



Astrone – Agile autonome Forschungs- plattform mit hoher Oberflächenmobilität

DLR Verbundvorhaben		Projekt Start:	01.01.2019
Verbund-Koordinator	Airbus Defence and Space GmbH	Projekt Dauer:	36 Monate

Dokument Titel	Schlussbericht
AP Leitung	Prof. Dr.-Ing. Walter Fichter
Frist Abgabedatum	30.06.2022
Berichtsdatum	30.06.2022
Berichtsversion	V1
Autoren	Fabian Schimpf, Jan Olucak
Beitragende	

Das Astrone Konsortium besteht aus:

Airbus Defence and Space GmbH	Airbus
Astos Solutions GmbH	Astos
Institut für Automatisierungstechnik der Technischen Universität Dresden	IfA
Institut für Flugmechanik und Flugregelung der Universität Stuttgart	iFR

AIRBUS

Astos
Solutions

IfA
LS-AT

iFR



Änderungsprotokoll

Version	Datum	Kapitel, Seite	Beschreibung der Änderungen
V1.0	30.06.2022	Alle	Version 1.0

Akronyme

PIL	Processor-in-the-Loop (engl.)
MIL	Model-in-the-Loop (engl.)
GNC	Guidance Navigation and Control (engl.)
SSSB	Small Solar System Body (engl.)
HIL	Hardware-in-the-Loop (engl.)
FPGA	Field Programmable Gate Array (engl.)



Inhaltsverzeichnis

1	Aufgabenstellung	5
2	Voraussetzungen	8
2.1	Institut für Flugmechanik & Flugregelung (iFR), Universität Stuttgart	8
2.1.1	Relevante Methoden	8
2.1.2	Verfügbare Technologien	9
2.2	Institut für Automatisierungstechnik (IfA), Technische Universität Dresden	9
2.3	Airbus Defence and Space	9
2.4	Astos Solutions GmbH	9
3	Planung und Ablauf des Vorhabens	10
4	Wissenschaftlicher und technischer Stand	12
4.1	Allgemein	12
4.2	Wissenschaftliche und technische Basis für das Vorhaben bei Verbundpartnern	13
4.2.1	Institut für Flugmechanik & Flugregelung (iFR)	13
4.2.2	Institut für Automatisierungstechnik (IfA)	14
4.2.3	Airbus Defence and Space GmbH	14
4.2.4	Astos Solutions GmbH	14
4.2.5	Verwendete Fachliteratur, Informations- und Dokumentationsdienste	14
5	Zusammenarbeit mit anderen Stellen	15
5.1	Zusammenarbeit der Verbundpartner	15
5.2	Zusammenarbeit mit Dritten	16
6	Verwendung der Zuwendung und erzielttes Ergebnis	17
6.1	Konzeptentwicklung der Bewegungsplanung und Lenkung	17
6.2	Algorithmenentwicklung für die autonome Bewegungsplanung	19
6.2.1	Pfadsuche	19
6.2.2	Trajektorienplanung und Tracking	20
6.2.3	Landeplatzerkennung	21
6.3	PIL Verifikation der Bewegungsplanung und Lenkung	22
6.4	Bearbeitungsstand nach Arbeitspaketen: Zusammenfassung	24
7	Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises	27
8	Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit	28
9	Voraussichtliches Nutzens und Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans	29
9.1	Schutzrechte	29
9.2	Veröffentlichungen	29
9.3	Wirtschaftliche Erfolgsaussichten	29
9.4	Wissenschaftliche und technische Erfolgsaussichten	29
9.5	Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit	30



10 Während der Durchführung des Vorhabens dem ZE bekannt gewordenen Fortschritts auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen.....	30
11 Erfolgte oder geplanten Veröffentlichungen des Ergebnisses.....	31
12 Quellen.....	31

1 Aufgabenstellung

Im Folgenden werden die Problemstellung und die daraus resultierende Aufgabenstellung beschrieben. Der folgende Textabschnitt ist aus der Vorhabenbeschreibung [1] entnommen:

„Im Verlauf der letzten Dekade hat die Erforschung von kleinen Körpern im Sonnensystem, wie Kometen und Asteroiden, durch Raumsonden immer größere Aufmerksamkeit erfahren (ESA's Rosetta & Philae, JAXA's Hayabusa-1/2, NASA's OSIRIS-REx).

Aus wissenschaftlicher Sicht beherbergen diese kleinen Objekte, Zeitkapseln gleich, detailliertes Wissen über die Ursprünge und die Entwicklung des Sonnensystems bzw. des Lebens. Ferner legen jüngste Beobachtungen die Existenz von reichhaltigen Bodenschätzen auf Asteroiden nahe, die zum Bau und zum Betanken von Raumfahrzeugen, oder aber in ökonomischer Art und Weise zur Gewinnung von seltenen Ressourcen genutzt werden könnten.

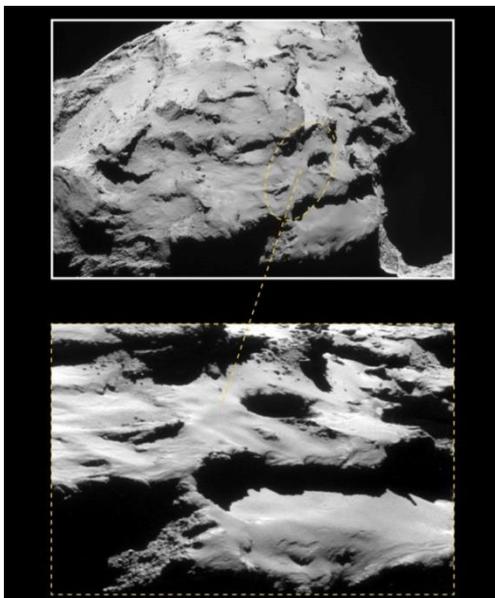


Abbildung 1: Oberfläche comet 67P/Churyumov- Gerasimenko.
 Credit: ESA/ROSETTA/NAVCAM

Die Oberflächen der äußerst gravitationsschwachen Kometen und Asteroiden sind extrem steinig und unregelmäßig so dass konventionelle Ansätze der Fortbewegung unsicher und ineffektiv werden: Räder verlieren Bodenhaftung und damit Traktion, Beine benötigen Ankerpunkte und hüpfende Verfahren sind sehr unpräzise in der Navigation bzw. sind durch eingeschränkte Reichweite limitiert. Abbildung 1 und Abbildung 2 zeigen charakteristische Ausschnitte der Oberfläche von Komet 67P/Churyumov-Gerasimenko.

Unsere hier vorgeschlagene Architektur basiert auf einem neuartigen Konzept eines schwebenden Raumfahrzeugs, welches als mobile Oberflächenplattform mit Fähigkeiten größtmöglicher Oberflächen-Erreichbarkeit und Flexibilität aufwartet. Das Fahrzeug ist in der Lage mittels Höhe- und Lage-kontrollierten Flugphasen jeden Punkt auf der Oberfläche zu erreichen, wobei die präzise und nahezu unlimitierte Reichweite durch ein elektrisches Mikro-Newton Reaktions-Kontroll-System (siehe Abbildung 3 und Abbildung 4) gewährleistet wird.

Dieses Konzept vermeidet die oben erwähnten Mobilitätseinschränkungen und bietet eine innovative Lösung für eine sichere Bewegung nahe der Oberfläche mit signifikanter Steigerung der wissenschaftlichen Ausbeute. Dies ermöglicht u.a. Forschungsmissionen zu kleinen Körpern im Sonnensystem bei denen in-situ

Experimente an jedem charakteristischem Ort der Oberfläche ermöglicht werden.

Ein wesentlicher technologischer Baustein für alle Explorationsmissionen ist die Fähigkeit zum autonomen Betrieb eines Fahrzeugs. Hierzu gehören insbesondere die **Aufgaben** der Verfahren zur Bahn- bzw. Trajektorien-Planung in unbekannt oder unsicher bekannte (im Sinne der Genauigkeit) Umgebung.

Diese Verfahren beinhalten im Grunde alle funktionalen Elemente eines Guidance, Navigation and Control (GNC) Systems, traditionelle Funktionsbausteine wie z.B. Lageregelung und rudimentäre Navigation sind hierbei jedoch unkritisch. Darum stehen Aufgaben der Bewegungsplanung im Mittelpunkt. Solche Verfahren existieren bereits in vielen Varianten für terrestrische Anwendungen, die meisten sind jedoch für Raumfahrtanwendungen aufgrund der begrenzten Rechenleistung, die an Bord eines Raumfahrzeuges zur Verfügung steht, nicht geeignet.

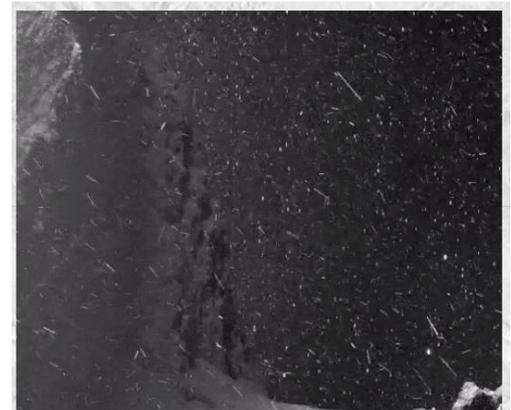


Abbildung 2: Oberfläche comet, Philae Bilder.
 Credit: ESA/landru79

Das **übergeordnete Ziel** dieser Zuwendung ist die Maximierung der Exploration auf einem kleinen Körper unseres Sonnensystems. Aufgrund der geringen Masse dieser Körper ist die Gravitation dort derart schwach, dass bei bodengebundenen Fahrzeugen bereits kleinste Störungen zum unbeabsichtigten Traktionsverlust und unkontrolliertem Abheben bzw. im ungünstigsten Fall zum Missionsverlust führen können.

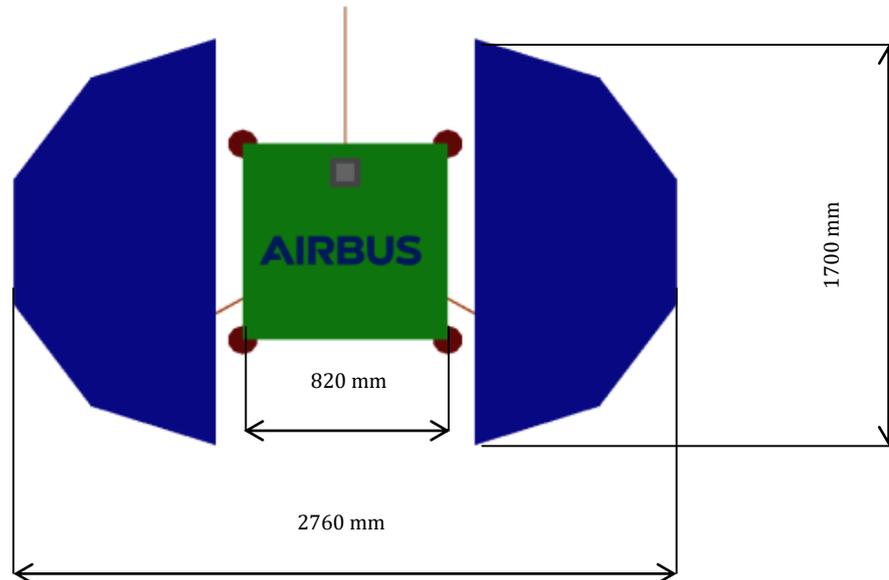


Abbildung 3: Konzeptskizze des Astrone Systemdesigns

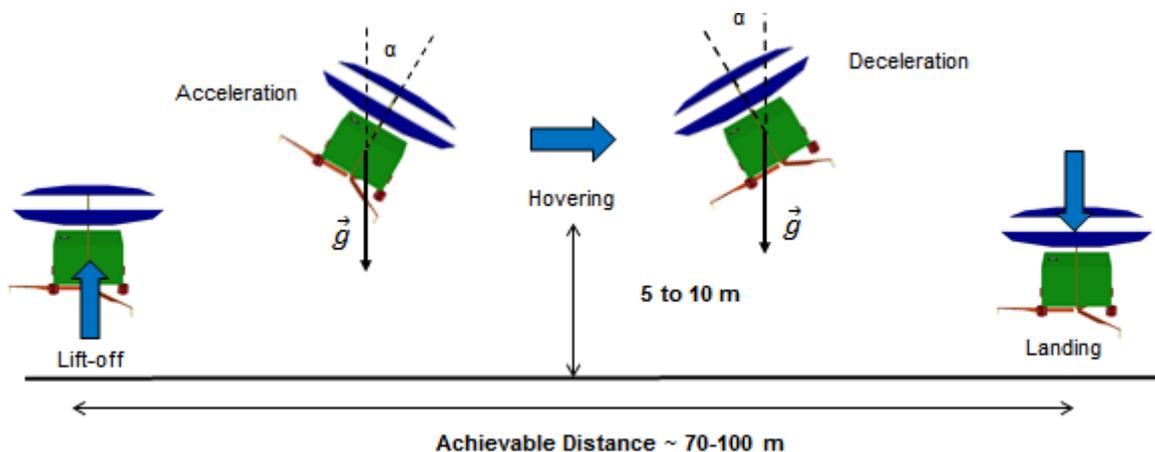


Abbildung 4: Prinzipdarstellung eines einzelnen Astrone Schwebemanövers

Ein auf Rädern bzw. auf Bodenkontakt beruhendes Verfahren ist daher ungeeignet. Geeignete Systemkonzepte für das Landefahrzeug müssen folglich die vollständige Kontrolle über alle Bewegungszustände und Missionsphasen hinweg gewährleisten. In Konsequenz hat dies folgende Eigenschaften hinsichtlich der Fortbewegungsart und Bewegungsplanung zur Folge:

- Die Gravitation ist extrem schwach und inhomogen. Das Verfahren muss diese Unsicherheit berücksichtigen und kontrollieren können.
- Die zur Verfügung stehende Energie ist somit ebenfalls unsicher. Darüber hinaus auch durch unterschiedliche Betriebsbedingungen des Energiemanagementsystems.
- Umgebungskarten stehen nur bruchstückhaft oder im Extremfall gar nicht zur Verfügung. Die Bewegungsplanung kann und darf daher nicht auf der Grundlage einer hochgenauen Datenbasis erfolgen.
- Es soll relativ zu einem Referenzpunkt („Bodenstation“ auf dem Himmelskörper) navigiert werden. Dabei muss stets eine sichere Notlandung beziehungsweise die Rückkehr zum Ausgangspunkt garantiert werden.



- Alle Algorithmen müssen auf einem Bordrechner implementierbar sein, der hinsichtlich entsprechender Raumfahrtanforderungen qualifiziert werden kann.
- Alle Bordalgorithmen müssen garantierte Rechenzeitgrenzen einhalten, um einen Absturz des Bordsystems an der Wurzel zu vermeiden.

Im Rahmen des vorangegangenen Fördervorhabens S3ARV, gefördert von der Raumfahrtagentur des DLR, wurden bereits Algorithmen entwickelt, die zum Teil die oben beschriebenen Forderungen erfüllen. Im Rahmen dieser Zuwendung wurden diese aufgegriffen und speziell auf die Randbedingungen eines Hover-Vehikels auf einem relativ kleinen Körper unseres Sonnensystems angepasst.

Die oben beschriebenen Forderungen sind in ähnlicher Weise auf andere Szenarien übertragbar. Hierzu gehören militärische wie vor allem auch humanitäre Szenarien in Katastrophengebieten oder zur flächendeckenden geografischen Beobachtung bzw. Vermessung / Kartierung von ökologisch relevanten und schwer zugänglichen Gebieten. Auch beim Einsatz von Drohnen im Bergbau finden solche Anforderungen Anwendung.“

Die im Verbundvorhaben Astrone umgesetzte Zuwendung hatte als Gesamtziel die Entwicklung von Verfahren zur Bahn- bzw. Trajektorien-Planung und Navigation in unbekannte oder unsicher bekannte Umgebung. Der nachfolgende Teil ist aus der Vorhabensbeschreibung entnommen [1]: „Dieses Verfahren beinhaltet im Grunde alle funktionalen Elemente eines GNC Systems, traditionelle Funktionsbausteine wie z.B. Positions- und Lageregelung sind hierbei jedoch unkritisch. Das Gesamtziel lässt sich herunterbrechen in vier Primärziele:

- **Entwicklung des Bewegungsplanungsverfahrens und Lenkung.** Es wurden Algorithmen zur Bewegungsplanung und autonomen Lenkung des Flugvehikels entwickelt und verifiziert. Die Aufgabe war hierbei, das Fluggerät so zu steuern, dass die Explorationsausbeute maximiert wird: Dabei wurden die speziellen Randbedingungen des hier vorliegenden Szenarios berücksichtigt. Diese sind: unsichere Umgebungskenntnis (Hindernisse), unsichere und variable Gravitation, limitierte Energie, garantierte Rückkehrfähigkeit.
- **Entwicklung des Navigationsverfahrens.** Es wurden Algorithmen zur Navigation entwickelt und verifiziert. Die Aufgabe war hierbei, dem Fluggerät die aktuellen Fahrzeugpose (6 DOF, Position und Lage) und einer aggregierten räumlichen Umgebungskarte zur Verfügung zu stellen. Die besonderen Herausforderungen bestanden in einer robusten Schätzung der Navigationslösung unter Einfluss von ungünstigen Beleuchtungsbedingungen bei gleichzeitig minimalem Hardware- und Softwareaufwand.
- **Echtzeitfähige Visualisierung und Rendering-Algorithmen.** Eine Kamera- und Lidarsimulation-Technik, die konfigurierbar und echtzeitfähig ist und gleichzeitig in der Lage ist, ein dynamisches Landeszenario unter Berücksichtigung einer nicht-idealen Optik, mit hochdetaillierten Oberflächenstrukturen und Interaktionen zwischen Triebwerksstrahlen und Oberfläche (z.B. aufgewirbelter Sand) darzustellen.
- **Verifizierung der Algorithmen.** Die oben genannten Algorithmen wurden auf einem Bordrechner verifiziert, der hinsichtlich entsprechender Raumfahrtanforderungen qualifiziert werden kann. Mittels zweier Testkampagnen auf dem MIL und PIL Teststand wurde die End-to-End Leistungsfähigkeit der entwickelten GNC Subsystem untersucht und bewertet.“



2 Voraussetzungen

Die Zuwendung wurde im Rahmen des Verbundvorhabens Astrone umgesetzt wodurch gegenseitige Abhängigkeiten und Voraussetzungen entstanden sind. Der von Airbus und Astos gemeinsam bereitgestellte Simulator Teststand war Voraussetzung für die G-N-C Algorithmenentwicklung und Verifikation, die vom iFR, IfA und Airbus durchgeführt wurde. Jeder Verbundpartner zeichnete sich für einen separaten Funktionsumfang am Simulator-Teststand bzw. an den entwickelten GNC Algorithmen verantwortlich: das iFR für die Bewegungsplanung und Lenkung, das IfA für die Navigation, Airbus für die übergeordneten GNC Algorithmen, die Lageregelung, den Simulator-Teststand und Astos für den Kamera- und LIDAR-simulator.

Darüber hinaus wurde das Vorhaben durch Einbeziehung von Experten aus verschiedenen Fachbereichen bei den jeweiligen Verbundpartnern unterstützt. Dies erlaubte eine sehr kosteneffektive Umsetzung des Vorhabens, auch aufgrund umfangreicher früherer Erfahrungen der Verbundpartner in ihrem jeweiligen Verantwortungsbereich.

Im Folgenden, werden die Voraussetzungen seitens des iFR detailliert aufgelistet.

2.1 Institut für Flugmechanik & Flugregelung (iFR), Universität Stuttgart

Das Institut für Flugmechanik und Flugregelung (iFR) der Universität Stuttgart wurde 1991 gegründet und wird seit April 2007 von Prof. Walter Fichter geleitet, der davor 17 Jahre lang in der Raumfahrtindustrie tätig war.

Die Forschungsaktivitäten am iFR gliedern sich in die folgenden Hauptbereiche:

- Helicopter Flight
- Intelligent Flight
- Unmanned Flight and Autonomy/Flight Robotics

Das iFR ist in allen Bereichen in Industrieprojekte involviert. Im Bereich Helicopter Flight gibt es Kooperationen mit EDM Aerotec oder Airbus Helicopters. Ähnliche Kooperationen gibt es auch mit MBDA, Diehl Defence und Volocopter.

2.1.1 Relevante Methoden

Das Institut für Flugmechanik und Flugregelung beschäftigt sich seit ca. 10 Jahren mit Verfahren zur Bewegungs- und Bahnplanung sowie der Lenkung für verschiedene Fluggeräte. Hieraus ergaben sich einige Entwicklungen, die als Vorarbeiten für den vorliegenden Antrag relevant sind.

Trajektorienplanung

Im Bereich der Trajektorienplanung kann das iFR auf zahlreiche Methoden zurückgreifen. Hierzu gehören optimierende Lenkverfahren, Modelprädiktive Regelung, welche im Vorgängerprojekt S3ARV mit Flugtests demonstriert wurde. Darüber hinaus wurde ein Planungsalgorithmus entwickelt, welche nahezu nur analytische Methode nutzt und somit sehr recheneffizient ist. Besagter Ansatz wurde in Flugtests auf einer Diamond DA42 demonstriert.

Landeplatzerkennung

Im Vorgängerprojekt S3ARV wurde bereits Ansätze für die autonome Landeplatzerkennung beruhend auf Digital Elevation Maps untersucht.

Lenkung

Im Bereich der Lenkung liegt ebenfalls einschlägige Erfahrung am iFR vor. Neben der Lenkung von Flächenflugzeugen, kann das iFR auch hier auf Vorwissen im Bereich der Lenkung von Multikoptern zurückgreifen.



2.1.2 Verfügbare Technologien

Seit 2007 wurden Forschungsarbeiten im Bereich autonomer unbemannter Fluggeräte durchgeführt. Aus diesen Vorarbeiten ergaben sich Entwicklungen und Technologien, die für dieses Vorhaben relevant sind.

Bordrechner für UAVs:

Im Laufe der Jahre wurden unterschiedliche Bordrechner am iFR entwickelt und betrieben. U.a. kamen FPGA basierte Bordrechner zum Einsatz. Darüber hinaus besitzt das iFR eine eigens entwickelte Toolchain, um Algorithmen auf Bordrechner zu exportieren.

HIL-Umgebung für UAVs

Für die Erprobung und das Testen von Algorithmen kann das iFR auf eine Testumgebung zurückgreifen, die das Hardware nahe testen ohne Flugversuch ermöglicht. Diese Testumgebung besitzt darüber hinaus umfangreiche Visualisierungstools.

2.2 Institut für Automatisierungstechnik (IfA), Technische Universität Dresden

Siehe Schlussbericht Institut für Automatisierungstechnik.

2.3 Airbus Defence and Space

Siehe Schlussbericht der Airbus Defence and Space GmbH.

2.4 Astos Solutions GmbH

Siehe Schlussbericht der Astos Solutions GmbH.



3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Für das Verbundvorhaben wurde ein gemeinsamer Arbeitsplan zwischen den Verbundpartnern und jeweiligen Zuwendungsempfängern vereinbart. Im Arbeitsplan wurden zwischen dem Kickoff und der Abschlusspräsentation zehn Fortschrittsreffen zwischen den Verbundpartnern und dem Zuwendungsgeber entsprechend nachstehender Tabelle geplant und durchgeführt. Aufgrund den Pandemiebedingungen wurden die meisten Projektmeilensteine per Telefon- oder Videokonferenz durchgeführt und die konkrete Terminierung dieser Besprechungen und Treffen wurde im Verlaufe des Vorhabens angepasst. Ferner wurden regelmäßige Arbeitsmeetings als Telefon- bzw. Videokonferenzen durchgeführt, im späteren Projektverlauf auf ca. zweiwöchiger Basis. Darüber hinaus wurden bei Bedarf zusätzliche Telefon- bzw. Videokonferenzen für technische Diskussionen zwischen den Partnern organisiert. Die Abschlusspräsentation konnte aus Gründen überlappender Verfügbarkeit zum Jahreswechsel von Teammitgliedern und DLR Ansprechpartnern erst am 4. Februar 2022 durchgeführt werden.

Zu den aufgelisteten Meilensteinen und Reviews wurde die Bearbeitung der Arbeitspakete entsprechend nachfolgender Tabelle fertig gestellt. Der zugehörige Zeitablaufplan (Gantt-Chart) ist auf der nächsten Seite dargestellt.

Meilenstein/Review/ Progress Meeting	Zweck	Ort	Datum	Fertigstellung von AP
Kickoff	Formal Project Start	Bonn	29. Januar 2019	-
MDR & SRR	Mission Definition Review & System Requirement Review	Telefonkonferenz	April 2019	AP1100
ADR	Architecture Design Review	Telefonkonferenz	September 2019	AP1200, AP2100, AP3100
PM1	Progress Meeting 1	Stuttgart	Januar 2020	-
MIL TFRR	MIL Test Facility Readiness Review.	Videokonferenz	Juli 2020	AP1300
TSM	Technical Status Meeting	Videokonferenz	November 2020	-
DMR	Design and MIL Review	Videokonferenz	Juni 2021	AP1400, AP2200, AP3200, AP4100, AP4200
PM2	Progress Meeting 2	Dresden	verzichtet	-
IfA PIL TFRR	IfA PIL Test Facility Readiness Review	Videokonferenz	Juli 2021	-
iFR PIL TFRR	iFR PIL Test Facility Readiness Review	Videokonferenz	Juli 2021	-
Airbus PIL TFRR	Airbus PIL Test Facility Readiness Review	Immenstaad	Oktober 2021	-
DPR	Design and PIL Review	Telefonkonferenz	4. Februar 2022	AP1500, AP2300, AP3300, AP4300
FP	Final Presentation	Videokonferenz	4. Februar 2022	-

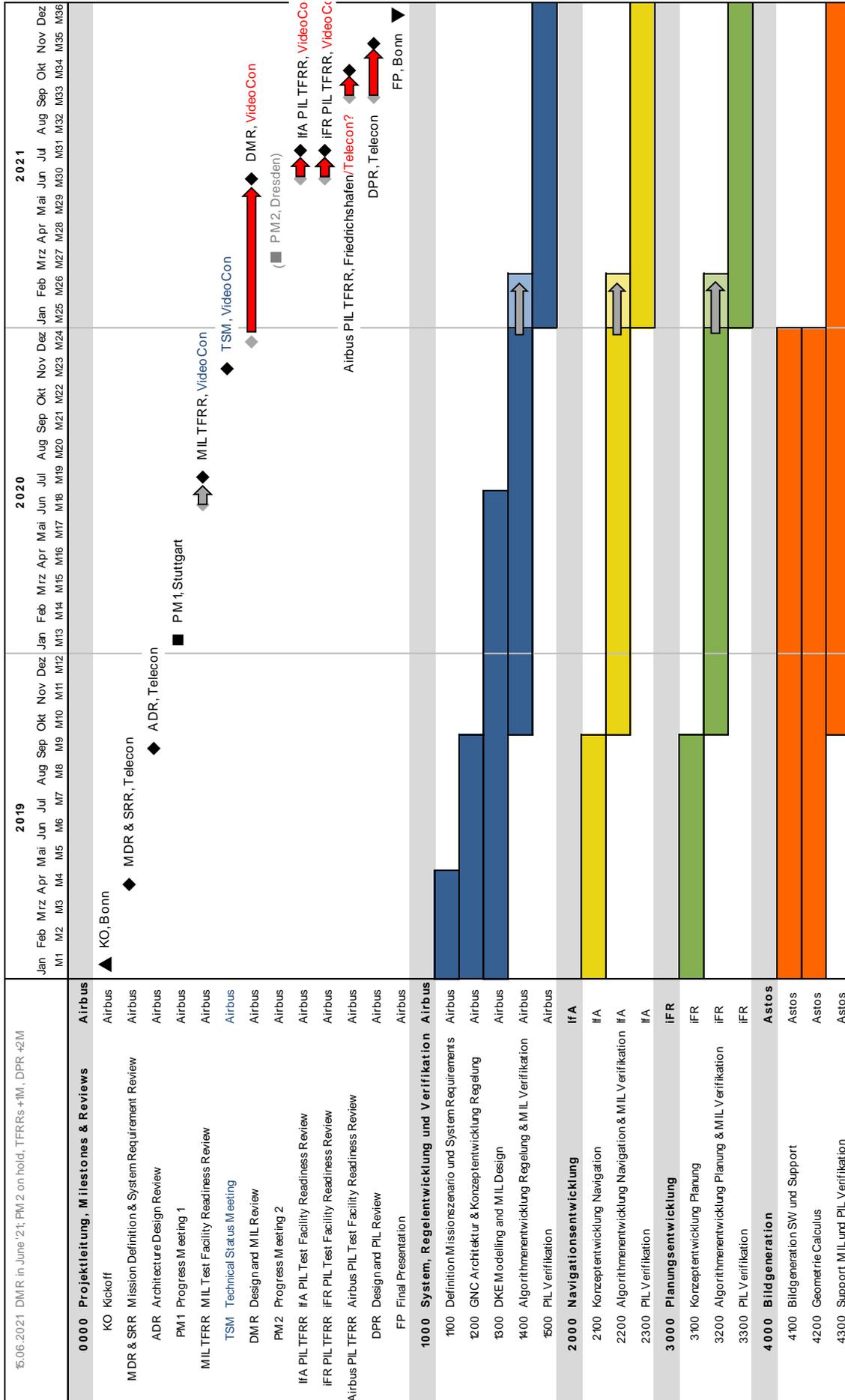


Abbildung 5: Zeitablaufplan



4 Wissenschaftlicher und technischer Stand

4.1 Allgemein

Der nachfolgende Teil ist aus der Vorhabensbeschreibung entnommen [1]:

„Die GNC Architektur basierend auf einem neuartigen Konzept eines schwebenden Raumfahrzeugs, das als mobile Oberflächenplattform mit Fähigkeiten größtmöglicher Oberflächen-Erreichbarkeit und Flexibilität aufwartet wurde vor dieser Zuwendung noch nicht entwickelt oder auf einer MIL & PIL Testumgebung validiert.

Bewegungsplanung und Lenkung

Bewegungsplanung und Lenkung für Flugvehikel ist derzeit ein aktives Feld in Forschung und Wissenschaft. Die meisten Verfahren, auch aktuelle Entwicklungen, beschränken sich auf Anwendungen wie beispielsweise Multikopter oder andere kleinen Fluggeräte in erdgebundenen Anwendungsszenarien. Damit fehlen die für die hier vorliegenden Szenarien im Weltraum wesentlichen Eigenschaften. Diese sind: Rechenbarkeit auf Bordrechnern mit begrenzter Leistung, unsichere Dynamik (in dem vorliegenden Fall gegeben durch unsichere Gravitationseffekte) sowie variable und unsichere Beschränkungen der an Bord verfügbaren Energie. Auch die Hindernisvermeidung selbst stellt zumindest für Fahrzeuge mit konstanter Geschwindigkeit eine nicht zu vernachlässigende Herausforderung dar, wenn man die beschränkte Rechenleistung und einen umfassenden Funktionsnachweis, wie es bei Raumfahrtmissionen gefordert ist, mit in Betracht zieht. Genau diese Lücken wurden in diesem Vorhaben erfolgreich adressiert.

Hinsichtlich der Berechnungsverfahren selbst kann grundsätzlich zwischen deterministischen und probabilistischen Verfahren unterschieden werden. Probabilistische Verfahren führen aus funktionaler Sicht oft zu sehr guten Ergebnissen, allerdings ist üblicherweise die Nachweisführung (hinsichtlich Funktion) und die garantierte Einhaltung der Rechenzeit problematisch. Auch bei klassischen Optimierungsverfahren kann die benötigte Rechenzeit schnell sehr groß werden. Auch hier gilt es, entsprechend effiziente Algorithmen für Raumfahrtszenarien zur Verfügung zu stellen.

Navigationsverfahren

Die Navigation stellt für die Bewegungsplanung in Echtzeit bestmögliche Schätzwerte der aktuellen Fahrzeugpose (6 DOF, Position und Lage) sowie eine aggregierte räumliche Umgebungskarte zur Verfügung. Im vorliegenden Kontext stehen Verfahren zur optischen Navigation zur Diskussion, d.h. die Perzeption beruht auf passiven bildgebenden Sensoren (Kameras, 2D- Bilddaten) oder aktiven optischen Sensoren (Laserscanner, 3D Punktwolken), als zusätzliche Perzeptionsquelle bieten sich Inertialsensoren an. Speziell durch die terresterische Robotik ist heute eine Vielzahl von Verfahren zur Bestimmung der Fahrzeugpose und von Karten verfügbar, wobei für das in diesem Projekt betrachtete Explorationszenario spezielle Einschränkungen gelten: (i) unstrukturierte outdoor Umgebung mit unbestimmten Umgebungsbedingungen, (ii) nichtkooperative Umgebung, (iii) 6 DOF Posenbestimmung und 3D Kartenerstellung, (iv) ruhende (Hovering) oder bewegte Sensoren.

Die Navigationsverfahren unter Nutzung bildgebender Sensoren basieren entweder auf Merkmalerkennung natürlicher Merkmale oder Bildbewegungsinformation (optischer Fluss). In beiden Fällen stellen flache Oberflächentexturen, ungünstige Beleuchtungsbedingungen und geometrische Verzerrungen (verschiedene Blickwinkel) eine große Herausforderung für die Robustheit dar. Für den optischen Fluss kann die Robustheit durch Ansätze der 2D-Flächenkorrelation gesteigert werden (am IfA entwickelt und erprobt), es bleiben jedoch Defizite bei geometrischen Verzerrungen und stationärer Fahrzeugpose.

Bei Nutzung von Laserscannern (LIDAR) nutzt man Verfahren zum Matching von 3D-Punktwolken (Scan Matching, ICP Iterative Closest Point). Den Vorteilen der weitgehenden Unabhängigkeit von Beleuchtungsbedingungen stehen Herausforderungen hinsichtlich räumlicher Auflösung der Punktwolken gegenüber.



In Abhängigkeit von den Perzeptionsverfahren werden zur Darstellung von Karten in unterschiedlicher Form passfähige abstrakte Repräsentationen der Umwelt genutzt, wie Merkmalskarten (feature maps), Rasterkarten (grid maps) und topologische Karten (topological maps). Aufgrund der im Regelfall geringen Landmarkendichte bieten merkmalsbasierte Karten keine ausreichende Kenntnis über Hindernisobjekte und ermöglichen damit keine gesicherte Bewegungsplanung. Als Kartenrepräsentationen eignen sich für das vorliegende Szenario speziell Digitale Höhenkarten (2.5D Digital Elevation Maps), Tiefenkarten (depth map) oder volle 3D volumetrische Karten.

Zum Erstellen der Karten der vorerst als unbekannt oder als unvollständig bekannt angenommenen Umgebungen sind eine Vielzahl von Verfahren des Simultaneous Localization and Mapping (SLAM) bekannt, die in der Regel auf probabilistischen Schätzalgorithmen beruhen.

Eine Schlüsselherausforderung für das der Zuwendung zugrundeliegende Explorationszenario ist die Interaktion zwischen Bewegungsplanung und Navigation, d.h. Berücksichtigung der aktuellen Güte der Navigationslösung für die Bewegungsplanung bzw. eine optimierende vorausschauende Bewegungsplanung um zusätzlich die Navigationsgüte (ausgedrückt durch eine geeignete Metrik) neben anderen Randbedingungen zu optimieren (SPLAM – Simultaneous Planning, Localization and Mapping). Im SPLAM-Kontext muss nicht notwendigerweise eine globale Karte erstellt und an Bord gespeichert werden. Vielmehr ist es in der Regel ausreichend, eine lokale Karte der augenblicklichen Umgebung zu halten (receding map). Die räumliche Abdeckung dieser lokalen Karte orientiert sich am Planungshorizont des Bewegungsplaners und ist somit in enger Abstimmung mit der Bewegungsplanung auszuwählen.

Ein Nachteil bisheriger Arbeiten ist die hohe Komplexität in Bezug auf Rechenzeit und Speicherbedarf, sowie die daraus resultierende mangelnde Skalierbarkeit. Viele Verfahren rastern den Aktions- und/oder Zustandsraum bzw. verwenden ein gerastertes Umgebungsmodell. Sie unterliegen damit starken Einschränkungen in der Dimensionalität und im Wertebereich (Ausdehnung je Dimension), um praktisch beherrschbar zu bleiben. Verfahren mit landmarkenbasierter Umgebungsmodellierung (Feature-Karten) dagegen sind für eine gesichert kollisionsfreie Bewegungsplanung ungeeignet, da sich Hindernisse nicht kompakt beschreiben lassen. Eine echtzeitfähige Umsetzbarkeit auf mobiler Hardware bleibt weitgehend offen.

Echtzeitfähige Visualisierung und Rendering-Algorithmen

Für die Bildgenerierung von Kamera- oder Lidarsensoren gibt es verschiedene Lösungen, welche zum Teil auch echtzeitfähig sind. So kann der seit mehreren Jahren kommerziell verfügbare Kamera- und Lidarsimulator von Astos Solutions für Rendezvous-Szenarien eingesetzt werden, ist aber bisher nicht für EDL-Szenarien geeignet, weil er die Oberfläche der Monde und Planeten nicht mit hinreichender Qualität darstellt. Andere Tools wie beispielsweise PANGU sind auf die Darstellung solcher Oberflächen hin optimiert, haben dabei aber Probleme mit der Bildgenerierung in Echtzeit. Wieder andere Simulatoren können hochgenau Bilder für ein spezifisches System und ein genau definiertes Szenario generieren, sind aber ebenfalls nicht echtzeitfähig. So generiert z.B. MOC2DIMES Bilder für die Navigationskamera des Abstiegsmoduls für den Mars Exploration Rover und verwendet dabei eine Kombination aus Fotos und Modellannahmen.

Eine Lösung, die konfigurierbar und echtzeitfähig ist und gleichzeitig in der Lage ist, ein dynamisches Landeszenario unter Berücksichtigung einer nicht-idealen Optik, mit hochdetaillierten Oberflächenstrukturen und Interaktionen zwischen Triebwerksstrahlen und Oberfläche (z.B. aufgewirbelter Sand) darzustellen, existierte vor der Zuwendung nicht.“

4.2 Wissenschaftliche und technische Basis für das Vorhaben bei Verbundpartnern

4.2.1 Institut für Flugmechanik & Flugregelung (iFR)

Wie Institut für Flugmechanik & Flugregelung (iFR), Universität Stuttgart bereits im Abschnitt 2.1 beschrieben, konnte das iFR auf zahlreiche Methoden im Bereich der Bewegungsplanung zurückgreifen, womit dieses Vorhaben auf einer soliden Basis anknüpfen konnte. Speziell seien hier die im Flug erprobten Algorithmen für die Trajektorienplanung genannt, welche als Grundlage für die Entwicklung in diesem Projekt dienen.



4.2.2 Institut für Automatisierungstechnik (IfA)

Siehe Schlussbericht Institut für Automatisierungstechnik.

4.2.3 Airbus Defence and Space GmbH

Siehe Schlussbericht der Airbus Defence and Space GmbH.

4.2.4 Astos Solutions GmbH

Siehe Schlussbericht der Astos Solutions GmbH.

4.2.5 Verwendete Fachliteratur, Informations- und Dokumentationsdienste

Einschlägige Fachliteratur, insbesondere das Journal of Guidance, Control, and Dynamics (JGCD) des American Institute of Aeronautics and Astronautics (AIAA) , sowie Konferenzen im Spacecraft Guidance, Navigation, and Control (GNC)-Bereich u. a. ESA Conference on Guidance, Navigation, and Control, IFAC Symposium on Automatic Control in Aerospace, AIAA Science and Technology Forum.

5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

5.1 Zusammenarbeit der Verbundpartner

Eine wichtige Voraussetzung für Erfolg des Vorhabens stellt eine optimale Gestaltung der Zusammenarbeit zwischen den Verbundpartnern dar, die einerseits auf einer klaren Definition und Abgrenzung von bearbeiteten Aufgabenbereichen basiert und andererseits durch ein aktives grenzübergreifendes Management, das System-Engineering und konsequente Verwendung relevanter technischer Mittel dafür sorgt, dass die Aktivitäten im Kontext des gesamten Projektes durchgeführt werden und somit das Erreichen der Projektziele in der angestrebten Systemsicht sichert.

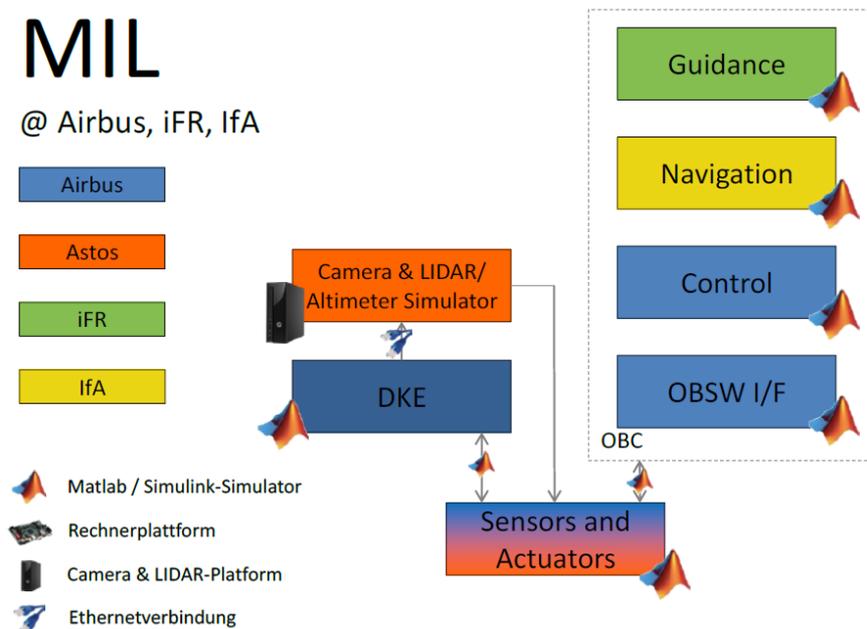


Abbildung 5.1 Aufgabenbereiche der Verbundpartner im gesamten Systemkontext.

Die von den Verbundpartnern eigenverantwortlich übernommenen Aufgabenbereiche sowie die gemeinsam vorgenommenen Tätigkeiten sind in Abbildung 5.1 vorgestellt. Die gemeinsamen Tätigkeiten beziehen sich auf die Integration und Abstimmung der GNC Algorithmen, dem Testen und Demonstration des Gesamtsystems mittels Simulationen.

Wichtige projektübergreifende organisatorische Maßnahmen umfassten:

- Interne Dokumente,
- reguläre Video- und Telefonkonferenzen zur Klärung von technischen und organisatorischen Fragen,
- Projektmeetings am Ort,
- Versionsmanagement und Austausch von relevanten Daten, Dokumenten und Programmen über ein gemeinsames Online-Repository (durch Astos bereitgestellt).



5.2 Zusammenarbeit mit Dritten

Alle notwendigen Arbeiten wurden innerhalb der Universität Stuttgart erledigt, weshalb keine Beauftragung Dritter stattfand.

6 Verwendung der Zuwendung und erzieltes Ergebnis

Im Folgenden werden die erzielten Ergebnisse nach Arbeitspaketen beschrieben und dargestellt. Im Anschluss wird der Bearbeitungsstand der Arbeitspakete mit den jeweiligen Aufgaben zusammengefasst.

6.1 Konzeptentwicklung der Bewegungsplanung und Lenkung

Für die Konzeptentwicklung wurden Modelle zur Bestimmung der Umgebungsbedingungen hergeleitet. Diese Modelle umfassen u.a. die gravitative Steigung (d.h. der Winkel zwischen lokalen Oberflächennormalen Vektor und lokalem Gravitationsvektor) und die Beleuchtungsbedingungen auf der Oberfläche. Basierend auf diesen Modellen wurden globale Oberflächenkarten erstellt, um z.B. landbare Gebiete zu identifizieren wie exemplarisch in Abbildung 2 dargestellt. Darüber hinaus wurden eine Störgrößenanalyse und einfache Flugleistungsabschätzungen durchgeführt. Basierend auf den erstellten Modellen und Abschätzungen konnten die operationellen und technischen Randbedingungen für die Bewegungsplanung und Lenkung festgelegt werden.

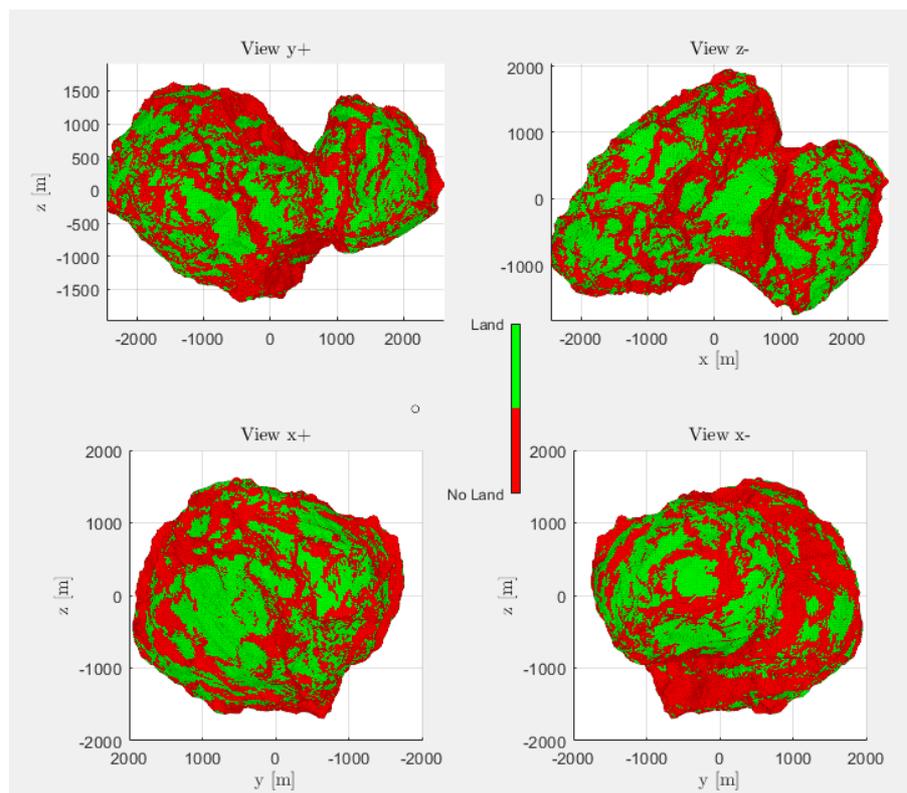


Abbildung 2: Beispielhafte globale Karte von landbaren und nicht landbaren Gebieten.

Im nächsten Schritt wurden potenzielle Explorationsstrategien erörtert und evaluiert. Dazu wurden unterschiedliche Fehler- und Notfallszenarien definiert. Als treibenden Faktor für die Exploration wurde die Fähigkeit zur autonomen Landeplatzerkennung identifiziert. Darauf basierend wurde eine Explorationsstrategie abgeleitet, die sowohl die Exploration erhöht und gleichzeitig die Sicherheit des Fahrzeugs garantiert. Im Kern dieser Strategie sollen unterschiedliche Landeplätze angefliegen werden, an denen Experimente durchgeführt werden. Im Folgenden werden die einzelnen Schritte dieser Strategie zusammengefasst.

Im ersten Schritt werden potenzielle vorläufige Landeplätze basierend auf den vor Abflug verfügbaren Daten bzw. globalen Karten identifiziert. Diese globalen Ziele stellen wissenschaftlich interessante Ziele/Gebiete dar. Im zweiten Schritt soll das Fahrzeug autonom zu diesen Zielen fliegen. Hierbei müssen diese Ziele im Flug bestätigt werden, da die Vorauswahl nur auf groben Daten beruht. Hauptziel bei dieser Art von Exploration ist es,

so nah wie möglich an den Zielpunkt/die Zielgebiete zu kommen und so viele wie möglich anzufliegen. Hierzu sind ggf. Zwischenlandungen notwendig oder auch Rückflüge zu zuvor bestätigten Landeplätzen, um die Sicherheit des Fahrzeuges zu gewährleisten. Diese Flugstrategie ist schematisch in Abbildung 3 zu sehen.

Somit lässt sich auch das Maß der Exploration festlegen, nämlich wie viele unterschiedliche Gebiete wissenschaftliche angefliegen/exploriert werden können im Vergleich zur gesamten Oberfläche.

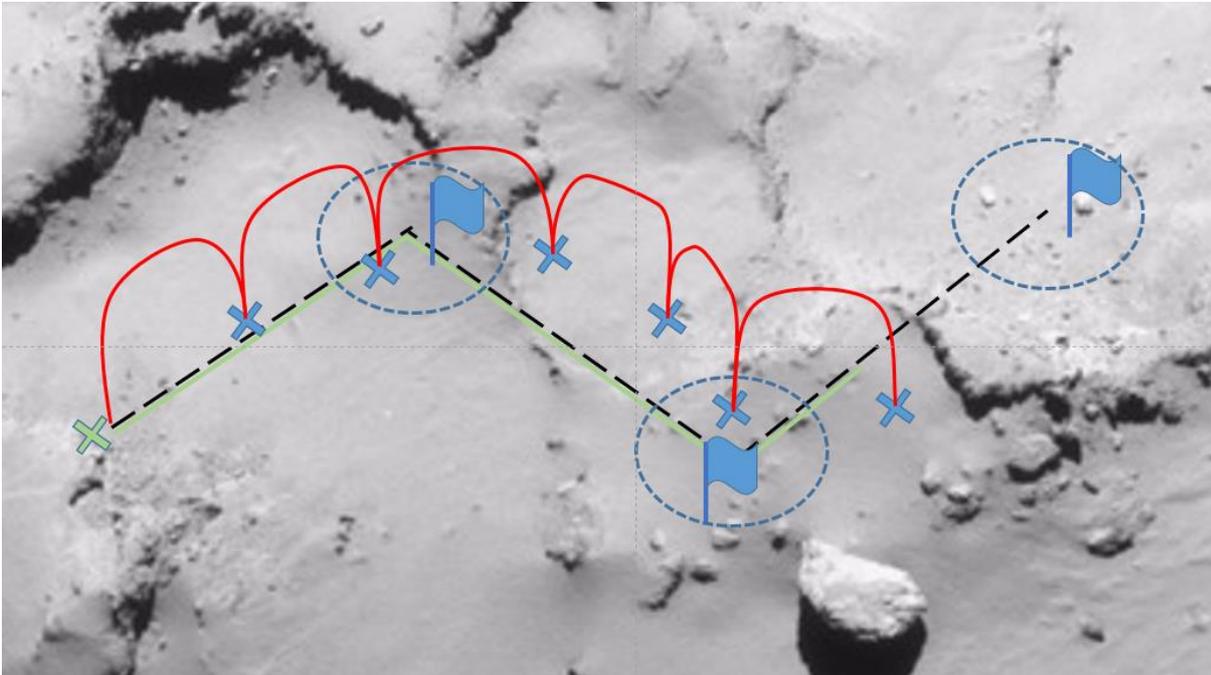


Abbildung 3: Schematische Darstellung der Flugstrategie. Die blauen Flaggen zeigen die wissenschaftlichen Ziele, die blauen Kreuze symbolisieren Zwischenlandungen

Basierend auf den operationellen Randbedingungen und der Explorationsstrategie wurde eine Architektur für die Bewegungsplanung und Lenkung erstellt. Diese beinhaltet auch die Interfaces zu den anderen Bestandteilen des GNC-Systems, die in enger Abstimmung mit den Partnern getroffen wurde. Diese Architektur ist in Abbildung 4 dargestellt und dient als Grundlage für die Entwicklung der Detailalgorithmen.

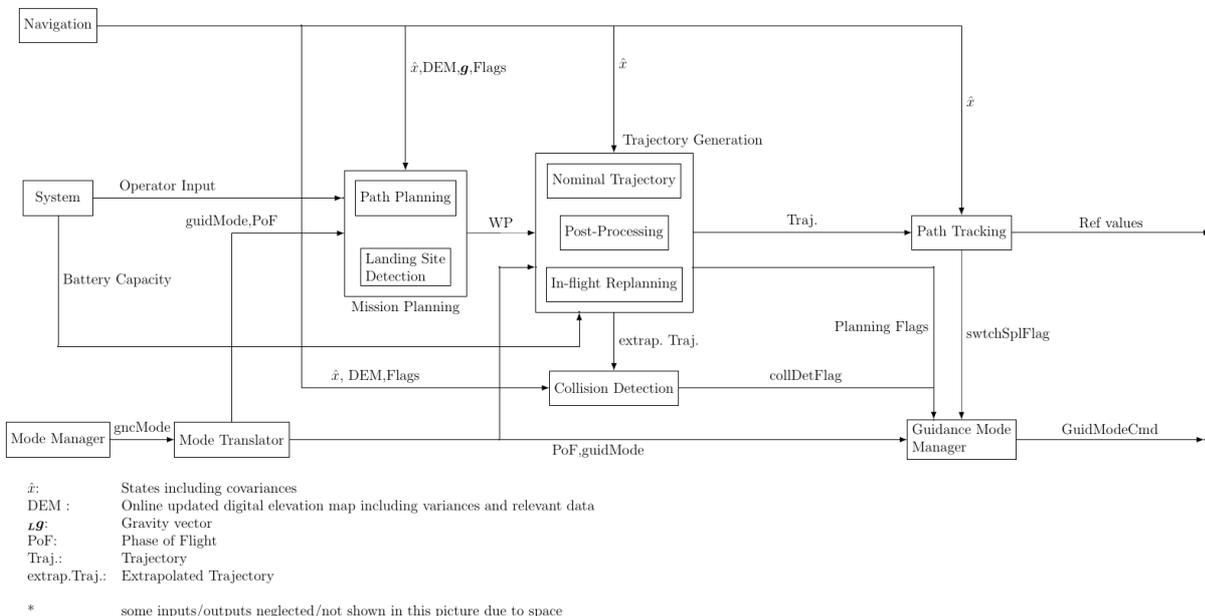


Abbildung 4: Architektur der Bewegungsplanung und Lenkung. Dargestellt werden die Hauptmodule mit Subfunktionen, sowie der Signalfluss und den Interfaces zu den anderen GNC-Komponenten.

6.2 Algorithmenentwicklung für die autonome Bewegungsplanung

Basierend auf der in Abschnitt 6.1 erstellten Architektur, ist eine Detailentwicklung für folgende Bereiche notwendig:

- Erstellung von Umgebungskarten
- Pfadsuche
- Landeplatzerkennung
- Trajektorienplanung mit Umplanungsfähigkeit und Kollisionsvermeidung
- Trajektorien-Tracking

Das Erstellen der Umgebungskarten wurde bereits während der Konzeptentwicklungsphase durchgeführt und ist in Abschnitt 6.1. bereits beschrieben. Die Lenkung wurde durch den Verbundpartner Airbus Defence and Space übernommen. Das iFR hat hierbei durch einen umfangreichen technischen Bericht aus einer äquivalenten Fragestellung aus dem Bereich der Luftfahrt und beratend unterstützt.

Für die Erstellung der restlichen Algorithmen wurde im ersten Schritt ein Vergleich von unterschiedlichen Ansätzen mithilfe der einschlägigen Literatur geführt. Im Folgenden werden die Funktionen und Ergebnisse der Teil-Algorithmen zusammengefasst.

Sämtliche Teilalgorithmen wurden sowohl einzeln, als auch im Gesamtsystem im MIL- und PIL Testbed getestet.

6.2.1 Pfadsuche

Basierend auf den Umgebungskarten werden Routen in Form von Wegpunkten zwischen dem Abflugort und dem wissenschaftlichen Ziel geplant. Diese vorläufigen Wegpunkte sind als potenzielle Landepunkte zu verstehen.

Hierzu wurde ein Algorithmus basierend auf Graphensuchverfahren (sog. Probabilistic Roadmap) weiterentwickelt, welcher die kinematischen Beschränkungen des Fahrzeuges wie z.B. maximale Steigung berücksichtigt. Dazu wird die Umgebung gerastert und in einem Graphen gespeichert. Im Anschluss wird der A*-Algorithmus genutzt, um eine optimale Route, basierend auf zuvor festgelegten Gütekriterien zu finden. Das Tool wird exemplarisch in Abbildung 5 dargestellt.

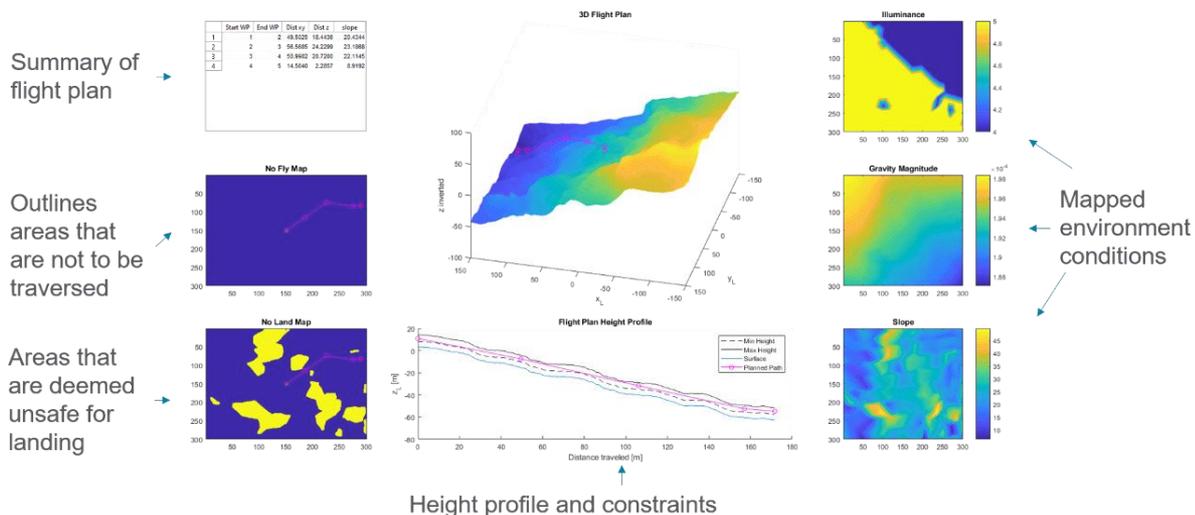


Abbildung 5: Beispiel für die Pfadsuche. Durch die Kombination von unterschiedlichen Umgebungsbedingungen lassen sich Karten für die Planung erstellen. Mittels Pfadsuche wird eine Route durch landbarer Gebiete gesucht.

6.2.2 Trajektorienplanung und Tracking

Die Trajektorienplanung nutzt die zuvor erstellten Wegpunkte, um kinematisch fliegbare Bahnen zu generieren. Um eine Implementierung auf raumfahrttauglicher Hardware zu gewährleisten wurden hier sogenannte Spline approximierten Bewegungsprimitive (engl. Motion Primitives) genutzt.

Diese Motion Primitives erlauben es die Fahrzeugbeschränkungen zu berücksichtigen bei sehr geringen Rechenaufwand. Hierbei wurde der Ansatz aus [2] erweitert. Um Kollisionen zu vermeiden, wurde ein Kollisionserkennungsalgorithmus entwickelt, welcher die Flugbahnen des Fahrzeuges extrapoliert und mithilfe von online geschätzten Karten nach potenziellen Kollisionen sucht, wie in Abbildung 6 zu sehen ist. Im Falle einer festgestellten Kollision wird die zuvor erstellte Route angepasst, um das Hindernis zu umfliegen.

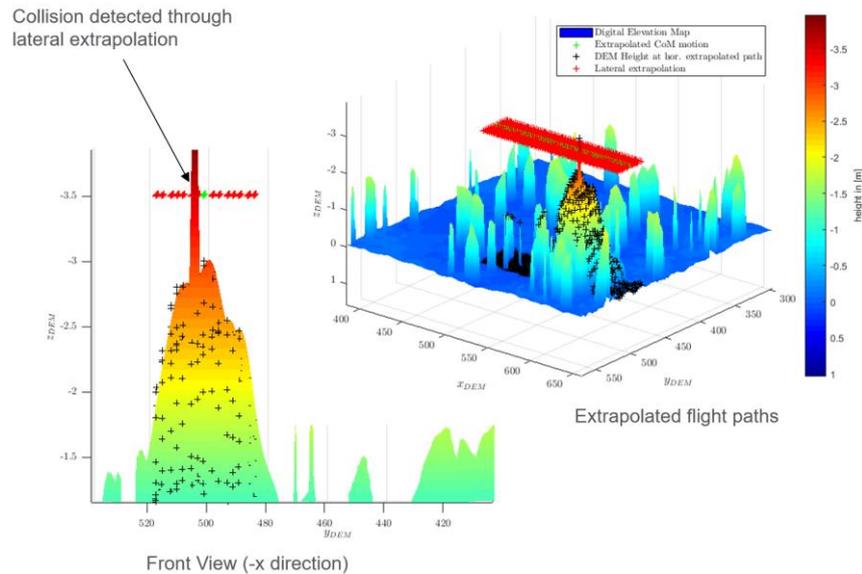


Abbildung 6: Darstellung der Kollisionsdetektion in einer DEM für eine einfache extrapolierte Flugbahn.

Um die Sicherheit des Fahrzeuges zu gewährleisten wird zudem ein Modell benötigt, welches die benötigte Batterieenergie des Fahrzeuges prädiziert. Hierzu wurde eigenes ein Modell hergeleitet. Dieses Modell kann zur Beurteilung des verbleibenden Energiezustandes und somit für die Entscheidungsfindung genutzt werden. In Abbildung 7 ist eine solche Energieabschätzung für die Flugbahn in Abbildung 8 dargestellt. Das Modell besitzt eine geringe Rechenzeit und gleichzeitig eine hohe Genauigkeit.

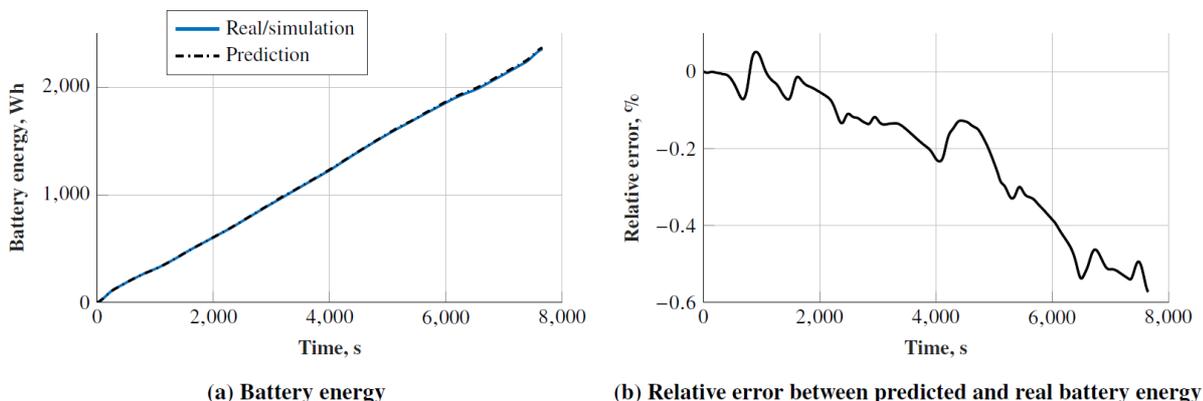


Abbildung 7: Nachweis über die Genauigkeit des Energieabschätzungsmodells [3]

Das Trajektorien Planungsmodul ist in der Lage für alle Flugphasen (Start, Cruise, Landung) neue Flugbahnen zu generieren. In Abbildung 8 ist eine vollständige Trajektorie von Start bis Landung dargestellt. Zudem besitzt es die Fähigkeit Bahnen während dem Flug umzuplanen z.B. zur Hindernisvermeidung oder zum Anflug/Rückflug zu bestätigten Landepunkten. Weiterhin wurde ein Tracking-Modul entwickelt, welche abhängig vom Fahrzeugzustand die Sollwerte für die unterlagerte Regelung berechnet.

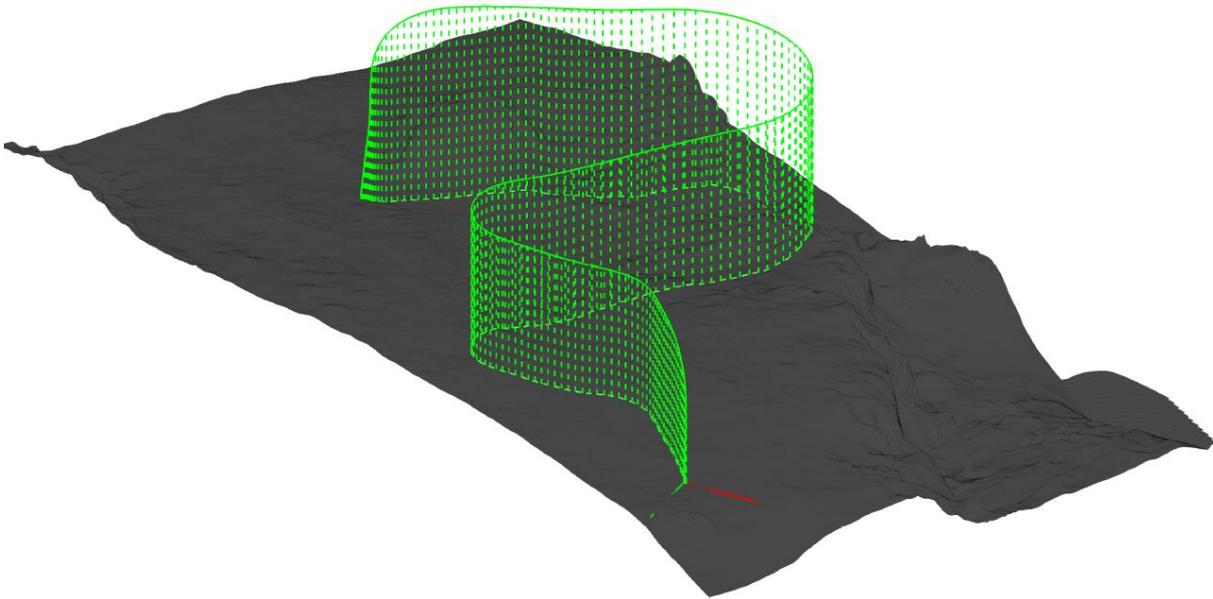


Abbildung 8: Beispielhafte Flugbahn für alle Flugphasen in der Agilkia Region auf dem Kometen 67P/Churyumow-Gerasimenko [3].

6.2.3 Landeplatzerkennung

Für die Bestätigung von vorläufigen Landepunkten und zum Auffinden von neuen Landepunkten während dem Flug wurde eigens ein Landeplatzerkennungsmodul entwickelt. Hierbei werden diskrete Punkte in online geschätzte Karten (engl. Digital Elevation Map DEM) auf unterschiedliche Kriterien überprüft. Dazu zählen z.B. die gravitative Steigung und Oberflächenrauigkeit. Um einen Punkt als landbar zu deklarieren, müssen diese Kriterien unter fahrzeugspezifischen Grenzen liegen.

Für eine Beispieltrajektorie wird diese Überprüfung in Abbildung 9 dargestellt. Der verwendete Ansatz stellt die geforderte Zuverlässigkeit sicher und beinhaltet Erweiterungen die bestehende Landeplatzsuche Verfahren sinnvoll für die missions-spezifischen Herausforderungen der SSSB Umgebung erweitern [4]. Im Rahmen des Projekts wurde der etablierte Least Median Square Schätzung Ansatz [5] als Grundlage für die Entwicklung adaptiert.

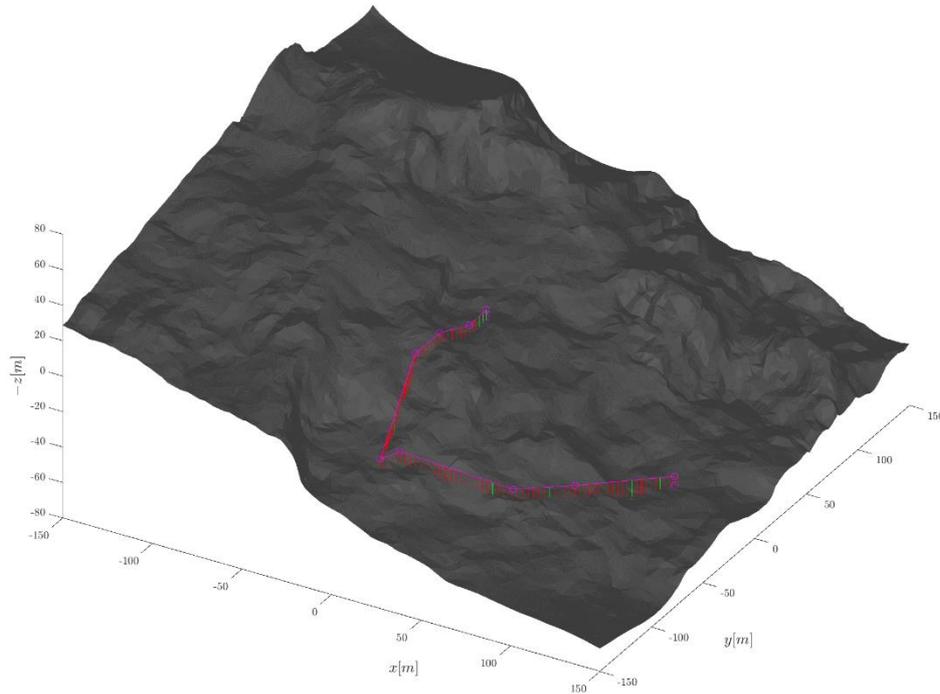


Abbildung 9: Dargestellt wird die Trajektorie über der Oberfläche. Die vertikalen Striche zeigen die überprüften Oberflächenpunkte, wobei grün landbar und rot nicht landbar ist.

6.3 PIL Verifikation der Bewegungsplanung und Lenkung

Um die Echtzeitfähigkeit der Algorithmen nachzuweisen, wurde eine lokale PIL Testumgebung aufgebaut und in Betrieb genommen. Das Setup ist in Abbildung 10 zu sehen.

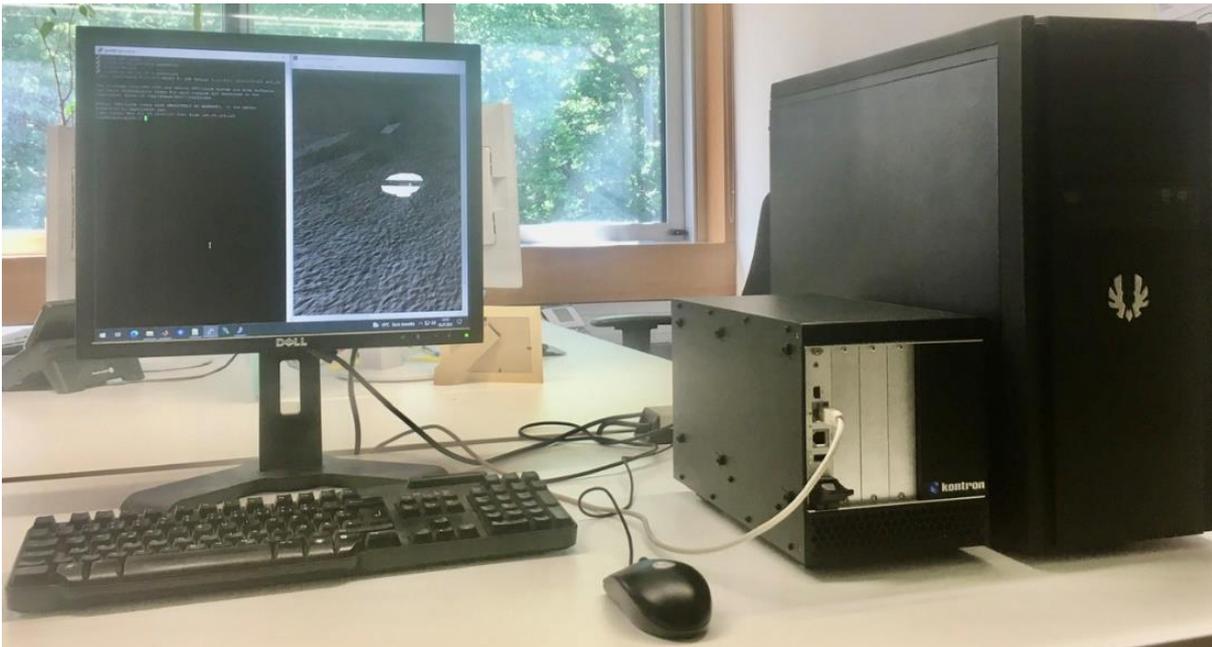


Abbildung 10: PIL Setup am iFR bestehend aus Co-Prozessor (Kontron Board), Simulationsrechner und Bildschirm



Die Bewegungsplanungsalgorithmen im MIL Testbed wurde aufgeteilt in rechenintensive Algorithmen, welche auf dem Co-Prozessor (Kontron Board) berechnet werden, und weniger rechenintensive Algorithmen, die auf dem Hauptrechner ausgeführt werden. Als rechenintensivsten wurde hierbei die Landeplatzerkennung identifiziert. Somit wurde diese alleinig auf das externe Rechnerboard exportiert. Das Simulationsmodell ist in Abbildung 11 dargestellt.

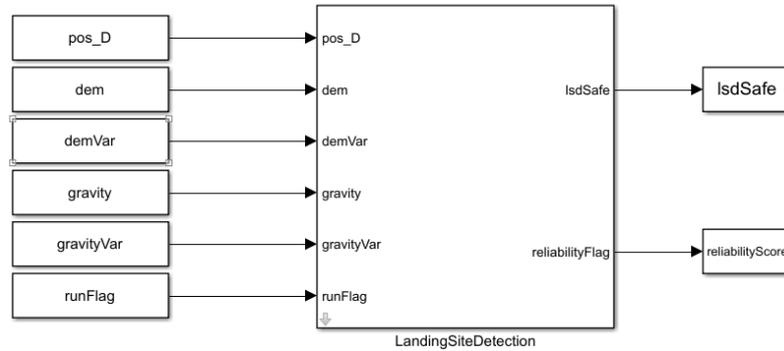


Abbildung 11: PIL Simulationsmodell Landeplatzerkennung



6.4 Bearbeitungsstand nach Arbeitspaketen: Zusammenfassung

WP	Name	Stand
WP 3100	Konzeptentwicklung zur Bewegungsplanung und Lenkung	
Aufgaben:		
	- Festlegung der operationellen Randbedingungen für die Bewegungsplanung/Lenkung	Abgeschlossen
	- Festlegung der systemtechnischen und technischen Randbedingungen aus Sicht der Bewegungsplanung/Lenkung (z.B. Energie/Leistung und Bordrechner)	Abgeschlossen
	- Definition eines Maßes für die Explorationsgüte	Abgeschlossen
	- Vergleich von verschiedenen Möglichkeiten zur Beschreibung der Informationsschnittstellen zwischen Navigation/Umgebungsbestimmung und Bewegungsplanung/Lenkung, sowie zur Basisregelung; Festlegung für die Referenzmission	Abgeschlossen
	- Vergleich und Konzepterstellung grundsätzlicher Explorationsstrategien, z.B. lateral versus vertical	Abgeschlossen
	- Definition von Fehlerfällen und Notfallszenarien	Abgeschlossen
	- Vergleich und Konzepterstellung grundsätzlicher Notfallstrategien, z.B. Notlandungen versus Rückkehrszenarien	Abgeschlossen
	- Festlegung von Missions- und Notfallstrategien für die Referenzmission	Abgeschlossen
	- Vergleich möglicher Konzepte zur Missionsplanung und Bewegungsplanung; Festlegung für weitere Arbeiten im Rahmen des Projekts	Abgeschlossen
	- Zusammenfassung der funktionalen Architektur hinsichtlich Bewegungsplanung, unter Berücksichtigung der Navigation und Basisregelung	Abgeschlossen
	- Mitarbeit am MIL und PIL Konzept	Abgeschlossen
	- Mitarbeit am GNC Interface Control Document	Abgeschlossen
	- Mitarbeit am SW Engineering Konzept	Abgeschlossen



WP	Name	Stand
WP 3200	Algorithmenentwicklung zur Bewegungsplanung und Lenkung	
	Aufgaben:	
	- Durchsicht und Vergleich bestehender Detailalgorithmen für die Teilaufgaben Bahnplanung, Lenkung, Missionsplanung, Notfallstrategien	Abgeschlossen
	- Herleitung von Entwurfsmodellen für Bewegungsplanung und Lenkung	Abgeschlossen
	- Algorithmenentwicklung zur autonomen Missionsplanung	Abgeschlossen
	- Algorithmenentwicklung zur Bahn- und/oder Trajektorienplanung	Abgeschlossen
	- Algorithmenentwicklung von Lenkverfahren	Abgeschlossen
	- Algorithmenentwicklung zur Behandlung von Fehler- und Notfallszenarien	Abgeschlossen
	- Herleitung beziehungsweise Definition eines Gütemaßes zur Navigation und dessen Berücksichtigung in der Bewegungsplanung	Abgeschlossen
	- Herleitung beziehungsweise Definition einer borseitigen Maßzahl zur Beurteilung des verbleibenden Energiezustandes	Abgeschlossen
	- Implementierung von ggf. vereinfachten Modellen/algorithmen zur Navigation und Basisregelung für Testzwecke	Abgeschlossen
	- Spezifikation und Erstellung von Testfällen, inklusive unsicherer Parameter, für das MIL Testbed	Abgeschlossen
	- Durchführung von Simulationen im MIL Testbed zum Funktionsnachweis	Abgeschlossen



WP	Name	Stand
WP 3300	Verifikation der Algorithmen zur Bewegungsplanung in einer Echtzeitumgebung, inklusive aller funktionalen Algorithmen	
	Aufgaben:	
	- Aufbau und Integration der lokalen PIL Umgebung am iFR	Abgeschlossen
	- Transfer der Algorithmen zur Bewegungsplanung und Lenkung (MATLAB, C-Code) auf PIL Rechnerplattform (Codegenerierung, manuell unterstützt, Workflow unter Beachtung einer späteren Portierung auf raumfahrttaugliche Hardware)	Abgeschlossen
	- Integration der Software-Komponenten der Projektpartner (Umgebungssimulation, Navigation, Basisregelung)	Abgeschlossen
	- Erstellung der PIL Testpläne auf der Basis der MIL Testfälle	Abgeschlossen
	- Testdurchführung	Abgeschlossen
	- Testauswertungen	Abgeschlossen



7 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Die Zuwendung beläuft sich auf 497.052,48 Euro. Darin enthalten sind 405.582,48 Euro für Beschäftigte E12-E15 (Position 0812) und 64.368,00 Euro für Beschäftigungsentgelte (Position 0822) sowie 24.102,00 Euro für Dienstreisen (Position 0846) und 3.000,00 Euro für Gegenstände > 800/410/400 (Position 0850).

Im Laufe des Verbundvorhabens für den Zeitraum vom 01.01.2019 bis zum 31.12.2021 sind Ausgaben für Personalkosten (Beschäftigte E12-E15, Position 0812) in Höhe von 446.673,55 Euro entstanden. Die zweckgebundenen Ausgaben für studentische bzw. wissenschaftliche Hilfskräfte (Beschäftigungsentgelte, Position 0822) belaufen sich auf 45.933,04 Euro. Für Inland- und Auslandsreisen (Position 0846) sind Aufwendungen in Höhe von 4.396,88 Euro entstanden.

Aufgrund der andauernden COVID-19 Pandemie hat sich die geplante Teilnahme an Fachkonferenzen deutlich verringert bzw. als nicht möglich erwiesen. Aus diesem Grund und hinsichtlich des benötigten Mehraufwands bei der Erfüllung der gesetzten Ziele zum Arbeitspaket 3300 wurden die in der Position 0846 ersparten bzw. noch verfügbaren Mittel für die entstandenen Mehrausgaben für Personal (Beschäftigte E12-E15) eingesetzt. Vor diesem Hintergrund wurden auch verfügbare Mittel für Beschäftigungsentgelte (Position 0822) notgedrungen in Mittel für Personal 8Beschäftigte E12-E15) umgewidmet.

Die für die Anschaffung eines Leistungsrechners veranschlagten und beantragten Mittel in Höhe von 3.000, 00 Euro (Position 0850) haben sich als unzureichend bzw. als nicht ausreichend für den Kauf erwiesen. Aufgrund der gestiegenen tatsächlichen Ausgaben wurden die Kosten zunächst von anderen freien, hausinternen Mitteln getragen. Aufgrund einer nicht rechtzeitig umgesetzten Umbuchung konnte die Übertragung der Ausgaben auf das Projektsachkonto „ASTRONE“ für das Haushaltsjahr 2019 nicht mehr erfolgen. Weitere Erläuterungen sowie Unterlagen zum Sachverhalt sind aus unserem Schreiben vom 08.12.2021 zu entnehmen.



8 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die beantragte Zuwendung dient dem Zweck der (Weiter-)Entwicklung von Algorithmen der Bewegungsplanung und Lenkung von Raumfahrzeugen sowie der Entwicklung von Verifikationsprozeduren. Die Zuwendung ist notwendig, da für diese Aktivitäten keine Eigenmittel der Universität zur Verfügung stehen.

Aus Sicht des Zuwendungsempfängers wurden alle wesentlichen Projektziele erreicht. Die geleistete Arbeit wird insofern als angemessen erachtet. Die im Projektantrag formulierten Meilensteine sind in Tabelle 1 aufgelistet und wurden an den in der Tabelle aufgelisteten Tagen erreicht.

Meilenstein	Kurzbeschreibung	Datum
Kickoff	Formeller Projektbeginn	29.01.2019
MDR & SRR	Missionsdefinition und System Anforderungen	28.05.2019
ADR	Architektur Design Review	19.09.2019
MIL TFRR	MIL Test Facility Readiness Review	16.07.2020
DMR	Design and MIL Review	18.06.2021
iFA PIL TFRR iFR PIL TFRR	iFA / iFR PIL Test Facility Readiness Review	30.07.2021
Airbus PIL TFRR	Airbus PIL Test Facility Readiness Review	10/2021
DPR	Design and PIL Review	11/2021
FP	Abschlusspräsentation	04.02.2022

Tabelle 1 Meilensteine



9 Voraussichtliches Nutzens und Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans

9.1 Schutzrechte

Gegenwärtig ist keine Verwendung der Ergebnisse in Form von Patenten oder sonstigen Schutzrechten geplant.

9.2 Veröffentlichungen

Siehe Kapitel „Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen des Ergebnisses“.

9.3 Wirtschaftliche Erfolgsaussichten

Die Universität Stuttgart und damit auch das Institut für Flugmechanik und Flugregelung (iFR) zielt als akademische Einrichtung auf Forschung und Lehre ab, wirtschaftliche Erfolgsaussichten sind zunächst per Definition irrelevant. Nichtsdestotrotz haben wissenschaftliche Aktivitäten, die weitere Drittmiteinnahmen generieren eine hohe Priorität.

Die im Rahmen der Zuwendung erarbeiteten und nun vorliegenden Entwicklungsergebnisse sind nahezu umfänglich bei allen zukünftigen Missionen im Kontext von Entry, Descend and Landing (EDL) und planetaren Landemissionen potenziell einsetzbar (unter Berücksichtigung des aktuellen TRL). Da erwartet wird, dass das Interesse beispielsweise an Asteroidenmissionen weiter zunimmt, hat dieses Projekt auch für die Universität Stuttgart eine wirtschaftliche Relevanz. Potenzielle Partner sind hierbei neben Airbus alle weiteren Raumfahrt-Systemfirmen sowie das DLR.

Das vorliegende Vorhaben hat sicherlich zu einer vorteilhaften Positionierung der Hochschuleinrichtung bezogen auf zukünftige Ausschreibungen geführt. Dies unterstützt die Akquisition weiterer Projekte beziehungsweise Drittmittel zur Stärkung der Forschungsaktivitäten. Dieser Effekt wirkt natürlich nicht unmittelbar, daher kann kein klarer Zeithorizont für die Verwertung angegeben werden.

Einige der erarbeiteten Algorithmen und Ansätze können auch vorteilhaft bei unbemannten (atmosphärischen) Fluggeräten eingesetzt werden, beispielsweise bei Projekten im Rahmen des Luftfahrtforschungsprogrammes, was wirtschaftliche Auswirkungen im Sinne von Drittmiteinnahmen nach sich zieht.

9.4 Wissenschaftliche und technische Erfolgsaussichten

Die Ergebnisse von Astrone erweitern den Stand der Technik, ein zukünftiger praktischer Einsatz der erarbeiteten Algorithmen ist aus derzeitiger Sicht (TRL) möglich. Die offensichtliche Verwertungsperspektive des Vorhabens für die Universität Stuttgart besteht im Erkenntnisgewinn und Kompetenzaufbau für die Forschung, sowie in der Förderung der Lehre. Letzteres betrifft sowohl die Ausbildung von Doktoranden, als auch die Einbindung von Bachelor- und Masterstudenten im Rahmen von Abschlussarbeiten.

Im Rahmen dieses Vorhabens wurden insgesamt sechs studentische Hilfskräfte über längere Zeiträume beschäftigt sowie sieben Abschlussarbeiten betreut. Hierbei liegt die Besonderheit von Astrone in der Kombination von Systemtechnik (Mission und Gesamtsystem) und Technologie (Algorithmen) Auch der industrielle Konsortialführer trägt dazu bei, dass die studentischen Tätigkeiten in einem praxisnahen Umfeld stattfinden konnten.



Ein sehr wichtiger und nachhaltiger Aspekt ist die Verwertung projektspezifischer Inhalte in Lehrveranstaltungen. Die Erkenntnisse von Astrone finden dauerhaft Eingang beispielsweise in der Vorlesung „Applied Machine Learning for Engineers“.

Neben den bereits erfolgten Veröffentlichungen sind weitere Publikationen, insbesondere im AIAA Journal of Guidance, Control, and Dynamics geplant (diese Fachzeitschrift gehört zur Gruppe der drei besten weltweit im Bereich Aerospace Engineering). Diese geplanten Veröffentlichungen haben eine hohe Erfolgsaussicht, da dort insbesondere Themen gefragt sind, die auf ein realisierbares Ziel hinarbeiten, wie es hier der Fall ist. Damit würde sowohl Astrone als auch die Beteiligten Partner weitere internationale Sichtbarkeit bekommen.

Darüber hinaus sind weitere Vorträge bei verschiedenen internationalen Fachkonferenzen geplant (ESA GNC, AIAA SciTech, IFAC Aerospace). Auch dort finden Kooperationen zwischen Industrie und Universitäten im Rahmen von zukünftigen Missionen vergleichsweise große Beachtung, was die Sichtbarkeit im wissenschaftlichen Umfeld erhöht und somit die wissenschaftliche Stellung verfestigt.

9.5 Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit

Bereits während der Vorhabenlaufzeit von Astrone hat sich herauskristallisiert, dass an vielen Punkten der Algorithmen Entwicklung Methoden der Künstlichen Intelligenz unter Umständen große Vorteile bieten könnten. Um diese zu untersuchen, wurde bereits ein Anschlussprojekt, Astrone KI initiiert. Teststände und bestehende Algorithmen (als Vergleichsfälle) können dabei direkt genutzt werden.

Die Entwicklungen von Astrone sind durch relative strenge Autonomieanforderungen geprägt. Diese sind meistens in terrestrischen Szenarien nicht zu finden. Allerdings gibt es einige Ausnahmen. Hierzu gehören Flüge über der Erdoberfläche, die Berücksichtigung der an Bord verfügbaren Energie für die Bahnplanung oder die zuverlässige Bestimmung/Bestätigung von (Not-)Landeplätzen. Diese Themen sind im Rahmen der Entwicklung von höher automatisierten Flugtaxi oder autonomen Lastendrohnen sehr relevant. Hier wird eine weitere Anschlussfähigkeit gesehen.

10 Während der Durchführung des Vorhabens dem ZE bekannt gewordenen Fortschritts auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Uns sind keine Fortschritte bekannt, die Algorithmen für die Bewegungsplanung von Astrone oder agilen Vehikeln auf SSSBs im Allgemeinen betreffen.



11 Erfolgte oder geplanten Veröffentlichungen des Ergebnisses

Wissenschaftler des Instituts für Flugmechanik und Flugregelung konnten Beiträge über Erkenntnisse im Rahmen des Projekts auf verschiedenen nationalen und internationalen Konferenzen platzieren. Die Beiträge sind nach Konferenz sortiert aufgelistet:

ESA Conference on Guidance, Navigation & Control Systems

- Martin et al. „Astrone – GNC for Enhanced Surface Mobility on Small Solar System Bodies” In 11th International ESA Conference on Guidance, Navigation & Control Systems, 2021.

AIAA SciTech

- Olucak, Jan, Fabian Schimpf, Federico Pinchetti, and Walter Fichter. "Energy Aware Trajectory Generation for a Novel Cometary Lander Concept." In *AIAA Scitech 2022 Forum*, p. 0954. 2022.
- Schimpf, Fabian, Jan Olucak, and Walter Fichter. "Robust Landing Site Detection for Flight over Small Solar System Bodies." In *AIAA SCITECH 2022 Forum*, p. 0955. 2022.

DGLR Kongress

- “Funktionale Architektur für die Bewegungsplanung eines neuartigen Raumfahrzeugs zur Erkundung kleiner Himmelskörper”, Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress 2021
- “Challenges for Reliable Landings on Small Solar System Bodies”, eingereicht für den Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress 2022

Synergietreffen der DLR Explorer-Initiativen

- „AstroneKI – Autonomous GNC for Spacecraft Surface Relocations on Small Solar System Bodies“, Präsentation der Entwicklungen im Rahmen von Astrone und Ausblick über die Aktivitäten in Astrone KI

Eine Verwertung der diesjährigen SciTech Beiträge im Rahmen des Journal of Guidance Dynamics and Control wird angestrebt.

12 Quellen

- [1] „ASTRONE Agile autonome Forschungsplattform mit hoher Oberflächenmobilität -Teilvorhaben Astrone Bewegungsplanung- und Lenkung Vorhabenbeschreibung Institut für Flugmechanik und Flugregelung der Universität Stuttgart“. 20. Juni 2018.
- [2] F. Pinchetti, A. Joos, und W. Fichter, „Efficient continuous curvature path generation with pseudo-parametrized algebraic splines“, *CEAS Aeronaut. J.*, Bd. 9, Nr. 4, S. 557–570, Dez. 2018, doi: 10.1007/s13272-018-0306-3.
- [3] J. Olucak, F. Schimpf, F. Pinchetti, und W. Fichter, „Energy Aware Trajectory Generation for a Novel Cometary Lander Concept“, gehalten auf der AIAA SCITECH 2022 Forum, San Diego, CA & Virtual, Jan. 2022. doi: 10.2514/6.2022-0954.
- [4] F. Schimpf, J. Olucak, und W. Fichter, „Robust Landing Site Detection for Flight over Small Solar System Bodies“, *AIAA SciTech 2022*, S. 11.
- [5] A. E. Johnson, A. R. Klumpp, J. B. Collier, und A. A. Wolf, „Lidar-Based Hazard Avoidance for Safe Landing on Mars“, *J. Guid. Control Dyn.*, Bd. 25, S. 1091–1099, Nov. 2002, doi: 10.2514/2.4988.