

HiveR Mind – Konzeption eines Technologiedemonstrators für die schwarmbasierte Exploration des Mondes

Arvid Lunding¹, Maximilian von Unwerth², Kathrin Korte¹, Lennart Fox¹, Aditya Thakur³, Simona Silvestri³

NEUROSPACE GmbH¹, Hohenzollerndamm 152, 14199 Berlin

E-Mail: {arvid, kathrin, lennart}@neurospace.de

Technische Universität Berlin, Institut für Luft- und Raumfahrt², Marchstraße 12-14, 10587 Berlin

E-Mail: {maximilian.von.unwerth}@tu-berlin.de

Technische Universität Braunschweig, Institut für Raumfahrtssysteme³, Hermann-Blenk-Straße 23, 38108 Braunschweig

E-Mail: {simona.silvestri, aditya.thakur}@tu-braunschweig.de

Das “Sprungbrett Mond”, das den Zugang zu Mars und anderen Himmelskörpern des Sonnensystems erleichtern soll, rückt zunehmend in den Fokus aktueller Weltraummissionen. Einen wichtigen Beitrag zur Erschließung des Mondes soll das HiveR-Ökosystem leisten. Grundbaustein hierbei bildet der HiveR Rover, eine mobile Roboterplattform mit einem Nutzlastvolumen in Form eines CubeSats. Durch die Verwendung des CubeSat-Standards als Payload-Schnittstelle erschließen sich für die vielseitigen Rover der Berliner Firma Neurospace GmbH eine Vielzahl von Einsatzbereichen. In diesem Beitrag wird eine Navigationsnutzlast zur Durchführung einer schwarmbasierten Explorationsmission auf der Mondoberfläche präsentiert. Die Missionsziele, welche als Grundlage für die Ableitung von Anforderungen an die Navigationsnutzlast dienen, sind angelehnt an bestehende und geplante Mondmissionen. Zusätzlich zu einem Technologiedemonstrator wurde eine Simulation erstellt, in der mehrere mit der Nutzlast ausgestattete HiveR Rover in einer lunaren Umgebung simuliert werden können. Die auf ROS basierte Software der Nutzlast befähigt die Roboterplattform zur simultanen Positionsbestimmung und Kartierung, sowie zur autonomen Navigation und dient als Grundlage für die Entwicklung eines robusten kooperativen Multi-Agenten-Systems. Damit wird die Kollaboration mehrerer HiveR Rover im Schwarm und die Performance des HiveR Rovers in der lunaren Umgebung evaluiert. Das Ziel des Projekts ist es, die effiziente und kostengünstige Exploration des Mondes weiter zu fördern. Es eröffnet zahlreiche Nutzungsmöglichkeiten sowohl für die Forschung als auch in kommerziellen Szenarien und demonstriert, wie Anwendungen für die verschiedenen Einsatzbereiche voneinander durch gegenseitige Transfertechnologien profitieren können.

Keywords: Mond, Rover, Weltraumrobotik, Exploration, ISRU

1 Einleitung

Mit der Rückkehr des Menschen zum Mond spielen robotische Systeme eine zentrale Rolle in zunehmend komplexer werdenden Missionen. Insbesondere sollen lunare Rover autonom oder in Zusammenarbeit mit Astronautinnen und Astronauten lebenswichtige Rohstoffe erschließen, Infrastruktur aufbauen und warten, sowie wissenschaftliche Experimente durchführen. Zukünftige Missionen, wie sie etwa in der *LUNA Moon Analog Facility* der ESA und des DLR simuliert werden, fokussieren sich auf die Zusammenarbeit zwischen Mensch und Roboter und erforschen die Nutzung von Technologien, die die Erkundung und Besiedelung des Mondes ermöglichen. Derartige Projekte bilden die Grundlage für die weitere Erforschung des Sonnensystems, wie zum Beispiel zur Realisierung bemannter Missionen zum Mars. Ein Beispiel für solche robotischen Systeme stellt der HiveR Rover dar, der von der Berliner Firma NEUROSPACE GmbH entwickelt wird. Dieser Rover basiert auf dem CubeSat-Standard, welcher ursprünglich für Kleinsatelliten entwickelt wurde, und ermöglicht

die Nutzung kommerziell erhältlicher Komponenten (COTS). Dieser Standard hat sich in der Raumfahrt als äußerst kosteneffizient und flexibel erwiesen, da er bei der Entwicklung und dem Betrieb von Satelliten und nun auch Rover-Systemen auf bereits entwickelte, vorrätige und flugerprobte Standardkomponenten und Subsysteme zurückgreift. Der HiveR Rover ist eine mobile und modulare Plattform welche aufgrund ihrer Anpassbarkeit und Kosteneffizienz eine große Vielfalt an möglichen Einsatzszenarien ermöglicht. Dieses Paper basiert in Teilen auf den Arbeiten in [1] und folgt den einzelnen Schritten im Designprozess der Navigationsnutzlast. Im ersten Schritt werden mögliche Einsatzszenarien spezifiziert. Um an Hand dessen die weitere Entwicklung der HiveR Plattform zu planen, werden im Kapitel “Missionsziele” grundlegenden Aspekte der Mondoberflächenumgebung und der Raumfahrtmissionen mit Rovern, einschließlich der zukünftigen Pläne der NEUROSPACE GmbH beschrieben. Anschließend wird im Kapitel “HiveR Missionplan” die Entwicklung einer Beispielmission anhand dieser Missionsziele dargestellt. Hieraus wer-

den Anforderungen an die Navigationsnutzlast generiert, welche die Basis für die im Kapitel "HiveR Navigationsnutzlast" beschriebenen Entwicklungsschritte darstellen. In diesem Kapitel wird neben der Entwicklung des Technologiedemonstrators auch die Entwicklung der zugehörigen Simulation dargestellt. Das Kapitel "Erweiterungen" gibt einen Einblick auf kommende Erweiterungen des HiveR Ökosystems im Hinblick auf Schwarmintelligenz. Abschließend gibt das Kapitel "Fazit und Ausblick" eine Zusammenfassung der Arbeit und einen Ausblick auf mögliche Weiterentwicklungen wieder.

2 Missionsziele

In diesem Abschnitt wird anhand der aktuellen globalen Strategie zur Exploration des Mondes ein Überblick über aktuelle und geplante Missionen und deren Ziele gegeben. Diese dienen zur Aufstellung der Anforderungen für Abschnitt "HiveR Navigation Payload". In Unterabschnitt "Missionsplanung" werden darauf aufbauende Beispielmmissionen als mögliche Szenarien für die Nutzung des hier vorgestellten HiveR Mind Konzeptes ausgeführt.

„Das Artemis-Programm wird die erste Frau und den nächsten Mann auf der Oberfläche des Mondes landen lassen und zusammen mit internationalen und kommerziellen Partnern die nachhaltige Erforschung des Sonnensystems durch den Menschen einleiten.“ [2] Dies ist eines der großen Ziele des Artemis Programms der NASA, das die internationale Zusammenarbeit bei der Erforschung des Mondes und des weiteren Sonnensystems in den kommenden Jahren fördern sollen. Durch die Artemis Vereinbarungen verpflichten sich die Unterzeichnerstaaten zu gemeinsamen Normen für die friedliche und transparente Nutzung des Weltraums. Sie unterstützen die wissenschaftliche Zusammenarbeit und den Austausch von Daten, um neue Entdeckungen und Entwicklungen zu ermöglichen und die nachhaltige Erforschung des Mondes und darüber hinaus zu gewährleisten. Die Artemis Accords bieten einen Rahmen, um sicherzustellen, dass internationale Missionen zum Mond koordiniert und verantwortungsbewusst durchgeführt werden. Dies stellt einen klaren Unterschied zu vergangenen vor allem durch nationale Raumfahrtprogramme und Interessen getriebene Mondmissionen dar. [3] gibt einen Überblick über bisherige Missionen auf der Mondoberfläche. Basierend darauf soll die Rückkehr der Menschheit zum Mond ein Sprungbrett für zukünftige Missionen zu weiter entfernten Zielen im Sonnensystem werden. [4], [5]. [6] definiert den Begriff des *Training Ground Moon* als „multidisziplinäres Experimentierfeld von erheblicher wissenschaftlicher und technologischer Bedeutung für die zukünftige Raumfahrt.“

Die Global Exploration Roadmap [7] dient als Leitfaden zur konkreten Koordinierung internationaler Aktivitäten. Sie beschreibt Mondmissionen, welche unter Nutzung der geplanten Gateway-Station zur Erforschung derartiger benötigte Schlüsseltechnologien implementiert werden sollen. So könnte beispielsweise der Einsatz wiederverwendbarer Mondlander die Entwicklungskosten reduzieren und gleichzeitig in eine Betankungsinfrastruktur im Weltraum investieren. Darüber hinaus würden Fortschritte bei der Nutzung von Mondressourcen, die durch frühere robotische Missionen gestartet wurden, weiter ausgebaut und gefördert. Besonders im Vordergrund steht die Südpolregion des Mondes, da sich hier permanent beschattete Krater befinden, in denen Wassereis vermutet wird. Dieses würde eine wertvolle Ressource für zukünftige Mondmissionen darstellen, da es für die Gewinnung von Wasser, Sauerstoff und Treibstoff genutzt werden könnte. [8] Zudem bietet die Region durch die ständige Sonneneinstrahlung auf den umliegenden Plateaus ideale Bedingungen für die Nutzung von Solarenergie, was eine nachhaltige Erforschung und Besiedlung des Mondes erleichtern könnte.

Nicht nur aus wissenschaftlicher, sondern auch aus kommerzieller Sicht bietet der Mond neue Möglichkeiten. So betont auch SpaceX, dessen langfristiges Ziel die Durchführung von Marsmissionen ist [9], die strategische Bedeutung des Mondes als Zwischenschritt für die Entwicklung von Technologien und Infrastrukturen zur Unterstützung langfristiger Weltraummissionen: „Der Mond ist einer der nächsten bewohnbaren Nachbarn der Erde und bietet die Möglichkeit, wertvolle Erfahrungen für Missionen zum Mars und darüber hinaus zu sammeln“ [10]. Auch [6] beschreibt die wachsende Bedeutung des Mondes aus kommerzieller Sicht und gibt einen umfassenden Überblick über den potenziellen Einsatz miniaturisierter Roversysteme. Dabei werden die vier Bereiche Transport, Lunar Data, Ressourcennutzung und Weltraumtourismus als zentrale wirtschaftliche Sektoren identifiziert, die auf dem Mond in den kommenden Jahren von großer Bedeutung sein könnten.

3 HiveR Missionsplan

Aus den im vorherigen Kapitel beschriebenen globalen Zielen werden im Abschnitt "Missionsplanung" mögliche Ziele einer HiveR Rover basierten Mondmission abgeleitet. Anschließend wird an Hand dessen ein Missionsplan erstellt, welcher die aktuellen Bedürfnisse des Forschungs- und Industriesektors nach technischer Machbarkeit und möglichen Anwendungsgebieten des HiveR Rovers filtert. Der so entwickelte Missionsplan bietet außerdem Potential für mögliche Synergieeffekte, von denen die Entwicklung des HiveR Rovers für verschiedene Aufgabenberei-

che auf der Erde profitiert. Der Missionsplan führt zu Anforderungen an die zu entwickelnde Payload. Schlüsselanforderungen werden im Abschnitt "Anforderungen" beschrieben.

Missionsplanung

Um eine exemplarische Mission zu entwerfen, müssen mögliche Chancen für wissenschaftliche oder industrielle Erträge analysiert werden. Hierzu werden im Folgenden Beispiele für potenzielle Missionsziele für Rover mit kleinem Formfaktor sowie reale Missionen mit ähnlichen Zielen untersucht. Die vorgeschlagene Mondmission beinhaltet den Einsatz eines Schwarms von kleinen, heterogenen HiveR-Rovern. Jeder Rover ist mit spezialisierten Sensoren ausgestattet, die für gezielte Erkundungsaufgaben auf dem Mond optimiert sind. Drei Beispiele für Missionsziele sind:

1. Umfassende Kartierung der Mondoberfläche
2. Identifizierung potenziell ressourcenreicher Gebiete für die In-situ-Ressourcennutzung (ISRU)
3. Erkundung geeigneter Standorte für die Installation eines großflächigen Radioteleskops

Darüber hinaus beschreibt dieser Missionsplan die strategische Architektur und die Ziele der Mission sowie die Begründung für diese Ziele. Die folgende Auflistung zeigt Beispiele realer Missionen, die ähnliche Ziele erreicht haben, und dient als Vorlage für diesen Missionsplan.

Beispielmissionen Ein Beispiel für eine wichtige Mission zur Kartierung ist der Lunar Reconnaissance Orbiter (LRO) der NASA [11]. Alle Vorhaben für Missionen auf dem Mond hängen maßgeblich von der Qualität der vorliegenden Daten ab. Ein wesentlicher Bestandteil dieser Daten sind geologische und topografische Karten. Der LRO, welcher Karten der Mondoberfläche erstellt hat, ist hier ein hervorragendes Beispiel. In Kombination mit dem Lunar Exploration Neutron Detector (LEND) konnte der LRO potenziell ressourcenreiche Gebiete, wie zum Beispiel Wassereis in dauerhaft beschatteten Kratern nahe den Mondpolen, identifizieren [12].

Die Erkennung von Ressourcen auf dem Mond spielt eine bedeutende Rolle, da sie es ermöglicht, Gebiete mit potenziell wirtschaftlichem Nutzen zu identifizieren. Die Lokalisierung von Ressourcen wie Wassereis und wichtigen Mineralien ist unverzichtbar für die In-situ-Ressourcennutzung (ISRU) und eine nachhaltige Nutzung des Mondes. Eine präzise Kartierung dieser Ressourcen bildet die Grundlage, um die Planung und Optimierung der Ressourcengewinnung für zukünftige Missionen zu ermöglichen.

Aus den Kartendaten kann eine Gefahrenkartierung erstellt werden, welche die Identifikation und

Markierung von gefährlichen Gebieten auf der Mondoberfläche ermöglicht. Die Einstufung eines Gebiets als gefährlich ist dabei stark von der geplanten Nutzung abhängig. Diese entstehenden Informationen sind entscheidend für die Missionsplanung und die Sicherheit der Operationen. Sie helfen, gefährliches Terrain zu umgehen und so eine sichere Navigation für Rover, sowie zukünftige bemannte Missionen zu gewährleisten.

Ein weiteres relevantes Beispiel für ISRU, wenn auch von einem anderen Himmelskörper, ist die Marsmission des Perseverance Rovers. Der Perseverance Rover der NASA testet derzeit Technologien, die möglicherweise in der Lage sind, Sauerstoff aus der Marsatmosphäre zu gewinnen [13]. Dies ist ein wichtiger Schritt, um bei zukünftigen bemannten Missionen essentielle Ressourcen In-Situ zu gewinnen. Ein ähnliches Prinzip könnte auf den Mond angewendet werden. Auf dem Mond gibt es bereits Pläne für das FarView-Observatorium, dessen Strominfrastruktur größtenteils durch die Verwendung von ISRU-Technologien aufgebaut werden soll [14]. Diese Technologien würden es ermöglichen, Strukturen wie Solaranlagen, Batterien und Stromleitungen aus Mondregolith herzustellen.

ISRU wird zur Gewährleistung nachhaltiger Operationen auf extraterrestrischen Himmelskörpern vorteilhaft sein. Es reduziert die Menge an Material, das von der Erde mitgeführt werden muss, und bietet gleichzeitig eine wirtschaftliche Grundlage für langfristige Missionen. Die Nutzung lokal verfügbarer Ressourcen wie Wasser und Mineralien minimiert die Anzahl notwendiger Raketenstarts und ermöglicht gleichzeitig kürzere Versorgungszyklen, die zukünftige Mondmissionen wirtschaftlicher machen könnten [15].

Neben der Kartierung und der Ressourcenerkennung spielt auch die Auswahl geeigneter Standorte für wissenschaftliche Einrichtungen wie Radioteleskope eine entscheidende Rolle. Ein Beispiel hierfür ist das Konzept des Lunar Farside Observatory (LFO), das die Installation eines Radioteleskops auf der erdabgewandten Seite des Mondes vorsieht. Dort wäre das Teleskop vor irdischen Funkstörungen geschützt und könnte kosmische Emissionen im niedrigen Frequenzbereich untersuchen, die auf der Erde aufgrund der Filterwirkung der Atmosphäre nicht beobachtet werden können [16, 17].

Zusammenfassend basieren die Missionsziele auf der Notwendigkeit, die Mondoberfläche effizient zu erkunden, Ressourcen zu identifizieren und geeignete Standorte für wissenschaftliche Installationen zu bestimmen. Diese Daten bilden die Grundlage für die potenzielle ISRU sowie für sichere Navigationssysteme. Die Standortwahl für ein Radioteleskop auf der Mondrückseite unterstützt zudem die astronomische Forschung, indem sie den Vorteil der einzigartigen

Mondumgebung nutzt.

Durch den strategischen Einsatz von spezialisierten Rovern sollen die wissenschaftlichen und operativen Ziele dieser Mission optimal erreicht werden. Ein facettenreicher Ansatz, der Kartierung, Ressourcennutzung und Standortwahl kombiniert, schafft die Grundlage für nachhaltige und wissenschaftliche Mondmissionen.

Operationsgebiet Um einen Einblick in eine potenzielle Mission der HiveR Rover zu geben, wird eine Beispielmision skizziert, basierend auf den zuvor beschriebenen Zielen und Einsatzmöglichkeiten. Im ersten Schritt wird eine Landestelle ausgewählt. Diese Landestelle sollte ausreichend vor Radiofrequenzinterferenzen (RFI) niederfrequenter Wellen geschützt sein und eine hohe wissenschaftliche Bedeutung haben. Zusätzlich sollte die Wahrscheinlichkeit in unmittelbarer Nähe der Landestelle auf von für die ISRU nutzbaren Ressourcen zu treffen möglichst hoch sein. Ein Beispiel für eine solche Ressource ist gefrorenes Wassereis, welches für die Produktion von Sauerstoff und Raketentreibstoffen genutzt werden kann [18].

Um die unterschiedlichen Faktoren effizient zu priorisieren, müssen zum Teil gegenläufige Tendenzen analysiert werden.

1. Das Vermeiden von äquatorialen Gebieten minimiert thermische Effekte auf Raumfahrzeuge, Antennen und wissenschaftliche Instrumente [14], aber diese Areale bieten auf der erdabgewandten Seite des Mondes den höchsten Schutz gegenüber RFI [19]
2. Die Wahrscheinlichkeit Wassereis anzutreffen ist in den mit tiefen Kratern übersäten und dadurch zum Teil dauerhaft verschatteten, polaren Regionen sehr viel höher als in den Äquatorialen [20, 21], allerdings entsprechen viele dieser Gebiete nicht den Anforderungen nach niedrigen Neigungen, wenigen geologischen Strukturen, welche für die Errichtung eines Radioteleskops vorteilhaft sind. [14].
3. Weitere vorteilhafte Bedingungen für die Errichtung eines Radioteleskops [14]:
 - Hohe Krustendicke und gut durchmisches Regolith, um Interaktionen der Radioantennen mit unterirdischen Reflektoren zu minimieren.
 - Bevorzugte Landung auf einem flachen, topographisch hohen Punkt, um die Zugänglichkeit des Himmels zu maximieren.
 - Ein klarer Horizont mit einer 360°-Panoramaaussicht, um eine genaue Horizontbestimmung vom Teleskopstandort aus zu gewährleisten.

- Niedrige Neigungen, geringe Felsdichte und wenige geologische Strukturen.

Eine mögliche Landezone, welche diese Voraussetzungen erfüllt, ist das erdabgewandte Südpol-Aitken-Becken. Das Aitken-Becken gilt als das größte und älteste Einschlagbecken des Mondes [22] und bietet somit ein hohes Potential an wissenschaftlichem Ertrag. Ein möglicher Landeplatz innerhalb dieses Gebiets ist das Schrödinger-Becken, welches in Abbildung 1 dargestellt ist. Es erfüllt viele der genannten Punkte. Einerseits bietet es die Aussicht auf das Vorhandensein von Wasser in permanent beschatteten Bereichen, was für zukünftige In-Situ-Ressourcennutzung (ISRU) von großem Vorteil wäre [20, 21]. Darüber hinaus könnte die Geologie des Schrödinger-Beckens, das bis zu drei Kilometer der Mondkruste freilegt, wertvolle Einblicke in den Impaktverlauf und die Struktur des Mondes bieten [23]. Ein Nachteil des Schrödinger-Beckens ist jedoch die vergleichsweise schlechte Abschirmung gegenüber RFI, was die Messgenauigkeit beeinträchtigen könnte [24].

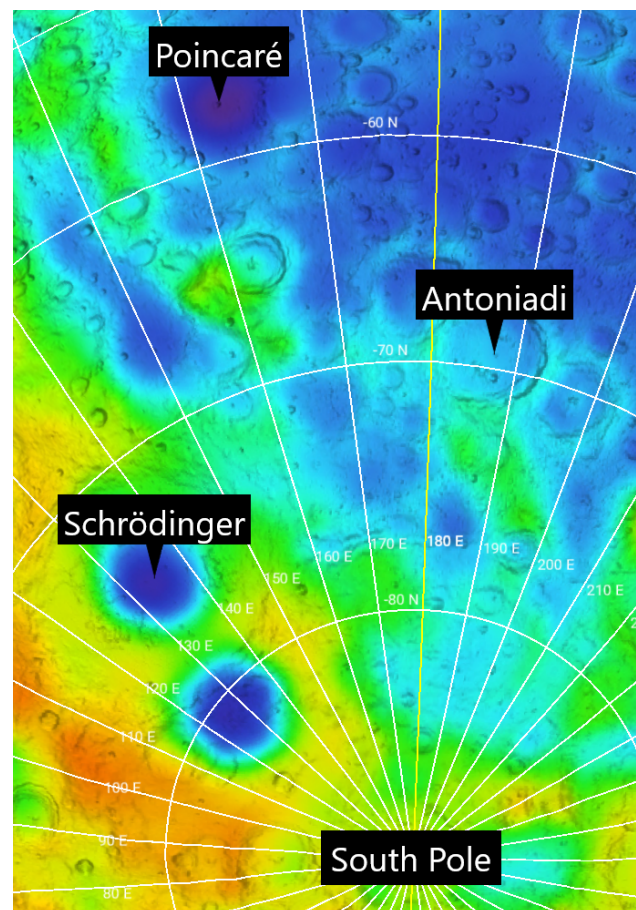


Abbildung 1: Krustendicke der drei möglichen Landeplätze am lunaren Südpol: Poincaré, Antoniadi und Schrödinger[25].

Ein weiterer potenzieller Landeplatz ist der Antoniadi-Krater, der ebenfalls wissenschaftlich interessant ist, da es Hinweise auf vulkanische Aktivitäten gibt, die eine genauere Untersuchung lohnenswert machen [26, 27]. Der Antoniadi-Krater bietet zudem eine bessere RFI-Abschirmung als das Schrödinger-Becken [25], jedoch liegt er mit einer Tiefe von etwa 7 km tiefer als Schrödinger (ca. 5 km), was die Kommunikation und die Abdeckung der Beobachtungsgeräte erschweren könnte. Diese Tiefe könnte dazu führen, dass das Auswahlkriterium "360°-Panoramaaussicht", nicht vollständig erfüllt wird.

Eine dritte Option wäre das Poincaré-Becken, das, ähnlich wie das Schrödinger-Becken, eine flache und ebene Oberfläche aufweist [28]. Es bietet die beste RFI-Abschirmung der drei in Frage kommenden Landeplätze und eine vergleichsweise geringere Tiefe, was Vorteile für Kommunikation und Messungen bieten könnte [28, 25]. Allerdings hat das Poincaré-Becken eine dünnere Kruste, was zu ungewollten Reflexionen der Radiowellen eines Teleskops führen kann.

Insgesamt bieten alle drei in Abbildung 1 dargestellten Landeplätze unterschiedliche Vor- und Nachteile: Während das Schrödinger-Becken mit der Aussicht auf Wasser und hohem wissenschaftlichen Ertrag punktet, bietet der Antoniadi-Krater eine gute RFI-Abschirmung, aber schwierige Geländebedingungen. Das Poincaré-Becken wiederum bietet eine flache Oberfläche und hervorragende RFI-Unterdrückung, weist aber eine dünnere Kruste auf, was es weniger attraktiv für die Nutzung als Radioteleskopstandort macht.

Zusammenfassung: Der Schrödinger-Becken wurde trotz seiner vergleichsweise schwächeren RFI-Unterdrückung als bevorzugter Standort ausgewählt, da das Potenzial für Wassereisvorkommen, die für die In-situ-Ressourcennutzung (ISRU) vorteilhaft sind, besonders vielversprechend ist.

HiveR Rover-Beispielmission

Das Schrödinger-Becken, dargestellt in Abbildung 2, misst etwa 313 km im Durchmesser und hat eine Tiefe von 4.7 km. Im Zentrum befindet sich ein weiterer Ring mit einem Durchmesser von rund 160 km, der auf frühere vulkanische Aktivität hinweist.

Die Landeellipse ist 18×8 km groß und entlang der Nord-Süd-Achse gestreckt, um größere Unsicherheiten entlang der Flugrichtung auszugleichen. Kleinere, präzisere Landeellipsen wären ebenfalls möglich, wie z.B. bei [29] mit einem Durchmesser von 1 km oder bei Chang'e-3 mit 6×6 km [30]. Die größere Ellipse bietet einen sicheren Abstand zu tiefen Rillen und Bergen und ist in Abbildung 3 dargestellt.

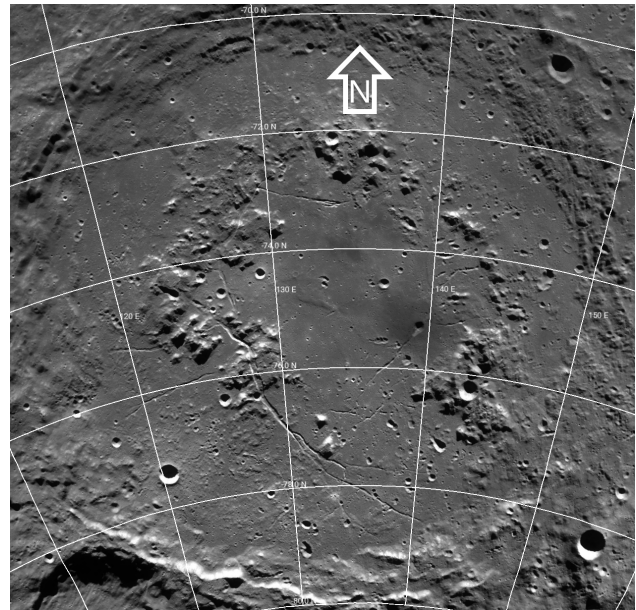


Abbildung 2: Schrödingers Becken [31].

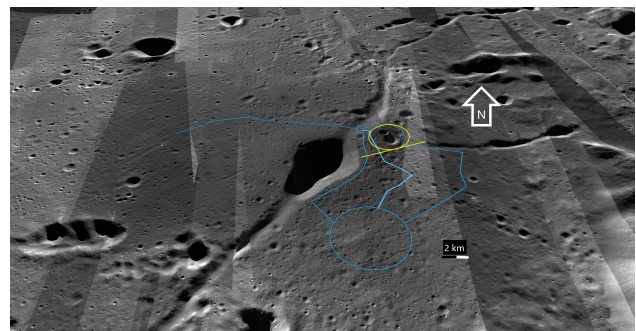


Abbildung 3: Grobe Pfadplanung der Beispielmission im Schrödinger Becken [31, 1]. Der hervorgehobene Pfad ist der Pfad der HiveR Queen (siehe Phase 0: Landung). Die gelbe Linie markiert den Wechsel zur Phase 2 und die entsprechende Missionszone ist gelb umkreist.

Phase 0: Landung Das Landefahrzeug setzt sieben Rover frei. Vier HiveR Rover sind mit Kameras ausgestattet, zwei HiveR Scouts besitzen bodendurchdringendes Radar, und die HiveR Queen dient als Netzwerkzentrale mit hochpräzise Radar und verbessert die Wahrnehmung durch LIDAR. Die HiveR Queen verfügt zudem über zwei On-Board-Computer, um das Risiko eines Missionsausfalls zu minimieren.

Phase 1: Wassersuche Die Rover erkunden das Gelände entlang vorgegebener Pfade. Zwei Teams aus je zwei HiveR Rovers und einem Scout untersuchen permanent beschattete Gebiete wie den Vulkanvent oder den Graben [20]. Die HiveR Queen kartiert den Untergrund und koordiniert die Kommunikation.

Phase 2: Ballistische Ejekta-Zone In Phase 2 untersuchen die Rover die Region um den gelb markierten Krater, der von jungem Ejekta bedeckt ist. Diese Region bietet wertvolle Einblicke in die pyroklastischen Schichten und die darunter liegende Mondoberfläche [29]. Die Rover kartieren gemeinsam, wobei die HiveR Queen den inneren Bereich detaillierter untersucht.

Phase 3: Rendezvous und FarView Die Rover treffen sich nach der Analyse der Ejekta-Zone und überqueren den Graben in eine flache Ebene, die als möglicher Standort für das FarView-Observatorium geeignet ist. Falls nötig, könnte ein Rover verwendet werden, um in den Vulkanvent hinabzufahren und Bilddaten zu sammeln. Schließlich erkunden die Rover das Gelände weiter, um Ressourcen für ISRU zu identifizieren, bevor sie ihre Mission fortsetzen, bis Energie oder Kommunikation versagen.

Anforderungen

Im Folgenden werden die verschiedenen Anforderungen an das Navigationssystem des HiveR-Rovers zusammengefasst, einschließlich ihres Ursprungs und ihrer Bedeutung für den Technologiedemonstrator. Die Anforderungen sind in funktionale, Leistungs-, Design- und Betriebsanforderungen unterteilt und nach ihrer Priorität bewertet. Diese reicht von 1 (sehr gering) bis 5 (sehr hoch) und spiegelt wider, wie relevant eine Anforderung für den Demonstrator ist. Anforderungen mit Priorität 1 sind für den Demonstrator nicht von Bedeutung und werden nur der Vollständigkeit halber aufgeführt, da sie bei einer zukünftigen Mission relevant sein könnten.

Funktionale Anforderungen: Die wichtigsten Anforderungen (Priorität 5) beziehen sich auf die Erstellung von Karten und die Übertragung von Daten zur HiveR Queen, da dies für die Erreichung der Missionsziele entscheidend ist. Weitere funktionale Anforderungen mit hoher Priorität (z.B. Lokalisation, Odometrie-Modi und Fehlerkorrektur) erhöhen die Genauigkeit und Zuverlässigkeit des Systems, sind jedoch für die grundlegende Funktionalität nicht unbedingt erforderlich.

Leistungsanforderungen: Anforderungen wie die Positionsgenauigkeit und Höhenbestimmung (Priorität 5) sind entscheidend, um wissenschaftliche Entdeckungen mit präzisen Koordinaten auf dem Mond zu verknüpfen und zukünftige Missionen zu planen. Andere Leistungsanforderungen, wie die Datenübertragungsrate (Priorität 3), sind ebenfalls wichtig, aber nicht kritisch, da eine langsamere Navigation mögliche Verzögerungen kompensieren kann.

Designanforderungen: Diese Anforderungen ergeben sich hauptsächlich aus der CubeSat-Plattform des HiveR-Rovers. Dies betrifft unter anderem die Größe, Montage und Stromversorgung (Priorität 5). Ebenso sind Anforderungen wie die Upgrade-Fähigkeit, Kompatibilität mit dem ROS2 Framework des HiveR Ökosystems und thermische Kontrolle wichtig, um die Flexibilität und Betriebsfähigkeit des Systems sicherzustellen.

Betriebliche Anforderungen: Besonders relevant ist der Energieverbrauch (Priorität 4), um eine effiziente Missionsdurchführung zu gewährleisten. Anforderungen wie der Betrieb bei extremen Temperaturen oder das Überleben während der Mondnacht sind hingegen für den Technologiedemonstrator von sehr geringer Bedeutung (Priorität 1), da die Tests auf der Erde durchgeführt werden.

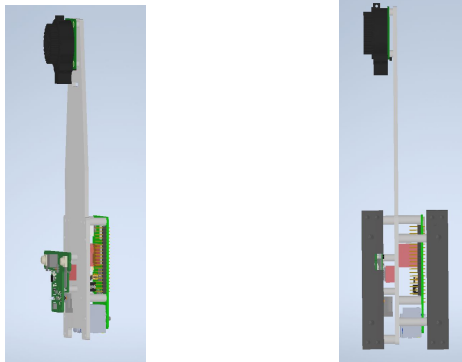
Die Priorisierung zeigt, dass der Fokus des Demonstrators auf grundlegenden Navigations- und Kommunikationsfunktionen liegt, während die für den Mondbetrieb relevanten Umwelanforderungen eine untergeordnete Rolle spielen.

4 HiveR Navigationsnutzlast

Dieser Abschnitt beschreibt, wie anhand der im vorherigen Kapitel definierten Anforderungen und unter Zuhilfenahme von selektierten Lösungen, der Technologiedemonstrator entwickelt wird. Hierfür werden einzelne Designaspekte der HiveR Rover Navigationsnutzlast vorgestellt. Dabei werden die Bausteine *Visuelle Systeme*, *Wärmemanagement*, *Navigationscomputer* und einzelne Softwarepakete beschrieben, wobei auf Funktionsweisen und Auswahlkriterien eingegangen wird. Um die Möglichkeiten eines robotischen Schwarms aus HiveR Rovern, ausgerüstet mit der Navigationsnutzlast, kosteneffizient und in einem frühen Entwicklungsstadium zu testen, wurde eine Simulation erstellt. Die Simulation, in der zwei HiveR Rover kollaborativ eine Umgebungskarte erstellen, wird in Abschnitt "Simulation" beschrieben.

Visuelle Systeme Als Sensor zur Erzeugung wissenschaftlicher Bilddaten und der Generierung von Karten wurde für den Aufbau eines Technologiedemonstrators eine OAK-D Stereokamera gewählt, welche eine kostengünstige 3D-Bildgebung ermöglicht. Diese Kamera wurde modifiziert, um den Designanforderungen (Größe) zu entsprechen und in die 1U-CubeSat-Abmessungen des Rovers zu passen. Hierfür wurde die Verkleidung inklusive der integrierten Radiatoren entfernt, wie in Abbildung 4a zu erkennen ist. Die integrierte IMU in der OAK-D Kamera unterstützt die Sensorfusion, was zur Erfüllung von der funktionalen Anforderung nach Fehlerkorrektur und -minderung beiträgt. Eine zusätzliche Raspberry Pi

Kamera mit Langstreckenobjektiv dient der Langstreckendatenerfassung und erhöht die Redundanz des Systems.



(a) CAD Rendering des Kameramast mit OBC und OAK-D Kamera.

(b) Seitliche Ansicht eines CAD Rendering der Navigationsnutzlast. Schwarze Module sind physikalische Schnittstellen zur HiveR Rover Struktur

Abbildung 4: CAD Renderings der Navigationsnutzlast in denen die Wärmeschnittstellen zwischen Kamera und OBC und Kameramast durch rote Blöcke dargestellt sind.

Wärmemanagment Durch den Umbau der OAK-D Stereo Kamera ist ein verlässliches Wärmemanagment für dieses System, sowie auch für den On-Board-Computer (OBC) nötig. Das Wärmemanagment sollte möglichst energieeffizient sein und ohne weitere Energie verbrauchende Systeme auskommen. Die implementierte Lösung ist in Abbildung 4 dargestellt und nutzt den Mast auf dem die Langstreckenkamera montiert ist als Radiator. Wärmezeugende Komponenten innerhalb der Nutzlast leiten über die in der Abbildung rot markierten Schnittstellen mittels Konduktion Wärme in den Kameramast ab. Der Kameramast ragt aus der umschlossenen Nutzlastbucht des HiveR Rover hinaus und führt schlussendlich die aufgenommene Wärme mittels Konvektion über die umströmende Luft und mittels Strahlung an die Umgebung ab. Ein Vorteil dieser Lösung ist, dass der generelle Mechanismus theoretisch ebenso in der realen Mondumgebung anwendbar wäre, wobei die Wärmeabfuhr mittels Konvektion wegfallen würde.

Navigationscomputer Um die Navigationsnutzlast als ein in sich geschlossenes System aufzubauen, welches eine einfache Integration mit dem restlichen HiveR Rover BUS und Software ermöglicht, wurde eine dedizierter Navigationscomputer gewählt. Dieser Ansatz ermöglicht ebenfalls eine Verbesserung der Rechenleistung an Bord des HiveR Rovers und minimiert die Gefahr eines Totalausfalls des Rovers

durch eine Überlastung oder durch Ausfallen des OBCs. Der Navigationscomputer wird in diesem Technologiedemonstrator durch einen Raspberry Pi 4 dargestellt, da er eine kostengünstige Plattform mit den für die Sensorik nötigen Anschlüssen ist.

Die Software der HiveR Rover Navigationsnutzlast besteht aus vier Hauptsoftwarekomponenten, deren einzelne Pakete und Datenflüsse in Abbildung 6 dargestellt sind [1].

Datengenerierung Die Datengenerierung umfasst die 3D-Bilder der OAK-D-Kamera, die Bilder der Raspberry Pi-Kamera und die IMU-Daten. Diese werden von der Navigationsnutzlast empfangen und weiter verarbeitet.

Lokalisation Für eine erfolgreiche Mission ist es, wie bereits in den funktionalen Anforderungen erwähnt, eine möglichst genaue Pose des Rovers zu besitzen. Für den Technologiedemonstrator werden zwei Posen nach ROS Enhancement Protocol 105 [32] ermittelt :

- **Lokale Pose:** Eine relative Pose des Rovers wird mittels Odometrie aus der Fusion von Stereokameradaten und der IMU generiert.
- **Globale Pose:** Die globale Pose des Rovers wird unter Verwendung des *rtabmap_slam* [33]-Pakets erstellt. Dieses Softwarepaket generiert dabei dreidimensionale Karten der Umgebung und lokalisiert den Rover in ihnen.

Hinderniserkennung Da auf dem Mond zwischen unüberwindbaren Hindernissen und befahrbaren Steigungen unterschieden werden muss, reicht eine einfache Filterung nach der Höhe von Objekten nicht aus. Zur Hinderniserkennung auf dem Technologiedemonstrator wird deswegen ein Ansatz genutzt, bei dem zusätzlich zur Höhe eines Objekts seine Oberflächennormalen analysiert werden, um Gebiete und Objekte mit geringen Steigungen nicht als Hindernis in die zur Navigation genutzten Kostenkarten einzutragen. Dies wird ebenfalls vom *rtabmap*-Paket übernommen.

Pfad- und Trajektorienplanung Wird durchgeführt vom *move_base*-Paket und beinhaltet lokale und globale Pfadplanung sowie Hindernisvermeidung. Die lokale Pfadplanung wird vom Timed Elastic Band (TEB) Planer durchgeführt [34]. Für den Anwendungsfall mit dem HiveR Rover hat sich der TEB Planer in einem vorherigen Test mit der im Abschnitt "Simulation" beschriebenen Simulation gegenüber dem Dynamic Window Approach (DWA) [35] als überlegen gezeigt. Eine Analogie zum Wirkprinzip des TEB Planers ist

ein Gummiband, dass zwischen der derzeitigen Po-
se des Rovers und der momentanen lokalen Zielpo-
se gespannt wird. Hindernisse entlang des Pfades
bewirken eine abstoßende Kraft auf das Band, des-
sen Elastizität die zurückzulegende Strecke möglichst
kurz halten möchte und verformen somit den Pfad,
welcher in Abbildung 5 dargestellt ist.

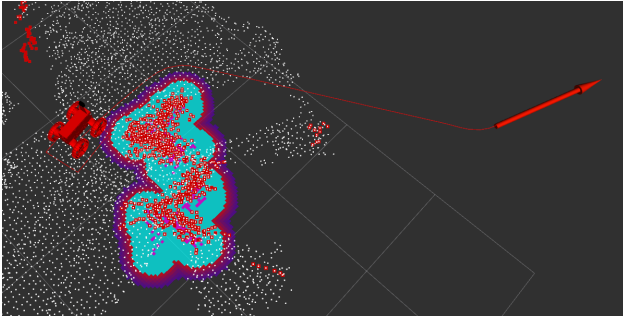


Abbildung 5: HiveR Rover weicht in der Simulation einem detektiertem Hinderniss (rote Punkte) aus [1].

Dies führt zu glatten Trajektorien, verbraucht aber auch mehr Ressourcen als der DWA Planer. Die globale Pfadplanung wird mittels der Standard-Pfadplanung des ROS Navigation Stacks durchgeführt, der einen Dijkstra Algorithmus nutzt [36]. Im Gegensatz zur lokalen Trajektorienberechnung wird bei der globalen Pfadplanung lediglich ein Pfad und kein Bewegungsverlauf des Rovers berechnet.

HiveR System Nach Feststellung der benötigten Softwarekomponenten werden diese auf die verschiedenen Rechner im HiveR Netzwerk, bestehend aus HiveR Queen, HiveR Scout OBC und HiveR Scout Navigationcomputer verteilt. Die Datengenerierung wird, wie im Schaubild 6, auf dem Navigationcomputer durchgeführt. Auf diesem werden auch die Odometriedaten generiert. Dies hat den Vorteil, dass bei einem Betrieb ohne Kartenerstellung und autonome Navigation nur die relative Pose des Rovers und keine 3D-Kameradaten über das Netzwerk übertragen werden müssen und dieses somit entlastet wird. In diesem Modus ist es dem Operator immernoch möglich die Bewegung des Rovers auf der Bodenstation nachzuvollziehen. Aus Gründen der Netzwerkentlastung und Unabhängigkeit einzelner HiveR Scouts von der Queen wäre es von Vorteil auch die restlichen Softwarekomponenten, wie der globalen Lokalisation, Kartenerstellung und Hindernisserkennung, direkt auf dem Navigationscomputer des HiveR Scouts laufen zu lassen, allerdings zeigten durchgeführte Tests dieser Konfigurationen, dass es hierbei zu einer sehr hohen CPU-Auslastung des Navigationscomputers kommt, was zu sehr geringen Datenraten führt. Da es bei kabellosen Übertragungstests von 3D Kameradaten zwischen dem HiveR Scout und der

HiveR Queen zu starken Verzögerungen unter ROS 2 kam, wurde das Navigationssystem auf ROS umgesetzt. Dies führt dazu, dass eine ROS Bridge benötigt wird, welche die Bewegungsbefehle der HiveR Queen in das ROS2 Netzwerk des HiveR OBCs überführt und in Abbildung 6 mit einer Wellenlinie dargestellt wird.

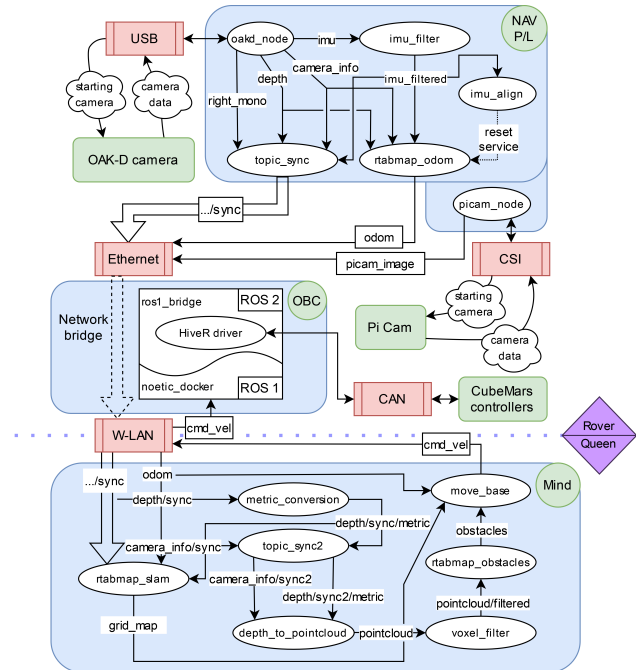


Abbildung 6: HiveR-Netzwerk einschließlich der gerichteten Datenflüsse. Computersysteme sind durch einen grünen Kreis markiert. Ellipsen stellen Programme und Pakete dar und rote Markierungen stehen für Schnittstellen und Busse. Die CubeMars Controller sind die Controller der Antriebsmotoren. Die gestrichelte, violette Linie symbolisiert die physische Trennung zwischen den Bordkomponenten der HiveR-Rover und dem Navigationscomputer der HiveR Queen, genannt HiveR Mind.[1]

Simulation

Zum Testen der Navigationspayload mit mehreren HiVeR Rovern in einer Mondumgebung wurde eine Simulation erstellt. Hierfür wurden analog zu den Anforderungen an die Nutzlast Anforderungen an die Simulation aufgestellt. Diese sind gegliedert in:

- **Missionsziele:** Anforderungen, die sich aus den Missionszielen der Beispielmision ergeben.
- **Simulierte Umgebung:** Anforderungen die darauf abzielen die Simulation möglichst nah an der realen Umgebungen zu halten.
- **Rovermodell:** Anforderungen, die dafür sorgen, dass der HiveR Rover und die Navigation Payload möglichst realitätsnah abgebildet werden.

- **Simulierte Software:** Anforderungen, die beschreiben, wie nah welche Softwarekomponenten an der realen Software sein sollen. Hierzu gehört beispielsweise die Austauschbarkeit von Softwarekomponenten zwischen der Simulation und der realen Anwendung.
- **Nutzerinteraktion:** Anforderungen, welche ein möglichst hohes Maß an Upgradbarkeit und Ergonomie gewährleisten, um die Simulation auch für kommende Entwicklungen nutzen zu können.

Bausteine Die Simulation wurde in der physikbasierten Simulationsumgebung Gazebo erstellt, da diese eine gute ROS Anbindung besitzt. Nahezu alle Softwarepakete wurden eins zu eins in die Simulation überführt. Ausnahmen bildet die fehlende physische Trennung zwischen der HiveR Queen und dem HiveR Scout, dargestellt in Abbildung 6, die ROS Bridge und die Fortbewegung. Dies führt zu einem Simulationsnetzwerk, das in Abbildung 7 dargestellt ist.

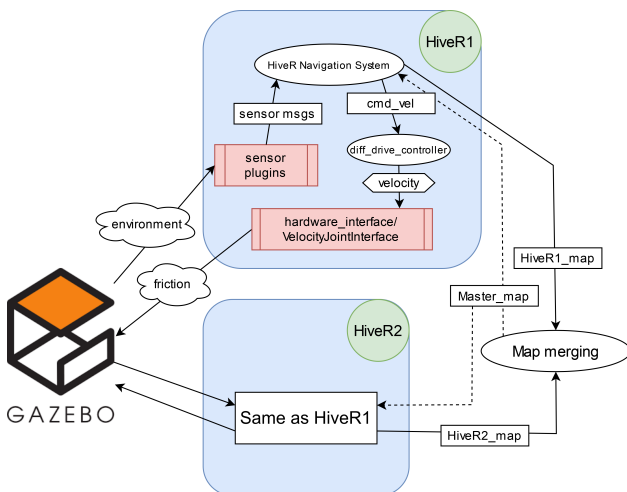


Abbildung 7: HiveR Simulations-Netzwerk mit zwei HiveR Rovern, die gemeinsam eine Karte erstellen [1].

Die Fortbewegung wird abstrahiert indem die Bewegungsbefehle, welche in der Realität an den *HiveR Driver* gehen, an ein Interface gesendet werden, dass die Räder rotiert. Die Räder bewegen dann den Rover durch die Reibung mit der simulierten Mondoberfläche. Die Sensoren wurden mit Hilfe der Gazebo Sensor Plugins simuliert, wobei die Parameter der entsprechenden Sensoren, wie beispielsweise die Auflösung, möglichst nah an der Realität gehalten werden. Zur weiteren Verminderung des Simulation-Reality-Gaps wurde normalverteiltes Rauschen auf die Sensordaten aufgebracht. Für die Mondoberfläche wurde eine von [37] generierte Rekreation der Apollo 15 Landezone genutzt, in wel-

cher der Reibungskoeffizient der Oberfläche angepasst wurde [38]. Diese Umgebung besitzt bereits eine entsprechend richtige Beschleunigung aufgrund der Anziehungskraft von 1.62 m s^{-2} und bietet mehrere Erhebungen und Krater, wie in Abbildung 8.

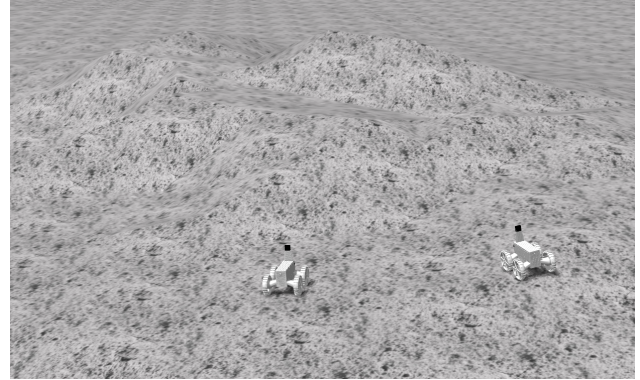


Abbildung 8: Simulationsumgebung mit zwei HiveR Rovern, mit integrierter Navigationsnutzlast und Blickrichtung auf eine Erhebung [1].

Kartenfusion Jeder HiveR Rover generiert mittels des *rtabmap*-Paketes eine Karte seiner Umgebung. Um von einem Rover entdeckte Hindernisse und interessante Areale auf andere Rover im Schwarm zu beziehen, werden die Karten miteinander fusioniert. Hierfür wird der Normal Distribution Transform Algorithmus (NDT) genutzt [39]. NDT nutzt, ähnlich der *rtabmap* Hindernisserkennung, die Normalen der Bildpunkte der dreidimensionalen Karten um diese möglichst nah aneinander anzupassen. Gegenüber Methoden wie Iterative Closest Point, welche eine möglichst geringe Abweichung zwischen zwei nächstgelegenen Punkten anstrebt, bietet NDT eine erhöhte Robustheit bei ursprünglichen Abweichungen der dreidimensionalen Karten. Das Ergebnis einer autonomen Fahrt mit einer auf diese Weise fusionierten Karte ist in Abbildung 9 dargestellt.

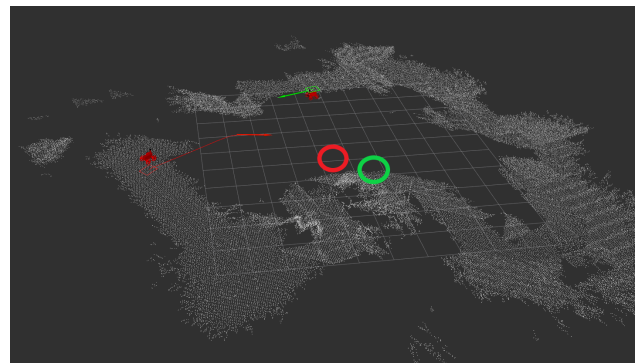


Abbildung 9: Zwei Rover erstellen eine gemeinsame Karte innerhalb der Simulation [1]. Ihre derzeitigen globalen Wegpunkte sind mit Pfeilen und ihre Startposition mit Kreisen markiert.

Anwendungsgebiete und Beispielapplikationen

Der Bedarf an einer mobilen robotischen Plattform mit autonomen Navigationsfähigkeiten und der Möglichkeit zur Kollaboration in Multi-Roboter-Systemen ist in allen Entwicklungsstufen des HiveR Rover Systems hoch. Für akademische Zwecke bietet eine solche Plattform die Möglichkeit, neuartige Verfahren zur Kontrolle von Multi-Agenten-Systemen zu erforschen, etwa in der Optimierung von Schwarmintelligenz oder zur Simulation von kooperativem Verhalten in heterogenen Roboternetzen. Industrielle Einsätze umfassen unter Anderem die Überwachung und Inspektion von Industrieanlagen, bei denen Roboter nicht nur visuelle und sensorische Inspektionen durchführen, sondern auch Reparaturaufgaben übernehmen oder Maschinenstati in Echtzeit überwachen. Zudem kann die Plattform zum Transport von Gütern oder Werkzeugen innerhalb von Industrieanlagen verwendet werden, etwa in Lagerhallen oder Produktionsstraßen, um logistische Abläufe zu optimieren.

Ein weiteres zentrales Anwendungsgebiet ist die Exploration unbekannter, für den Menschen zu gefährlicher Gebiete. Dies umfasst die Erforschung tiefer Minen, die Inspektion von havarierten Kernkraftwerken nach Unfällen oder generell die Aufklärung in Katastrophengebieten, in denen chemische, biologische oder radioaktive Gefahren bestehen. Hier können mobile Roboter zur Erkundung, Probenentnahme oder zur Suche nach Überlebenden eingesetzt werden. In vollständig lebensfeindlichen Umgebungen, wie auf der Mondoberfläche oder in anderen extraterrestrischen Szenarien, könnte die Plattform zur Errichtung von Infrastruktur, der Ressourcenerkundung oder der Unterstützung von Astronauten durch den Transport von Werkzeugen und Materialien dienen. Solche Anwendungen demonstrieren die Vielseitigkeit und den hohen Nutzen einer robusten, autonomen und kollaborativen mobilen Roboterplattform in unterschiedlichsten Bereichen.

Einen detaillierteren Einblick in weitere Applikationen und zu den verschiedenen Entwicklungsstufen des HiveR Rovers gibt [3].

5 Erweiterungen

Das hier vorgestellte HiveR Mind System wird zur Verwendung in einem Multi-Agenten-System weiterentwickelt, um die Koordination und Kommunikation von Agenten innerhalb beliebig großer Roboterschwärme zu ermöglichen. Im Rahmen eines Folgeprojektes, in Zusammenarbeit von NEUROSPACE GmbH und der System Analysis and Modeling Group am Hasso Plattner Institut, wird die theoretische Grundlage für ein robustes kooperatives Multi-Agenten-System entwickelt. Das Multi-Agenten-System wird zunächst digital in einer 2D-Gridworld simuliert, um die Funktionstüchtigkeit des zugrundeliegenden Reinforcement-Learning-Algorithmus vor der

Übertragung in die 3D-Simulation, zu gewährleisten. Dazu werden die einzelnen HiveR Rover als Agenten in einer dynamischen Umgebung mit verschiedenen Hindernissen, Startpunkten und Zielsetzungen dargestellt. Das Training innerhalb der bereits erstellten Simulation spart dabei Zeit und Ressourcen, da viele Testdurchläufe ohne hohe Kosten und in einer geringen Zeitspanne durchgeführt werden können.

Im Fokus steht bei dem entwickelten Ansatz eine erhöhte Robustheit des Systems, durch biologisch inspirierten Informationsaustausch unter den Agenten mithilfe von Transfer Learning. Vor allem in Anwendungen in denen minimales Eingreifen von Menschen gewünscht ist, ermöglicht eine erhöhte Robustheit des Schwarmalgorithmus zuverlässiges Erkunden, Navigieren und Ausführen verschiedener Aufgaben. Die Heterogenität des Schwarms ist dabei auch von Vorteil, da unterschiedliche HiveR-Rover Typen unterschiedlich robustes Verhalten zeigen können. Dies ermöglicht eine Optimierung von explorativem und exploitativem Verhalten für das Gesamtsystem, was eine gängige Herausforderung von Multi-Agenten-Systemen darstellt. Unterschiedliche Eigenschaften und Zielsetzungen von Agenten ermöglichen so zum Beispiel risikoreiche Aktionen gezielt zu verteilen. Der Transfer-Learning Mechanismus sorgt, beispielsweise nach dem Erkennen von neu entdeckten Hindernissen, für das gezielte Kommunizieren dieser Information und seiner Bewältigungsstrategie, mit den Agenten für die dies relevant ist. Im simulierten Training werden dafür durch gezieltes Erproben von verschiedenen Aktionen/Strategien Kausalzusammenhänge entdeckt, um so ein zuverlässigeres Verständnis über die Umwelt und Störfaktoren zu gewinnen. Jede Interaktion eines Agenten mit einem Hindernis löst dabei eine Reihe von Interventionen der zuvor erlernten Strategie aus, wodurch das beste Verhalten in zuvor unbekannten Situationen, auf dem Weg zum individuellen Ziel, entdeckt werden kann. Je nach Ähnlichkeit der Zielsetzungen und Positionen einzelner Agenten, kann dann ein Wissens- und Strategietransfer, basierend auf einer zuvor berechneten Ähnlichkeitsmetrik zwischen den Agenten, erfolgen. Der noch recht neue Einsatz von Causal-Discovery-Algorithmen in Kombination mit Reinforcement-Learning soll so auch die robuste Bewältigung von zuvor unbekannten Situationen ermöglichen.

Eine Beispielanwendung für die Verwendung eines solchen Roboterschwarmes ist der Aufbau eines mondumspannenden verteilten Kommunikationssystems, welches als notwendige Infrastruktur für zukünftige Mondmissionen und als Beispiel für benötigte Systeme auf der Marsoberfläche dienen könnte. Darüber hinaus könnte ein Schwarm von Robotern auch für die Exploration schwer zugänglicher Regionen, wie der Krater am Südpol des Mondes, ein-

gesetzt werden, um Ressourcen zu erkunden oder eine Basisinfrastruktur für menschliche Außenposten aufzubauen. Das HiveR Mind System bietet dabei die technologische Grundlage für eine effiziente Selbstorganisation der Agenten, wodurch komplexe Aufgaben in der Weltraumumgebung mit minimaler menschlicher Intervention ausgeführt werden können.

6 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Anhand der wissenschaftlichen und wirtschaftlichen Nachfrage an Mondexplorationsrobotern konnte ein kosteneffizienter Technologiedemonstrator im CubeSat-Format entwickelt werden. Hierbei wurde anhand von bisherigen und geplanten Missionen eine für den HiveR Rover zugeschnittene Beispielmission erstellt, aus der entsprechende Anforderungen an den Rover abgeleitet wurden. Der hieraus entwickelte Technologiedemonstrator ist ein Grundbaustein für mögliche Weiterentwicklungen des HiveR Rovers, sowohl für Anwendungen auf der Erde als auch auf dem Mond. Er ist ein weiterer Schritt in die nächste Entwicklungsstufe des HiveR Rovers, indem er Weiterentwicklungen zum Betrieb als Anlagenüberwachungsroboter oder als Testplattform für unterschiedliche Navigationsplaner begünstigt [3]. Zusätzlich bietet die entwickelte Simulation eine Umgebung für weitere Upgrades, wie den im Kapitel "Erweiterungen" beschriebenen Schwarmalgorithmus. Die Simulation spart während der Entwicklungszeit Kosten und die Zeit, welche durch die Fertigung neuer HiveR Rover und komplizierter Testaufbauten entstehen würden. Der Technologiedemonstrator bildet somit die Grundlage für eine flexible und erweiterbare Plattform, die sowohl für den Einsatz auf der Erde als auch für die zukünftige Mondmissionen optimiert ist. Mit der Kombination aus Simulation und praktischen Missionstests ist der HiveR Rover bestens gerüstet, um die Anforderungen an moderne mobile Robotersysteme zu erfüllen und weiterzuentwickeln.

References

- [1] ARVID LUNDING ; INSTITUTE OF SPACE SYSTEMS (TU BRAUNSCHWEIG), NEUROSPACE GMBH (Hrsg.): *Conception of a compact sensor payload for the navigation of the CubeSat-based mobile robot HiveR*. 2024
- [2] ACCORDS, Artemis: *The Artemis Accords: Principles for cooperation in the civil exploration and use of the Moon, Mars, comets, and asteroids for peaceful purposes*. 2020
- [3] MAXIMILIAN VON UNWERTH ; LENNART FOX ; TOBIAS PLANITZER ; ARVID LUNDING ; ROBERTH MAHONEY ; CLAUDIO GEISERT ; NIKOS KOUTRAKIS ; SIMON STAPPERFEND ; ENRICO STOLL: *HiveR – Eine gestaffelte Roverplattform für die Entwicklung von Experimenten zur Nutzung des Training Ground Moon*. 2023
- [4] ESA: *ESA - Europe's first steps on the Moon: the Lunar Lander*. https://www.esa.int/Science_Exploration/Human_and_Robotic_Exploration/Exploration/Europe_s_first_steps_on_the_Moon_the_Lunar_Lander
- [5] *Stepping stone - Aerospace America*. <https://aerospaceamerica.aiaa.org/departments/stepping-stone/>. Version: 2019
- [6] UNWERTH, Maximilian von ; FOX, Lennart ; MANTHEY, Max ; MAHONEY, Robert ; STAPPERFEND, Simon ; KOLEK, Igor ; STOLL, Enrico ; SELVANATHAN, Irene: Application of CubeSat Technologies for Research and Exploration on the Lunar Surface. In: *Advances in Astronautics Science and Technology* 6 (2023), Nr. 2-4, S. 57–72. <http://dx.doi.org/10.1007/s42423-023-00144-w>. – DOI 10.1007/s42423-023-00144-w. – ISSN 2524-5252
- [7] ISECG: *The Global Exploration Roadmap Supplement August 2020: Lunar Surface Exploration Scenario Update*. https://www.globalspaceexploration.org/wp-content/uploads/2020/08/GER_2020_supplement.pdf. Version: 8 2020
- [8] SMITH, Marshall ; CRAIG, Douglas ; HERRMANN, Nicole ; MAHONEY, Erin ; KREZEL, Jonathan ; MCINTYRE, Nate ; GOODLIFF, Kandyce: The Artemis program: an overview of NASA's activities to return humans to the moon. In: *2020 IEEE aerospace conference IEEE*, 2020, S. 1–10
- [9] MUSK, Elon: Making humans a multi-planetary species. In: *New Space* 5 (2017), Nr. 2, S. 46–61
- [10] <https://www.spacex.com/humanspaceflight/moon/>
- [11] VONDRAK, Richard ; KELLER, John ; CHIN, Gordon ; GARVIN, James: Lunar Reconnaissance Orbiter (LRO): Observations for Lunar Exploration and Science. In: *Space Science Reviews* 150 (2010), Nr. 1-4, S. 7–22. <http://dx.doi.org/10.1007/s11214-010-9631-5>. – DOI 10.1007/s11214-010-9631-5. – ISSN 1572-9672
- [12] SANIN, A. B. ; MITROFANOV, I. G. ; LITVAK, M. L. ; MALAKHOV, A. ; BOYNTON, W. V. ; CHIN, G. ; DROEGE, G. ; EVANS, L. G. ; GARVIN, J. ; GOLOVIN, D. V. ; HARSCHMAN, K. ; MCCLANAHAN, T. P. ; MOKROUSOV, M. I. ; MAZARICO, E. ; MILIKH, G. ; NEUMANN, G. ; SAGDEEV, R. ; SMITH, D. E. ; STARR, R. D. ; ZUBER, M. T.: Testing lunar permanently shadowed regions for water ice: LEND results from LRO. In: *Journal of Geophysical Research* 117 (2012), Nr. E12, S. n/a–n/a. <http://dx.doi.org/10.1029/2011JE003971>. – DOI 10.1029/2011JE003971. – ISSN 01480227
- [13] MCCLEAN, John B. ; HOFFMAN, Jeffrey A. ; HECHT, Michael H. ; ABOOBAKER, Asad M. ; ARAGHI, Koorosh R. ; ELANGOVAN, S. ; GRAVES, Christopher R. ; HARTVIGSEN, Joseph J. ; HINTERMAN, Eric D. ; LIU, Andrew M. ; MEYEN, Forrest E. ; NASR, Maya ; PONCE, Adrian ; RAPP, Donald ; SOOHOO, Jason G. ; SWOBODA, John ; VOECKS, Gerald E.: Pre-landing plans for Mars Oxygen In-Situ Resource Utilization Experiment (MOXIE) science operations. In: *Acta Astronautica* 192 (2022), S. 301–313. <http://dx.doi.org/10.1016/j.actaastro.2021.12.003>. – DOI 10.1016/j.actaastro.2021.12.003. – ISSN 00945765

- [14] AZITA VALINIA ; JOHN M GRUNSFELD ; MICHAEL G HESS ; JAMES GREEN ; JAMES SCHIER ; JON P HAAS ; RENEE C WEBER ; CHARLES DISCHINGER ; NICHOLAS E WHITE ; CAREY M MCCLESKEY ; KRISTEN K JOHN ; RYAN D EDWARDS ; ERIK J STALCUP: *Unique Science from the Moon in the Artemis Era*. <https://ntrs.nasa.gov/citations/20220017053>
- [15] BENNETT, Nicholas J. ; ELLENDER, Damon ; DEMPSTER, Andrew G.: Commercial viability of lunar In-Situ Resource Utilization (ISRU). In: *Planetary and Space Science* 182 (2020), 104842. <http://dx.doi.org/https://doi.org/10.1016/j.pss.2020.104842>. – DOI <https://doi.org/10.1016/j.pss.2020.104842>. – ISSN 0032–0633
- [16] BURNS, Jack ; HALLINAN, Gregg ; CHANG, Tzu-Ching ; ANDERSON, Marin ; BOWMAN, Judd ; BRADLEY, Richard ; FURLANETTO, Steven ; HEGEDUS, Alex ; KASPER, Justin ; KOCZ, Jonathan ; LAZIO, Joseph ; LUX, Jim ; MACDOWALL, Robert ; MIROCHA, Jordan ; NESNAS, Issa ; POBER, Jonathan ; POLIDAN, Ronald ; RAPETTI, David ; ROMERO-WOLF, Andres ; SLOSAR, Anže ; STEBBINS, Albert ; TEITELBAUM, Lawrence ; WHITE, Martin: *A Lunar Farside Low Radio Frequency Array for Dark Ages 21-cm Cosmology*. <http://arxiv.org/pdf/2103.08623.pdf>
- [17] HALLINAN, Gregg ; BURNS, Jack ; LUX, Jim ; ROMERO-WOLF, Andres ; TEITELBAUM, Lawrence ; CHANG, Tzu-Ching ; KOCZ, Jonathon ; BOWMAN, Judd ; MACDOWALL, Robert ; KASPER, Justin ; BRADLEY, Richard ; ANDERSON, Marin ; RAPETTI, David ; ZHAN, Zhongwen ; WU, Wenbo ; KEANE, James T. ; PAN-NING, Mark ; KLESH, Andrew ; NESNAS, Issa ; POBER, Jonathan ; FURLANETTO, Steven ; AUSTIN, Alex: Vol. 53, Issue 4 (Planetary/Astrobiology Decadal Survey Whitepapers): FARSIDE: A Low Radio Frequency Interferometric Array on the Lunar Farside. In: *Bulletin of the AAS* 53 (2021), Nr. 4, S. 379. <http://dx.doi.org/10.3847/25c2cfef.60683360>. – DOI 10.3847/25c2cfef.60683360
- [18] CREECH, Steve ; GUIDI, John ; ELBURN, Darcy: Artemis: An Overview of NASA's Activities to Return Humans to the Moon. In: *2022 IEEE Aerospace Conference (AERO)*, IEEE, 2022. – ISBN 978–1–6654–3760–8, S. 1–7
- [19] BASSETT, Neil ; RAPETTI, David ; BURNS, Jack O. ; TAUSCHER, Keith ; MACDOWALL, Robert: Characterizing the radio quiet region behind the lunar farside for low radio frequency experiments. In: *Advances in Space Research* 66 (2020), Nr. 6, S. 1265–1275. <http://dx.doi.org/10.1016/j.asr.2020.05.050>. – DOI 10.1016/j.asr.2020.05.050. – ISSN 0273–1177
- [20] MAZARICO, E. ; NEUMANN, G. A. ; SMITH, D. E. ; ZUBER, M. T. ; TORRENCE, M. H.: Illumination conditions of the lunar polar regions using LOLA topography. In: *Icarus* 211 (2011), Nr. 2, S. 1066–1081. <http://dx.doi.org/10.1016/j.icarus.2010.10.030>. – DOI 10.1016/j.icarus.2010.10.030. – ISSN 00191035
- [21] JIA, Yingzhuo ; ZHANG, Zhanlan ; QIN, Lang ; MA, Tao ; LV, Bohan ; FU, Zhongliang ; XUE, Changbin ; ZOU, Yongliao: Research of Lunar Water-Ice and Exploration for China's Future Lunar Water-Ice Exploration. In: *Space: Science & Technology* 3 (2023). <http://dx.doi.org/10.34133/space.0026>. – DOI 10.34133/space.0026
- [22] WILHELMS, Don E. ; MCCAULEY, John F. ; TRASK, Newell J.: The geologic history of the Moon. In: *Professional Paper* (1987), Nr. 1348. <http://dx.doi.org/10.3133/pp1348>. – DOI 10.3133/pp1348
- [23] O'SULLIVAN, Katie M. ; KOHOUT, Tomas ; THAISEN, Kevin G. ; KRING, David A.: Calibrating several key lunar stratigraphic units representing 4 by of lunar history within Schrödinger basin. In: *Recent Advances in Lunar Stratigraphy. Geological Society of America Special Paper* 477 (2011), S. 117–127
- [24] BURNS, Jack O. ; MACDOWALL, Robert ; BALE, Stuart ; HALLINAN, Gregg ; BASSETT, Neil ; HEGEDUS, Alex: Low Radio Frequency Observations from the Moon Enabled by NASA Landed Payload Missions. In: *The Planetary Science Journal* 2 (2021), Nr. 2, S. 44. <http://dx.doi.org/10.3847/PSJ/abdfc3>. – DOI 10.3847/PSJ/abdfc3
- [25] WIECZOREK, Mark A. ; NEUMANN, Gregory A. ; NIMMO, Francis ; KIEFER, Walter S. ; TAYLOR, G. J. ; MELOSH, H. J. ; PHILLIPS, Roger J. ; SOLOMON, Sean C. ; ANDREWS-HANNA, Jeffrey C. ; ASMAR, Sami W. ; KONOPliv, Alexander S. ; LEMOINE, Frank G. ; SMITH, David E. ; WATKINS, Michael M. ; WILLIAMS, James G. ; ZUBER, Maria T.: The crust of the Moon as seen by GRAIL. In: *Science (New York, N.Y.)* 339 (2013), Nr. 6120, S. 671–675. <http://dx.doi.org/10.1126/science.1231530>. – DOI 10.1126/science.1231530. – ISSN 0036–8075
- [26] SRUTHI, U. ; SENTHIL KUMAR, P.: Volcanism on farside of the Moon: New evidence from Antoniadi in South Pole Aitken basin. In: *Icarus* 242 (2014), S. 249–268. <http://dx.doi.org/10.1016/j.icarus.2014.07.030>. – DOI 10.1016/j.icarus.2014.07.030. – ISSN 00191035
- [27] ROMMEL, Daniela ; GRUMPE, Arne ; WÖHLER, Christian: South Pole-Aitken basin: outcrops and volcanic structures. In: *European Planetary Science Congress*, 2018, S. EPSC2018–1208
- [28] MATSUMOTO, K. ; GOOSSENS, S. ; ISHIHARA, Y. ; LIU, Q. ; KIKUCHI, F. ; IWATA, T. ; NAMIKI, N. ; NODA, H. ; HANADA, H. ; KAWANO, N. ; LEMOINE, F. G. ; ROWLANDS, D. D.: An improved lunar gravity field model from SELENE and historical tracking data: Revealing the farside gravity features. In: *Journal of Geophysical Research* 115 (2010), Nr. E6. <http://dx.doi.org/10.1029/2009JE003499>. – DOI 10.1029/2009JE003499. – ISSN 01480227
- [29] MORSE, Zachary R. ; OSINSKI, Gordon R. ; TORNABENE, Livio L. ; BOURASSA, Matthew ; ZANETTI, Michael ; HILL, Patrick J. A. ; PILLES, Eric ; CROSS, Matthew ; KING, Derek ; TOLOMETTI, Gavin: Detailed Morphologic Mapping and Traverse Planning for a Rover-based Lunar Sample Return Mission to Schrödinger Basin. In: *The Planetary Science Journal* 2 (2021), Nr. 4, S. 167. <http://dx.doi.org/10.3847/PSJ/ac0728>. – DOI 10.3847/PSJ/ac0728

- [30] LI, Shuang ; JIANG, Xiuqiang ; TAO, Ting: Guidance Summary and Assessment of the Chang'e-3 Powered Descent and Landing. In: *Journal of Spacecraft and Rockets* 53 (2016), Nr. 2, S. 258–277. <http://dx.doi.org/10.2514/1.A33208>. – DOI 10.2514/1.A33208. – ISSN 0022–4650
- [31] APPLIED COHERENT TECHNOLOGY: *Lunar/LROC :: QuickMap*. <https://quickmap.lroc.asu.edu>. Version: 22.12.2023
- [32] WIM MEEUSSEN: *Coordinate Frames for Mobile Platforms*. <https://www.ros.org/repos/rep-0105.html>. Version: 2010 (ROS Enhancement Protocol)
- [33] LABBÉ, Mathieu ; MICHAUD, François: RTAB–Map as an open–source lidar and visual simultaneous localization and mapping library for large–scale and long–term online operation. In: *Journal of Field Robotics* 36 (2019), Nr. 2, S. 416–446. <http://dx.doi.org/10.1002/rob.21831>. – DOI 10.1002/rob.21831. – ISSN 1556–4959
- [34] RÖSMANN, Christoph ; HOFFMANN, Frank ; BERTRAM, Torsten: Integrated online trajectory planning and optimization in distinctive topologies. In: *Robotics and Autonomous Systems* 88 (2017), S. 142–153. <http://dx.doi.org/10.1016/j.robot.2016.11.007>. – DOI 10.1016/j.robot.2016.11.007. – ISSN 09218890
- [35] FOX, D. ; BURGARD, W. ; THRUN, S.: The dynamic window approach to collision avoidance. In: *IEEE Robotics Automation Magazine* 4 (1997), Nr. 1, S. 23–33. <http://dx.doi.org/10.1109/100.580977>. – DOI 10.1109/100.580977
- [36] ROS WIKI: *global_planner - ROS Wiki*. http://wiki.ros.org/global_planner. Version: 2024. – Letzter Aufruf: 20.09.2024
- [37] KEI OKADA: *hakuto*. <https://github.com/k-okada/hakuto/tree/9e82fe02c0dab283d30433eb9a20245c15e859a3>. Version: 2016
- [38] F.B. SPERLING: *Basic and mechanical properties of the lunar soil estimated from Surveyor touchdown data*. 1970 <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/19700014154/downloads/19700014154.pdf>
- [39] BIBER, P. ; STRASSER, W.: The normal distributions transform: a new approach to laser scan matching. In: *Proceedings 2003 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2003) (Cat. No.03CH37453)* Bd. 3, IEEE, 2003, S. 2743–2748