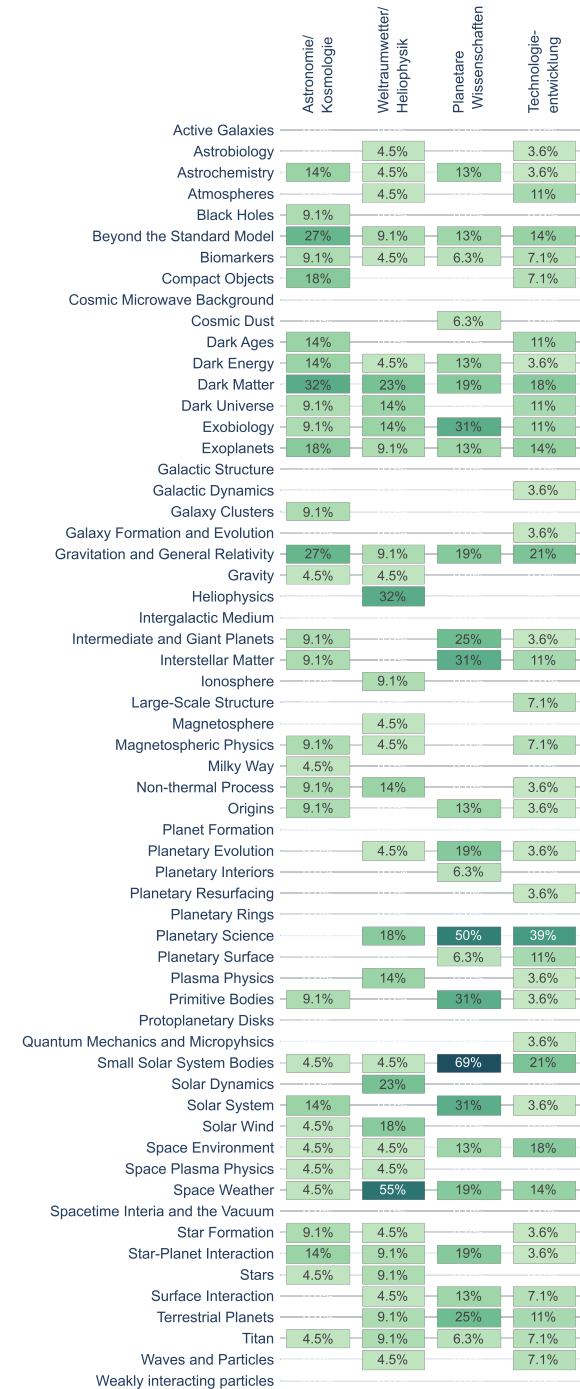


BILD 5: Abbildung 5: Wichtige zukünftige Themengebiete in der extraterrestrischen Forschung außerhalb des jeweiligen Forschungsgebietes, ausgewertet nach Fachgruppen

Untersuchungen zu Gravitation und Relativität mit jeweils 27% der Stimmen als ein wichtige zukünftiger Bestandteile der Forschung in diesem Bereich ab.

### 2.3.3. Charakteristiken extraterrestrischer Missionen

Zusätzlich zu den aktuellen Forschungsthemen und Trends wurden wichtige Charakteristika von extraterrestrischen Missionen abgefragt um diese bei der Formulierung der Missionsideen aus den Forscherwünschen berücksichtigen zu können.

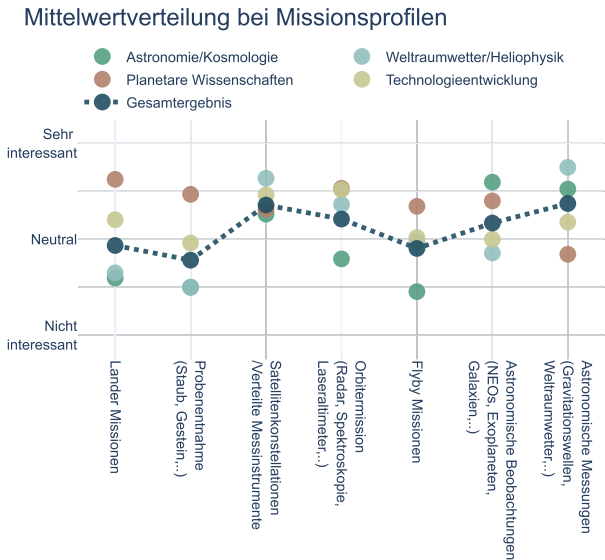


BILD 6: Abbildung 6: Darstellung der Mittelwerte der Interessensverteilung der einzelnen Fachgruppen in Abhängigkeit der unterschiedlichen Missionsprofile

BILD 6 zeigt die Mittelwertverteilung des Interesses an verschiedenen Missionsprofilen und verdeutlicht die fachübergreifende Bedeutung von Multi-Satelliten Missionen in den kommenden Jahren für alle Gruppen. Insgesamt sind jedoch sehr große Unterschiede zwischen den einzelnen Fachgruppen sichtbar. Wichtig ist bei dem Vergleich der Missionsprofile untereinander zu beachten, dass diese nicht komplementär zueinander sind, sondern in vielen Fällen unterschiedliche Eigenschaften von Missionen beleuchten und daher additiv zu lesen sind. So kann beispielsweise eine Orbitermission sowohl aus nur einem Satellit als auch aus einer Satellitenkonstellation bestehen.

Bei der Untersuchung nach potentiell interessanten Himmelskörpern unterscheiden sich die Forscherinteressen noch stärker. Wie in BILD 7 dargestellt ist, liegt das Maximum des Interesses der Gruppe der Planetaren Wissenschaften bei den Gasriesenplaneten, für Heliophysik und Weltraumwetter bei heliozentrischen Orbits und für die Technologie-

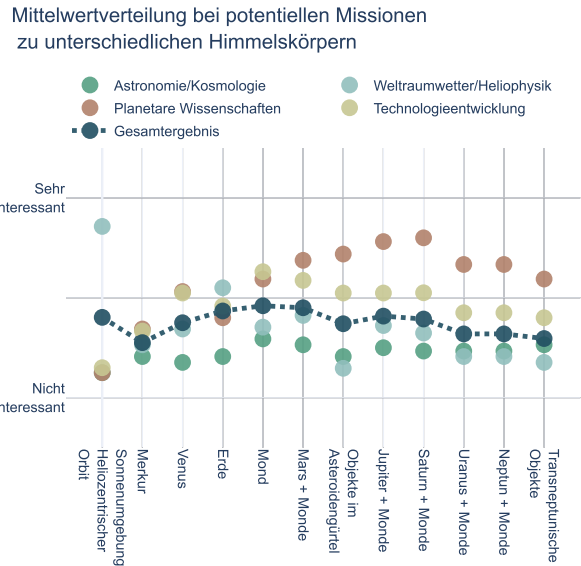


BILD 7: Abbildung 7: Mittelwertverteilung der Interessen an Missionen zu Himmelskörpern innerhalb des Sonnensystems

entwicklung bei Missionen zum Mond. Für Wissenschaftler in der Gruppe Astronomie/Kosmologie sind erwartungsgemäß alle Himmelskörper im Sonnensystem eher uninteressant.

Das Ranking einzelner Missionskriterien hilft bei der Wahl der Prioritäten im Missionsdesign und in der Bewertung von Missionsideen. Aus BILD 8 ist deutlich sichtbar, dass für eine große Mehrheit der Teilnehmer

#### Prioritäten bei einer wissenschaftlichen Satellitenmission

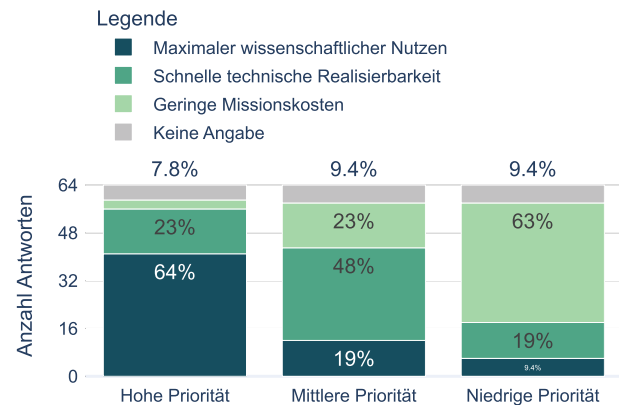


BILD 8: Abbildung 8: Verteilung geplanter extraterrestrischer Satellitenmissionen, aufgeschlüsselt nach Jahren und Missionstyp (Stand Jan. 2023).

der wissenschaftliche Nutzen die höchste Priorität besitzt, gefolgt von einer schnellen Missionsrealisierung. Niedrigen Missionskosten wird eine eher nachrangige Priorität zugewiesen.

### 3. EXTRAKTION DER MISSIONSIDEEN

Neben den Forschungsinteressen und Forschungstrends von deutschen Wissenschaftlern in der Extraterrestrik, wurden auch Wünsche für Satellitenmissionen und wichtige Messungen erfasst um aus diesen die Vorschläge für eine nationale Kleinsatellitenmission in der Extraterrestrik zu formulieren. Nachfolgend wird das Vorgehen zur Extraktion und Formulierung der Missionsideen beschrieben.

#### 3.1. Extraktion der Themenvorschläge aus der Befragung

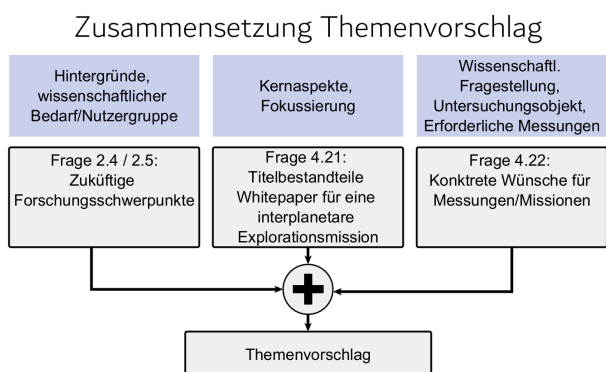


BILD 9: Abbildung 9: Verteilung geplanter extraterrestrischer Satellitenmissionen, aufgeschlüsselt nach Jahren und Missionstyp (Stand Jan.2023).

Die Herausforderungen bei der Extraktion der Themenvorschläge aus den Rückmeldungen auf die Befragung ist, aus den qualitativ und quantitativ stark variierenden Freitextantworten der Nutzer, die Vorschläge inhaltlich unverzerrt zu erfassen. Dabei können die Vorschläge von dem Wunsch einer wichtigen Untersuchung (ohne die Limitierung auf Kleinsatelliten) bis zu dem Verweis auf eine bereits vorliegende Konzeptstudie mit Kleinsatelliten schwanken. Um diese Unterschiede auszugleichen wurden in der Umfrage verschiedene Aspekte der Themenvorschläge abgefragt, welche miteinander kombiniert wurden. Die grundlegende Idee des Kombinationsprozesses ist in BILD 9 dargestellt. Dabei gilt es zu beachten, dass dieses Vorgehen den Idealweg beschreibt und nicht immer punktgenau anwendbar war, da beispielsweise Angaben in einzelnen Fragebogenabschnitten nicht gemacht wurden, oder von

einem Wissenschaftler stark unterschiedliche Themen untersucht werden. Insgesamt ermöglicht dieser Ansatz jedoch sehr viele unterschiedliche Themenvorschläge zu berücksichtigen, auch wenn diese von den Wissenschaftlern nicht vollständig ausformuliert wurden. Insgesamt konnten so 97 Themenvorschläge ermittelt werden, von welchen 72 als relevant gewertet werden konnten. Als Ausschlusskriterien wurde dabei drei grundlegende Kriterien angewendet, welche zusammen mit ihrer Anwendungshäufigkeit in BILD 10 dargestellt sind.

Gründe für den Ausschluss von Themenvorschlägen

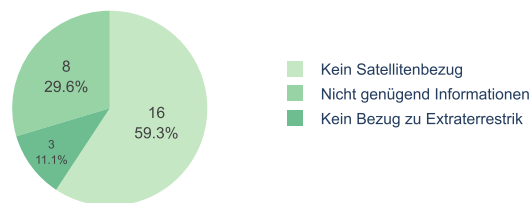


BILD 10: Abbildung 10: Gründe für den Ausschluss von Themenvorschlägen und die absolute und relative Anzahl ihrer Vorkommen.

#### 3.2. Von den Themenvorschlägen zu Missionsideen

Die extrahierten Themenvorschläge dienen als Grundlage für die Formulierung der extr. Kleinsatellitenmissionsideen im weiteren Verlauf der Untersuchung. Um die relevantesten Bereiche in den einzelnen Fachgruppen zu ermitteln, in welchem eine Mission durchgeführt werden soll, wurden zunächst die Themenvorschläge zu Themenfeldern gruppiert und Anhand ihrer Häufigkeit gewichtet. Die Gewichtung gibt einen Aufschluss darüber, welche Themen und Untersuchungen durch die Missionsideen abgedeckt werden sollten. Nachfolgend sind die identifizierten Themenfelder, welche mit prinzipiell durch Kleinsatellitenmissionen adressierbar sind, angegeben. Diese dienen als thematische Basis für die Entwicklung von Missionsideen aus den Themenvorschlägen.

##### Astronomie / Kosmologie

- Kleinsatellitenmission zur Technologieerprobung neuer astronomischer Instrumente (Detektoren, Elektronik etc., Fokus auf Wide-field Monitoring Instrumente),
- Astronomieanwendungen mit Kleinsatelliten in erdnahen Orbits; Beobachtungsobjekte: Sterne (Spektro-Polarimetrie, Photometrische Beobachtungen),



Suche nach Exoplaneten (evtl. Charakterisierung), Beobachtungen im UV und MeV Bereich

### **Heliophysik / Weltraumwetter**

- Kleinsatellitenmissionen zur Beobachtung der Sonne und der inneren Heliosphäre aus verschiedenen Blickwinkeln, u.a. mit einer Langzeit-Mission zu L5, einem Solar-Polar Orbiter oder einem 360 Grad Cubesat Ring. Wichtig sind dabei solare EUV-Messungen, solare Magnetogrammmessungen inkl. der Kartierung solares Magnetfeld, 2D Spektro-Polarimetrie der Sonne und die Erforschung und Beobachtung der Plasmasphäre
- Messungen zur Charakterisierung der Strahlungsumgebung im interplanetaren Raum, u.a. durch Monitoring des Sonnenwindes, dessen Störungen durch Coronal Mass Ejections (CMEs), der Magnetfelder und energetischer Teilchen, sowie deren Energiespektren. Beobachtungsorte sind der S-E L1 oder L4. Zusätzlich wichtig ist das Monitoring der Strahlungsumgebung am Mars (Mars L1) zur Vorbereitung zukünftiger Missionen.
- Weltraumwetter-Messungen im Erdorbit, u.a. durch die Beobachtung der Teilchenumgebung und -Verteilung in der inneren Erdmagnetosphäre aus verschiedenen Orbithöhen, sowie des dauerhafte, hochqualitative Vektormessungen des Erdmagnetfelds aus dem erdnahen Weltraum und die Nutzung von (Klein-)Satellitenkonstellationen für Atmosphären-Profiling durch Radiookkultation

### **Planetare Wissenschaften**

- Small Body Research umfasst die Suche nach unentdeckten Near Earth Objects (NEOs) durch Infrarotkartierung, Messungen im thermischen Infrarot und im Radar Bereich von Asteroiden, spezifische Untersuchungen auf Ceres, die Beobachtung von Meteoriten beim Eintritt in die Erdatmosphäre, sowie der Wunsch nach Missionen, welche den Asteroiden Apophis bei dessen Vorbeiflug an der Erde 2029 umfassend untersuchen
- Atmosphärenforschung: Messungen der allgemeinen Zirkulation und der Photo- und Biochemie in der Mars- und Venusatmosphäre, u.a. Erforschung von atmosphärischem Chlorwasserstoff und Methan in der Marsatmosphäre, sowie Messung von ClO und anderer wichtiger Gase in der Venusatmosphäre
- Staubforschung, Untersuchung der Staubumgebung von Erde und Mond, sowie die Untersuchung der Interaktion von kosmischen, interplanetaren

und planetarem Staub allgemein, Untersuchung von Kleinkörpern als Ursprung von Mikrometeoroiden und planetarem Staub, sowie der Proben-transport von Partikeln und Staubteilchen zur Erde und die Exploration der Staubumgebung im äußeren Sonnensystem

- Exo-Astrobiologie: Dieses Themenfeld umfasst eine spezifische Life-Detection Mission zum Mars, die Untersuchung von Gysiren und Abgasfahnen von Eismonden, sowie die Suche nach Leben auf Exoplaneten
- Planetary Surfaces umfasst besonders die Erforschung der Venusbeben, u.a. durch atmosphärische Messungen

### **Technologieentwicklung:**

- Kleinsatellitenschwarmtechnologie: umfasst die Entwicklung von Technologien für Kleinsatellitenschwärme, u.a. zur Missionsunterstützung durch Aufbau von Navigationsnetzwerken, Vermessung astrophysikalischen und geophysikalischen Feldern, u.a. Satellitengeodäsie, und zur Fernerkundung
- Antriebe: Entwicklung einer Mission mit Sonnensegelantrieb, „grüne“/nicht-toxische chemische Antriebe für kleine Plattformen (insbesondere zur Mondexploration)
- Kommunikation: umfasst die Nutzung von Kleinsatelliten als Relaisstation für Missionen zu Gasriesen und zum Aufbau eines optisches Kommunikationsnetzwerk
- Sonstige Technologien: Hohe Autonomie im Betrieb und autonome Exploration einer unbekanntem Umgebung, Instrumentenentwicklung (u.a. miniaturisierte Laser Altimeter und miniaturisierte Sensoren auf Basis von Quantentechnologie)

Anhand der Themenfeldergewichtung konnten auf Basis der extrahierten Themenvorschläge insgesamt 10 Missionsideen formuliert werden, die Verteilung zwischen den Fachgruppen orientiert sich dabei an der Gesamtverteilung aller Themenvorschläge, wie sie in BILD 11 dargestellt ist.

Verteilung der Themenvorschläge nach Fachgruppen

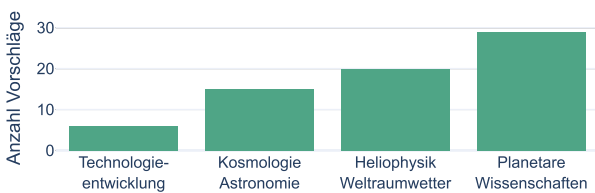


BILD 11: Abbildung 11: Anzahl und Verteilung der untersuchten Themenvorschläge aufgeschlüsselt nach Fachgruppen.

### 3.3. Vorstellung der Missionsideen

Anhand der in den Themenfeldern zusammenfassenden Themenvorschläge wurden aus den relevantesten Themenfeldern verschiedene Missionsideen formuliert und werden nachfolgend kurz dargestellt.

#### Beobachtungsmission im MeV Bereich

CubeSat-Astronomie Mission bei dem Beobachtungen im Bereich zwischen 200 keV bis 50 MeV aus dem LEO durchgeführt werden sollen. Der MeV-Bereich wurde oft als Beobachtungslücke genannt. Für diese Mission existiert bereits ein Konzept [18], welches auch im Rahmen der Umfrage genannt wurde und Nutzerwünsche aus dem Bereich Kosmologie/Astronomie abdeckt.

#### Beobachtungsmission im UV Spektrum

Diese Missionsidee umfasst eine weitere genannte Beobachtungslücke in der Astronomie. Der Bereich der UV-Astronomie lag in den vergangenen Jahren nicht im Schwerpunkt der großen Astronomiemissionen und daher könnte auch hier eine Kleinsatellitenmission einen signifikanten Beitrag leisten, trotz der limitierten Ressourcen. Ein Beispiel hierfür ist die Mission SPARCS [19]. Ein weiterer Aspekt dieser Idee ist die Nutzung einer Satellitenformation zur Vergrößerung der Detektorfläche, da dies im Rahmen der Technologieerprobung potenziell den Weg für die Entwicklung von Synthetic Aperture Teleskopen auf Basis von CubeSats eröffnen könnte [20].

#### L1 Space Weather Mission

Im Bereich Heliophysik und Weltraumwetter sind besonders Missionen zu den Lagrange Punkten hervorgehoben wurden. Eine Mission würde dabei neben dem wissenschaftlichen Mehrwert auch eine wichtige Technologiedemonstration darstellen. Aufgrund der Erreichbarkeit und der Position ist hierbei der L1 Punkt die ideale Wahl, besonders im Hinblick

auf zukünftige Missionen u.a. mit Konstellationen. Potentielle Messungen sind hierbei: direkte Sonnenbeobachtungen in verschiedenen Wellenlängen, Untersuchung der Interaktion zwischen Coronal Mass Ejections (CME) Ereignissen und dem Sonnenwind, sowie die Vermessung solarer Magnetfelder. Ein Beispiel hierfür war die CuSP Mission, welche allerdings einen Heliozentrischen Orbit erreichen sollte und aufgrund von einem Abbruch des Funkkontakts während der initialen Betriebsphase als Fehlschlag eingestuft werden muss [13].

#### Strahlungsgürtel Mission

Weitere Wünsche im Bereich Heliophysik und Weltraumwetter umfassen die Messung von hochenergetischen Teilchen in der erdnahen Umgebung durch eine Satellitenkonstellation um deren Dynamiken zu untersuchen. Hierfür sollte eine Satellitenkonstellation entwickelt werden, welche entweder Messungen im Bereich der Strahlungsgürtel oder der oberen Magnetosphäre durchführt. Durch die erhöhten Strahlungsdosen innerhalb der Strahlungsgürtel wird eine besondere Herausforderung an die Auslegung der Bordelektronik gestellt.

#### Solar Sail Sun Polar Orbiter Mission

Neben Missionen zu den Lagrange Punkten wurden Missionen zur Sonnenbeobachtung aus verschiedenen Blickwinkeln, besonders aus Polaren Orbits, gewünscht. Dies ist mit konventionellen Antriebssystemen im CubeSat Bereich nicht realisierbar, jedoch gibt es Untersuchungen zu Sonnensegelantrieben, welche polare Sonnenorbits erreichen würden [21]. Dabei könnten natürlich nur sehr limitierte Messungen durchgeführt werden, welche jedoch auf andere Weise bisher nicht zu erzeugen sind. Diese Missionsidee bildet somit auch eine Kombination aus einer Vielzahl an Technologieerprobungen und einer wissenschaftlicher Mission und weist ein besonders hohes Missionsrisiko, durch den Einsatz eines Sonnensegels, allerdings auch einen aber auch sehr hohen wissenschaftlichen und technologischen Mehrwert auf. Ein aktuelles Beispiele für Kleinsatellitenmissionen mit einem Sonnensegelantrieb ist die Mission NEA Scout (2022), welche jedoch nach mehreren erfolglosen Kontaktversuchen für gescheitert erklärt wurde [22].

#### Apophis Mission

Der im Bereich der planetaren Wissenschaften am häufigsten genannte Anwendungsfall ist die Untersu-

chung von Small Solar System Bodies. Eine sehr umfangreiche Untersuchung des Asteroiden (99942) Apophis, welcher 2029 an der Erde vorbeifliegt wurde dabei aufgrund des hohen wissenschaftlichen Mehrwerts mit vergleichbar niedrigem Missionsaufwand mehrfach explizit gewünscht. Die Kleinsatellitenmission sollte besonders den inneren Aufbau des Asteroiden und Abstrahlungen im thermischen Infrarot untersuchen. Die Missionsidee könnte auch von mehreren kooperierenden Sonden durchgeführt werden, eine Herausforderung sind hierbei die hohen Delta-V Anforderungen. Ein Beispiel für eine Kleinsatellitenmission in diesem Bereich ist die von der European Space Agency (ESA) geplante Mission SATIS [23].

### **Venus Atmosphären Mission**

Diese Mission hat einen besonderen Schwerpunkt auf spezifische Atmosphärenuntersuchung zur Messung von seismischen Aktivitäten auf der Venus. Diese wurden mehrfach im Rahmen der Befragung gewünscht und auf ein vorhandenes Missionskonzept (VAMOS [24]) hingewiesen. Durch geplante Missionen in den kommenden Jahren bestehen potentielle Rideshareoptionen, weiterhin ist es möglich, diese Mission mit weiteren, gewünschten Atmosphärenmessungen zu kombinieren.

### **Ceres Study**

Im Rahmen dieser Mission können wissenschaftliche Erkenntnisse über den Zwergplaneten und seine Umgebung gewonnen werden, besonders zu dem potentiell noch andauernden kryovulkanischen Aktivitäten auf Ceres, welche aus den Daten der DAWN Mission vermutet wurde. Die Untersuchung von Plumes könnte außerdem ein wichtiger Technologietest für kommende Missionen zur Untersuchung der Plumes auf Eismonden darstellen, welche in der Befragung gewünscht wurden. Insgesamt ist dieses Missionskonzept jedoch sehr ambitioniert hinsichtlich der Limitierungen von Kleinsatelliten und des Budgets. Weiterhin wird eine Rideshare oder Piggyback Mission benötigt, jedoch ist in den kommenden Jahren keine solche Mission geplant, wurde aber von der *Planetary Science and Astrobiology Decadal Survey 2023-2032* als eine von 8 *New Frontiers* Missionen vorgeschlagen [25].

### **Staub und Exosphärencharakterisierung Mond mit elektrischem Antrieb**

Diese Missionsidee basiert auf einer Kombination aus Technologiedemonstration und wissenschaftlicher Mission. Durch den Einsatz eines leistungsfähigen Antriebssystem könnte ein flexiblerer Zugang zum CL/IP demonstriert werden, eine Schlüsseltechnologie für zukünftige Explorationsmissionen außerhalb des Erdborbits. Gleichzeitig können Nutzerwünsche im Bereich planetarer Wissenschaften abgedeckt werden, welche die Staubumgebungen und Exosphäre des Mondes genauer charakterisiert genannt haben. Besonders vor dem Hintergrund der kommenden bemannten Missionen stellt eine weitere Erforschung der Staubumgebungen ein zentrales Thema dar [26].

### **Exoplanet Detection Mission**

Dieses Querschnittsthema zeigt die breiten Einsatzmöglichkeiten in der extr. Forschung durch Kleinsatelliten. Obwohl diese Mission nicht mit den großen Teleskopmissionen hinsichtlich der Auflösung vergleichbar ist, ist durch die dauerhafte Langzeitbeobachtung eines oder weniger Objekts ein signifikanter wissenschaftlicher Beitrag für die Exoplanetenforschung zu erwarten. Durch die geringen Missionskosten werden Langzeitbeobachtungen von Sternsystemen möglich, um tiefgreifende Erkenntnisse über die Exoplanetensystem zu erhalten. Ein Beispiel für eine erfolgreiche CubeSat Mission zur Exoplanetendetektion ist die Mission ASTERIA (2019) [6].

## **4. ZUSAMMENFASSUNG & AUSBLICK**

Anhand der durchgeführten Befragung zur Erfassung allgemeiner Forschungstrends und Wünsche in der Extraterrestrik in Deutschland konnte gezeigt werden, dass Kleinsatelliten grundsätzlich einen relevanten Beitrag zur Beantwortung aktueller Fragestellungen in der Extraterrestrik leisten können.

Insgesamt konnte eine sehr große Bandbreite unterschiedlicher Forschungsgebiete und Fragen in der Extraterrestrik in Deutschland identifiziert werden, welche sich nicht durch einige wenige Missionen abdecken lassen, jedoch konnten einige Schwerpunktbereiche identifiziert werden. Wichtig ist zu beachten, dass Kleinsatellitenmissionen insgesamt in ihrer Leistungsfähigkeit sehr limitiert sind und daher eine sorgfältige Auswahl und Begrenzung des Einsatzzwecks erfordern. Der Einsatz von Kleinsatelliten in der Extraterrestrik, besonders im CL/IP Raum ist bisher nur im Rahmen einiger weniger Missionen erfolgt.

Die meisten erfassten Wünsche und Ideen konzentrieren sich auf das Gebiet der Planetaren Wissenschaften. Im Bereich der Heliophysik und des Weltraumwetters sind Beobachtungsnetzwerke und verteilte Messungen von großer Bedeutung. In der Kosmologie und Astronomie gab es unter den Umfrageteilnehmern einige Skepsis über den tatsächlichen wissenschaftlichen Beitrag von Kleinsatellitenmissionen aufgrund ihrer begrenzten Leistungsfähigkeit, aber auch sehr optimistische Meinungen über Veränderung durch die Möglichkeiten von kostengünstigen satellitenbasierten Teleskopen und verteilten Beobachtungsmissionen. Im Bereich der Technologieentwicklung wurden besonders zu dem Antriebs- sowie Kommunikationssystem konkrete Wünsche genannt.

Im weiteren Verlauf der Untersuchung werden die vorgestellten Missionsideen weiter konkretisiert und nach ihrem wissenschaftlichen Bedarf und technologischen Realisierbarkeit bewertet. Zur Bewertung der technologischen Realisierbarkeit werden hierfür die Erkenntnisse aus der Untersuchung der Kleinsatellitentechnik und der Umgebungsbedingungen für CL/ IP Missionen genutzt.

#### Kontaktadresse:

[jonathan.maennel@uni-wuerzburg.de](mailto:jonathan.maennel@uni-wuerzburg.de)

#### Literatur

- [1] H. J. Kramer, "Cubesat concept - deployer standards for an enlarged cubesat family," 2012. [Online]. Available: <https://www.eoportal.org/other-space-activities/cubesat-deployer-standards> (Accessed: 2023-03-27)
- [2] E. Kulu, "Nanosatellite Launch Forecasts - Track Record and Latest Prediction," *Proc. Small Satell. Conference, Swifty Session 1, Ssc22-S1-04*, 2022. [Online]. Available: <https://digitalcommons.usu.edu/smallsat/2022/all2022/7>
- [3] "NewSpace Initiative - BDI," 2023. [Online]. Available: <https://bdi.eu/themenfelder/sicherheit/newspace-initiative> (Accessed 7. Sep. 2023)
- [4] C. Cappelletti, S. Battistini, and B. K. Malphrus, *Cubesat Handbook*, Elsevier, Academic Press, 2020.
- [5] T. Neumann, E. Borschinsky, H. Kayal, J. Männel, and C. Riegler, "Kleinsatellitentechnologien zur beantwortung wissenschaftlicher fragen in der extraterrestrik," in *Deutscher Luft- Und Raumfahrtkongress 2023*, Stuttgart, Germany, 2023.
- [6] L. Fesq, P. Beauchamp, et al., "Results from the asteria cubesat extended mission experiments," in *2021 IEEE Aerosp. Conf. (50100)*, 2021, pp. 1–11, doi: 10.1109/AERO50100.2021.9438402.
- [7] J. Řípa, A. Pál, et al., "Early results from grbalpha and vzlsat-2," Jul. 15, 2022, no. Slovakia.
- [8] F. Fiore, A. Guzman, R. Campana, and Y. Evangelista, "Hermes-pathfinder," Oct. 25, 2022.
- [9] U. Tübingen, "H2020 hermes-sp – high energy rapid modular ensemble of satellites - scientific pathfinder," 2023. [Online]. Available: <https://fit.uni-tuebingen.de/Project/Details?id=6248> ([Online; accessed 6. Apr. 2023])
- [10] A. T. Johnson, M. Shumko, et al., "The FIREBIRD-II CubeSat mission: focused investigations of relativistic electron burst intensity, range, and dynamics," *Rev. Scientific Instruments*, vol. 91, no. 3, p. 34503, Mar. 2020, doi: 10.1063/1.5137905.
- [11] A. Lehtolainen, J. Huovelin, et al., "SUNSTORM 1/X-ray Flux Monitor for CubeSats (XFM-CS): Instrument characterization and first results," *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect.*, vol. 1035, p. 166865, Jul. 2022, doi: 10.1016/j.nima.2022.166865.
- [12] D. George, "The cusp interplanetary cubesat mission," in *13th Annu. Cubesat Developers Workshop*, 2016.
- [13] A. Interrante, D. Hill, A. Silimon-Hill, M. Hatfield, and S. Frazier, "Artemis I Payload CuSP CubeSat Mission Update – The Sun Spot," 2022. [Online]. Available: <https://blogs.nasa.gov/sunspot/2022/12/08/artemis-i-payload-cusp-cubesat-mission-update> (Accessed: 2023-01-25)
- [14] H. E. Spence, A. Caspi, et al., "Achievements and Lessons Learned From Successful Small Satellite Missions for Space Weather-Oriented Research," *Space Weather*, vol. 20, no. 7, Jul. 2022, doi: 10.1029/2021SW003031.

- [15] <https://www.jpl.nasa.gov/>, “Mars Cube One in Detail,” <https://www.jpl.nasa.gov/>, 2023. [Online]. Available: <https://www.jpl.nasa.gov/images/pia22548-mars-cube-one-in-detail> (Online; accessed 8. Sep. 2023)
- [16] C. Liebe, “Survey response rate: durchschnittswerte und praxisbeispiele,” paulus-result. <https://paulusresult.de/survey-response-rate-durchschnittswerte-beispiele/> (accessed: Mar. 17, 2023).
- [17] L. J. Tacconi, C. S. Arridge, et al., “Final recommendations from the voyage 2050 senior committee,” May 2021.
- [18] G. Lucchetta, M. Ackermann, D. Berge, and R. Bifmmode \ddot{u}lfi hler, “Introducing the MeVCube concept: a CubeSat for MeV observations,” *Arxiv*, Apr. 2022, doi: 10.1088/1475-7516/2022/08/013.
- [19] P. A. Scowen, E. L. Shkolnik, et al., *Monitoring the high-energy radiation environment of exoplanets around low-mass stars with SPARCS (Star-Planet Activity Research CubeSat)*, vol. 10699, 2018.
- [20] R. Suzumoto, S. Ikari, N. Miyamura, and S. Nakasuka, “Experimental Study for u-class Control of Relative Position and Attitude for Synthetic Aperture Telescope Using Formation Flying Micro-satellites,” *IFAC-Papersonline*, vol. 53, no. 2, pp. 5701–5708, Jan. 2020, doi: 10.1016/j.ifacol.2020.12.1597.
- [21] S. G. Turyshev, D. Garber, et al., “Science opportunities with solar sailing smallsats,” *Arxiv*, Mar. 2023, doi: 10.48550/arXiv.2303.14917.
- [22] L. Mohon, “NEA Scout Status Update,” 2022. [Online]. Available: <https://www.nasa.gov/centers/marshall/news/2022/nea-scout-status-update.html> (Accessed: 12.01.2023)
- [23] R. Walker, “Overview of ESA Lunar and Interplanetary CubeSat Missions,” in *Inter-Planetary Small Satell. Conf. 2023*, California Institute of Technology, May 2023. [Online]. Available: <http://www.intersmallsatconference.com/past/2023/>
- [24] B. M. Sutin, J. A. Cutts, et al., “VAMOS: a SmallSat mission concept for remote sensing of Venusian seismic activity from orbit,” *Spie*, Jul. 2018. [Online]. Available: <https://elib.dlr.de/121584>
- [25] National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine, *Origins, Worlds, and Life*, National Academies Press, Washington DC, 2022. [Online]. Available: <https://nap.nationalacademies.org/catalog/26522/origins-worlds-and-life-a-decadal-strategy-for-planetary-science>
- [26] A. V. Zakharov, L. M. Zelenyi, and S. I. Popel', “Lunar dust: properties and potential hazards,” *Sol. System Res.*, vol. 54, no. 6, pp. 455–476, Nov. 2020, doi: 10.1134/s0038094620060076.

Anhang

Übersicht zu Forschungstrends in der Extraterrestrik

Genannte wichtige Messungen und Untersuchungswünsche in der extraterrestrischen Forschung in den kommenden Jahren



BILD 12: Abbildung 12: Darstellung aller genannten wichtigen Messungen und Untersuchungen als Teil der Analyse zu kommenden Forschungstrends in der Extraterrestrik.

**Astronomie**

• **Beobachtungslücke**

- FUV bis 92nm
- MeV-GeV

• **Instrumentenentwicklung**

- Wide-Field-Monitor
- MeV Observatorium
- High-res. X-Ray Detektor und Optik
- Gravitationswellenobservatorium

• **Messungen**

- Zustandsgleichung Neutronen Sterne(extreme Matter)
- Vermessung 21cm Linie (kosmischeReionisation)
- Spectral-timing Polarimetry Mission
- Spatial hochauflösende spektr.Beobachtungen von Galaxiezentren
- Sensitivere Polarimetriemissionen
- präz. Vermessung großräumigerStrukturen
- Distributed Astronomy
- B-Moden auf großen Skalen(Hintergrundstrahlung)
- Beobachtungen Early Universe

- Beobachtung früher Sterne und Galaxien
- IceCube Gen-2 - DUNE/HyperKamiokande
- **Stellarstronomie**
  - Sternspektroskopie, UV
  - Massive stellar spectroscopy
  - kont. Radialgeschwindigkeitmessungen (> 4 Jahre)
  - kont. Photometrische Beobachtung (> 4 Jahre)
  - Hochaufgelöste, Wide-Field-Beobachtung (bis 25 Mpc)
- **Tidal Disruption Events**
  - Monitoring Monate-Jahre, UV-MeV
  - Kontinuierliche Beobachtung 1 Tag, UV-MeV

#### Exoplaneten

- **Charakterisierung**
  - Spektroskopie durch Transitmessungen
  - Spektrophotometrie, NearUV-NearIR
- **Detektion**
  - Suche nach Exoplaneten
  - Nachfolgend Charakterisierung

#### Heliophysik

- **Instrumentierung**
  - Instrumentierung für Beob. Magnhydrodynamische Prozesse
- **Messungen**
  - Erweiterten Spektralbereich hin zu vielen Linien
  - Hochaufgelöste Beobachtungen
  - Sonnen-Polare Messungen
  - Spektroskopie im VUV und X-Ray Spektrum
  - Spektrale Irradianz, besonders im UV
  - Langzeit-Präzisionsmessung der Solarkonstanten
  - kont. Full-Disk Sonnenbeobachtung
  - Magnetfeld der Sonnenoberfläche
  - Plasmaeigenschaften in Photosphäre und Chromosphäre durch Spektro-Polarimetrie
  - Sonnenatmosphärenschichten, Hochaufgelöst und hohe Kadenz, EUV bis Infrarot
  - Spektro-Polarimetrie gesamte Sonne
  - Magnetfeldmessungen in der Korona
  - Ausdehnung Wellenlängenbereich zu UV
- **Missionen**
  - Sonnenbeobachtung von L1; L4; L5
  - Nur Nennung wichtiger Missionen
  - Nachfolgemission SDO
  - Sonnenwind und interpl. CMEs von L5
- **Observatorien**
  - Bodengebundenes Netzwerk
  - größere Sonnentelkope
  - Bau European Solar Telescope
- **Simulation**
  - Sonnenatmosphäre, MHD-Prozesse

#### Planetare Wissenschaften

- **Asteroiden/Kometen**

- Bestimmung Objektkenngößen
- Suche nach NEOs
- Thermische Infrarotmessungen
- Radarmessungen
- **Mars**
  - FIR Heterodynspektroskopie
  - hochaufgelöste Oberflächenaufnahmen
- **Messungen**
  - FIR Heterodynspektroskopie (Windmessungen)
  - Quantengravimetrie Erdnahes und Erdfernes Feld
  - Entstehung und Aufbau Sonnensystemkörper
  - Astrobiologie, Entstehung/Entwicklung von Planeten
  - UAP Detektion/Beobachtung
- **Meteore**
  - Beobachtungsnetzwerke
  - Künstlicher Wiedereintritt Mission
- **Missionen**
  - Ceres Landermission
  - Eismonde Landermission
- **Mond**
  - Detektion Wasservorkommen
  - Exosphärenmessung
  - Mondstaub
  - Oberflächenuntersuchung
- **Staubforschung**
  - äußere Planeten
  - Entwicklung Observatorium
  - Erde-Mond, Staubumgebung
  - Kleinkörper als Quelle für interpl. Staub
  - Messung der Zusammensetzung und Probenrückführung
  - Messung Teilchendichte und Verteilung
  - Nachweis Staub äußeres Sonnensystem bei 1AE
  - Trajektorienbestimmung
  - Wechselwirkung mit Heliosphäre
  - Gefahrenquellen bemannte Raumfahrt
- **Suche nach Leben**
  - Life-Detection Mission
  - Mars, Eismonde
  - Exoplaneten
- **Venus**
  - atm. Photometrische, Langzeitmessungen
  - Atmosphärenbeobachtung
  - Atmosphärenzusammensetzung
  - FIR Heterodynspektroskopie

#### Space Weather

- **Beobachtungssysteme**
  - Full-Sky Neutron Monitoring
  - Entwicklung und Erweiterung der Frühwarnsysteme
  - Regionales Weltraumwetterisiko
- **Messungen**

- 3D-Struktur der Heliosphäre
- Wavemeasurements im Strahlungsgürtel
- Strahlungsmessung, Verteilung Strahlungsmessung (mehrere Erdradien)
- Elektronendichte- und TEC in Plasmasphäre
- Hochenergie-Partikelstrahlung, L1 (Mars-Erde)
- Hochenergie-Partikelstrahlung, L4 (Sonne-Erde)
- Strahlungsmessungen anheliosphärische Grenzschicht
- Vektorfeldmessungen Erdmagnetfeld
- Hochenergie-Partikelstrahlung, L1 (Sonne-Erde)
- **Simulation**
  - Weiterentwicklung Weltraumwettermodelle
- **Technologiedemonstration**
  - **Messungen**
    - ISRU Betonmessungen auf Mondoberfläche
    - Genaueres Lunar Laser Ranging
  - **Missionen**
    - Treibstoffgewinnung- und Nutzung auf Mond
    - Sample-Return, Mars und Asteroiden
    - Navigationsschwarm zur Mars Exploration
    - Lander/Rover Demonstration
    - Kostengünstige Demonstrationsmissionen
    - Interferometrie und Bell Tests (Quantenmechanik)
    - Entwicklung Pathfinder Missionen
    - Entwicklung European Rocket Program (Höhenforschungsraketen)

## Technologieentwicklung

- **Antriebssystem**
  - Oxidationsbeständige Materialien
  - Katalysator für H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>
- **Instrumentenentwicklung**
  - Atominterferometrie als Beschleunigungssensoren
  - Einsatz Quantentechnologie
  - Massive-Multi-object spectroscopy
  - Miniaturisierung Laseraltimeter
  - Optische Uhr
  - Allg. Instrumentenentwicklung
  - Optische Interferometrie
  - Miniaturisierung u. Robustheit von Payload verbessern
  - Atominterferometrie und opt. Uhren
- **KI-Entwicklung**
  - Autonome KI für Exploration
- **Messungen**
  - 3D-Druck, ISS-Experimente
  - GNSS Signalstörungen + Mitigationmethoden
  - Relativabstände in Cubesatschwärmen
- **Optische Kommunikation**
  - Entwicklung opt. Systemtechnik
  - Data Relay Netzwerke