

EIN MODULARES KONZEPT FÜR DIE FERTIGUNG VON SONNENSCHILDEN IM WELTRAUM UNTER NUTZUNG VON WELTRAUMRESSOURCEN

T. Maheswaran*, J. Herrmann*, S. Fasoulas*
*Institut für Raumfahrtsysteme (IRS), Universität Stuttgart,
Pfaffenwaldring 29, 70569 Stuttgart, Deutschland

Zusammenfassung

Weltraumgestützte Sonnenschilde könnten den Anstieg der globalen Erwärmung zeitlich limitieren, um ausreichend Zeit für die Energiewende zu gewinnen. Das Konzept sieht vor, große, leichte Strukturen, vorzugsweise aus Weltraumressourcen, im Lagrange-Punkt L1 zwischen Sonne und Erde zu platzieren, um einen Bruchteil des Sonnenlichts davon abzuhalten, die Erde zu erreichen, indem es bereits im All reflektiert wird. Die Fertigung und Montage im Weltraum (ISMA) könnte die Herstellung großer, lastoptimierter Strukturen in der Erdumlaufbahn unter Verwendung von Materialien und Ressourcen ermöglichen, die in der Weltraumumgebung zur Verfügung stehen, wie z. B. Mond- oder Asteroidenmaterial, anstatt Strukturen vollständig montiert von der Erde aus zu starten.

Das "International Planetary Sunshade"-Konzept (IPSS) konzentriert sich daher auf ein evolutionäres Design für Sonnenschilde, die im Weltraum hergestellt und montiert werden, um durch die fortschreitende Integration von Weltraumressourcen und innovativen Technologien ein zukunftsfähiges Design zu erreichen. Diese Sonnenschilde sollen in einer bestimmten Konstellation positioniert werden, um eine komplexe Schattenwirkung zu erzielen, die eine kontrollierte Reduktion der Sonneneinstrahlung bei gleichzeitiger Berücksichtigung regionaler und saisonaler Schwankungen ermöglicht. Die logistische Plattform umfasst robotergestützte und autonome Systeme, die die aufbereiteten Rohstoffe einsammeln und zu den Logistikzentren transportieren, sowie ISMA-Anlagen, die die Sonnenschildstrukturen auf Basis additiver Fertigungsverfahren herstellen und zusammensetzen. Das evolutionäre Design des Sonnenschildes ermöglicht Materialvariationen und eine schrittweise Weiterentwicklung zu einer mehrschichtigen Struktur, die auf spezifische Wellenlängen des Sonnenlichts zugeschnitten ist. Eine finale Konfiguration könnte auch eine skalierbare, modulare Systemarchitektur für einen weltraumgestützten Solarenergiesatelliten darstellen, der sowohl für terrestrische als auch lunare Applikationen eingesetzt werden könnte.

Die Komplexität des Gesamtsystems erfordert eine umfassende Analyse der technologischen, logistischen als auch fertigungsspezifischen Herausforderungen. Auf der Grundlage des evolutionären Sonnenschilddesigns, das Designanpassungen in Abhängigkeit von der zeitlichen Dringlichkeit und der technologischen Reife ermöglichen soll, wird eine technologische Roadmap in Verbindung mit einem modularen Logistikkonzept sowie skalierbaren Fertigungsanlage vorgestellt, die essentielle Kenngrößen für potenzielle Sonnenschildarchitekturen liefert und die Herstellung von Megastrukturen im Weltraum ermöglichen soll. Zusätzliche Modelle sind in der Entwicklung, um initiale Abschätzungen für Energie-, Kosten- und Risikoaspekten zu unterstützen.

Das übergeordnete Ziel der Systemanalyse ist es, ein umfassendes Verständnis für ein evolutionäres Sonnenschildkonzept zu schaffen, um die gesellschaftliche Akzeptanz zu fördern. Zudem sollen die potenziellen technologischen Synergien zwischen aktuellen Explorationszielen und Klimaschutzmaßnahmen aufgezeigt werden, um eine Abstimmung mit terrestrischen Klimaschutzmaßnahmen zur Bewältigung der Klimakrise zu ermöglichen.

Keywords

In-Space-Manufacturing and Assembly (ISMA), Klimaschutz, Weltraumressourcen, Nachhaltigkeit, Solar Radiation Management (SRM), Model-Based System Engineering

NOMENKLATUR

Abkürzungen

CDR	Carbon Dioxide Removal	MVP	Minimum Viable Product
CFW	Coreless Filament Winding	SRM	Solar Radiation Management
IPSS	International Planetary Sunshade		
ISMA	In-Space Manufacturing and Assembly		
ISRU	In-Situ Resource Utilization		

1. EINLEITUNG

1.1. Klimawandel und Solar Radiation Management

Der Klimawandel und seine Auswirkungen stehen aufgrund der akuten Entwicklungen im zentralen Fokus weltweiter Bestrebungen und wissenschaftlicher Forschung [1]. Das ambitionierte Ziel im Rahmen des Pariser Abkommens von 2015 sieht eine Begrenzung der globalen Erderwärmung auf 2 Grad Celsius über dem vorindustriellen Niveau vor, um potenzielle katastrophale Klimakippunkte zu verhindern [2]. Jedoch haben jüngste Entwicklungen wie die COVID-19-Pandemie, das Auftreten extremer Dürren und anhaltende Konflikte die deutliche Abhängigkeit von fossilen Brennstoffen, insbesondere Öl und Erdgas, unterstrichen. Die Tatsache, dass die Europäische Union Gas als umweltfreundliche Technologie anerkannt hat [3], verstärkt die Sorge, dass die Ziele des Pariser Abkommens möglicherweise nicht erreicht werden [4; 5].

Jüngste Studien [6] warnen eindringlich davor, dass die Erde einer drastischen Erwärmung um mehr als 3 Kelvin entgegenblicken könnte, wenn keine verstärkten Maßnahmen im Bereich des Klimaschutzes und der Technologieentwicklung ergriffen werden [7]. Diese Erwärmung hat bereits spürbare Auswirkungen auf extreme Wetterereignisse zur Folge [8], darunter eine alarmierende Zunahme von Dürren mit erheblich höherer Intensität [9] sowie kontinuierlich steigenden Temperaturrekorden [1]. Die wirtschaftlichen Kosten der mangelnden Handlungsbereitschaft werden auf bis zu 178 Billionen US-Dollar für die Weltwirtschaft bis zum Jahr 2070 geschätzt [10]. Angesichts dieser Herausforderungen ist es von entscheidender Bedeutung, die bisherigen Anstrengungen zur Beschleunigung des Übergangs zu Netto-Null-Emissionen zu verstärken und den Klimawandel abzumildern. Dies erfordert nicht nur den Übergang zu erneuerbaren Energien, sondern auch aktive Maßnahmen zur Reduzierung der Kohlendioxidkonzentration in der Atmosphäre, um das vorindustrielle Klimaniveau wiederherzustellen.

Eine wichtige Strategie zur Erreichung dieses Ziels besteht in der Kohlendioxidentfernung (Carbon Dioxide Removal, CDR), die verschiedene Ansätze wie Aufforstung, die Erzeugung von Biomasseenergie mit CO₂-Speicherung, boden- und ozeanbasierte Verwitterung, Ozeandüngung und direkte Luftabscheidung umfasst [11]. Es ist jedoch zu beachten, dass diese CDR-Maßnahmen oft mit der bereits intensiven Landnutzung in Konflikt stehen [12].

Darüber hinaus wird die Steuerung der solaren Strahlung (Solar Radiation Management, SRM) als ergänzende Strategie untersucht [13]. Die SRM hat das Ziel, den Strahlungshaushalt der Erde zu beeinflussen, um die Oberflächentemperatur zu senken und somit Zeit für CDR-Maßnahmen und den Übergang zu erneuerbaren Energien zu gewinnen. Beispiele für SRM-Ansätze sind die Erhöhung des Oberflächenalbedos [14–18], die Aufhellung mariner Wolken [19; 20] und die Verteilung von Aerosolen in die Stratosphäre [20; 21], wobei letztere die bekannteste Technik ist. Besonders vielversprechend ist die weltraumbasierte SRM, da sie keine Veränderungen in der Erdatmosphäre oder auf der Erdoberfläche erfordert [22]. Ein planetarischer Sonnenschild zwischen Erde und Sonne, der die Sonnenstrahlung reflektiert, bietet eine effiziente Möglichkeit, den Strahlungshaushalt der Erde zu

stabilisieren. Die optimale Position für einen solchen Sonnenschild befindet sich am Sonne-Erde-Lagrange-Punkt 1, der ein günstiges Verhältnis zwischen Systemmasse und benötigter Sonnenschildfläche bietet [23]. Diese Technologie ermöglicht eine präzise Modellierung und Kontrolle der klimatischen Auswirkungen [24], wobei initiale technologische sowie klimatische Aspekte in zahlreichen Studien thematisiert wurden [24–26].

Die aktuelle Forschung konzentriert sich darauf, eine umfassende Systemanalyse der Sonnenschild-Konstellation unter Verwendung von Weltraumressourcen für die Herstellung durchzuführen, um die Umweltauswirkungen von Raketenstarts zu minimieren [27; 28]. Das vorgeschlagene Konzept des International Planetary Sunshades (IPSS) könnte ein entscheidender Schritt in Richtung einer nachhaltigen und effektiven SRM-Strategie sein, die den Übergang zu erneuerbaren Energien unterstützen könnte.

1.2. Der Mond als Sprungbrett

Um ein nachhaltiges Konzept mit minimalem ökologischem Einfluss auf unseren Planeten zu realisieren, erweist sich die Integration von Weltraumressourcen als unerlässlich, insbesondere angesichts der erheblichen Massenanforderungen von bis zu 500 Millionen Tonnen [27–30]. Aufgrund der gegenwärtigen Bestrebungen, sowohl für robotische als auch menschliche Erkundungsmissionen, hin zu selbsttragenden Raumfahrtoperationen [31; 32] unterstützen die Raumfahrtagenturen aktuell die Entwicklung von Technologien zur Nutzung des Mondes als Ressourcenquelle für zukünftige Infrastrukturen. Der Mond stellt eine diverse Auswahl von essenziellen Materialien zur Verfügung, darunter Sauerstoff, Silizium, Aluminium, Eisen, Titan, Magnesium und Calcium [33], wobei potentielle erdnahe Asteroiden als Ergänzung Kohlenstoff bereitstellen können [34]. Durch die Nutzung lunarer Ressourcen und kohlenstoffbasierter Materialien kann ein Produktionssystem für Sonnenschilder entwickelt werden, wobei in späteren Phasen fortschrittliche Sonnenschild-Designs unter Einbeziehung von asteroidaler Ressourcen erörtert werden können.

Derzeit arbeiten Raumfahrtagenturen sowie -industrie intensiv an zahlreichen Technologien zur Nutzung lunarer Ressourcen und zur Herstellung vor Ort wie beispielsweise lunare Solarzellen [35], wodurch die Möglichkeit gegeben ist, auf internationalen Entwicklungsinitiativen aufzubauen. Die Etablierung einer effizienten Produktionsinfrastruktur für Sonnenschilder unter Verwendung dieser anvisierten Technologien würde das notwendige Momentum verleihen. Angesichts des kritischen Zeitrahmens erfordert die Nutzung lunarer Ressourcen eine evolutionäre Architektur des IPSS-Systems.

In diesem Kontext wurde ein vierphasiger Fahrplan entworfen, in dem der Mond als zentrales Testgelände für die Produktionstechnologien des IPSS-Systems und als primäre Quelle für essenzielle Materialien der Sonnenschilder fungiert.

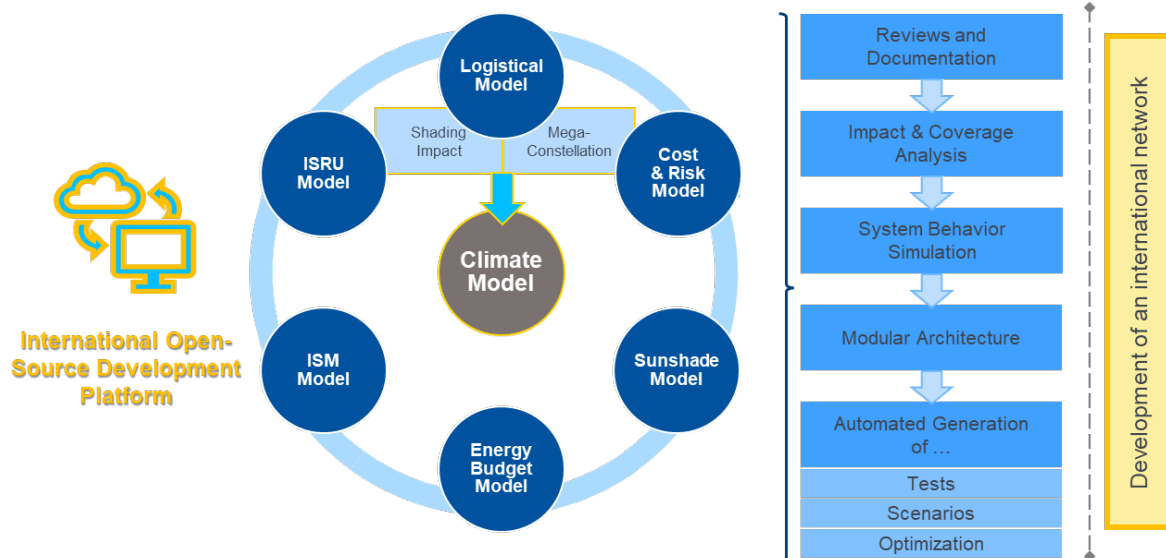


BILD 1: IPSS International Open-Source Development Platform.

Die erste Phase ist bereits im Gange und umfasst die Anpassung und Hochskalierung von bereits in Entwicklung befindlichen Technologien sowie die Initiierung neuer relevanter Technologien. Das Ziel der ersten Phase besteht darin, diese Technologien in ihrer jeweiligen Umgebung unabhängig voneinander zu validieren. Die zweite Phase beinhaltet die Integration erfolgreich validierter Technologien in ein kleinskaliges End-to-End-Produktionssystem für Sonnenschilde. Die dritte Phase sieht die hochskalierte Produktion von Sonnenschilden vor, während die Fertigung und Montage von Sonnenschildkomponenten zum Sonne-Erde-Lagrange-Punkt 1 verlagert wird. Die abschließende vierte Phase beinhaltet die Bereitstellung und den Betrieb von Sonnenschilden in ihren jeweiligen Betriebsorbits.

Die Einbindung von lunaren Materialien spielt eine entscheidende Rolle bei der Entwicklung eines weitgehend erdunabhängigen IPSS-Systems, wobei zudem ein robustes modulares Anlagenkonzept für die weltraumgestützte Fertigung sowie Montage (In-Space Manufacturing and Assembly, ISMA) der Sonnenschilde notwendig ist.

1.3. Motivation

Basierend auf der in [27] entwickelten Roadmap ist das übergeordnete Ziel, eine modulare kollaborative Modellierungsplattform für ein digitales IPSS-Modell aufzubauen, um in internationaler Zusammenarbeit die technologischen, logistischen und klimatischen Rahmenbedingungen zu bewerten und potenzielle Sonnenschildkonzepte ableiten zu können (Kapitel 2). Ein essenzieller Baustein des digitalen IPSS-Modells ist ein ISMA-Konzept für die Sonnenschilde.

Im Rahmen dieser Arbeit werden erste technologische Aspekte für eine modulare ISMA-Infrastruktur erörtert, um ein evolutionäres IPSS-System [28; 29] ermöglichen zu können. Zunächst werden auf Basis der Design-Anforderungen sowie logistischen Aspekten die

Rahmenbedingung für die ISMA-Anlage vorgestellt. Darauf aufbauend wird auf den Aufbau der ISMA-Anlage mit potenziellen Fertigungsmethoden eingegangen. Anschließend wird ein initiales ISMA-Konzept sowie der Fertigungsablauf beschrieben. Abschließend werden die Aspekte Modularität der Anlage, Skalierbarkeit der Sonnenschilde sowie initiale energetische Aspekte der ISMA-Anlage diskutiert.

2. DIGITALES MODELL DES IPSS SYSTEMS

Die aktuelle Forschung konzentriert sich auf die Analyse der Möglichkeiten zur Umsetzung logistisch und technologisch modellierter Sonnenschildkonstellationen, um deren Auswirkungen auf das lokale und globale Erdklima zu bewerten. Dazu wird ein digitales Modell der Sonnenschildkonstellation in einem modellbasierten Systems Engineering - Ansatz entwickelt, das mit Klimavorhersagemodellen verknüpft werden soll (BILD 1). Hierbei ist es essenziell, die technologischen sowie energetischen Anforderungen für die Herstellung der Sonnenschilde, die Ressourcengewinnung und die Materiallogistik unter Einbeziehung nachhaltiger Antriebssysteme zu berücksichtigen. Darüber hinaus konzentriert sich die Systemanalyse auf parameterbasierte Modellierung verschiedener Sonnenschilddesigns, um fortschrittlichere Sonnenschilddesigns berücksichtigen zu können, wie beispielsweise einen photovoltaischen Sonnenschild zur Nutzung als weltraumgestützte Energieinfrastruktur für terrestrische und lunare Anwendungen.

Der aktuelle Ansatz umfasst einen intensiven Austausch mit internationalen Partnern und eine Integration aktueller weltraumgestützter Solarenergie (space-based solar power)-Technologien [36–38], um das IPSS-System als eine potentielle weltraumbasierte Energiequelle zu konzipieren. Potenzielle Synergien mit der Entwicklung von Solar Power Satelliten für terrestrische Anwendungen sowie die Prüfung kritischer Technologien werden berücksichtigt. Dieser Ansatz ermöglicht einerseits die Untersuchung der Merkmale der robotergestützten

Herstellung großer Strukturen unter Verwendung von Mondreferenzmaterial, um nachhaltige Ideen für Solar Power Satelliten unter Verwendung von Weltraumressourcen zu entwickeln, und andererseits die Erforschung kritischer Faktoren für die Herstellung im Weltraum sowie des Materialbedarfs in initialen Testumgebungen in der Erdumlaufbahn, um die notwendigen Kapazitäten zur Herstellung der Sonnenschildkonstellation abzuleiten. Das gesamte Modell sollte modular und erweiterbar sein, um die effiziente Integration zukünftiger Forschung und technologischer Meilensteine im Optimierungsprozess zu ermöglichen.

Das Hauptziel der Gesamtsystemanalyse besteht darin, ein flexibles digitales Modell zu etablieren, das den Rahmen für umfangreiche Parameterstudien bietet und als zentrale Wissensplattform dient, um aktuelle Daten aus technologischen Fortschritten und detaillierten Teilsystemanalysen zu integrieren. Eine erfolgreiche Umsetzung als Open-Source-Entwicklungsplattform ermöglicht die Integration in zukünftige Projekte wie Destination Earth [39] oder Digital Twin Earth [40], um die Gesamtauswirkung auf die Erde umfassend bewerten zu können. Darüber hinaus sollte das Design der Modellierungsplattform den europäischen Plattformstandards entsprechen [41], um kontinuierliche Fortschritte durch die Zusammenarbeit mit größeren Projekten (wie Horizon Europe, Cooperants [42]) zu ermöglichen. Außerdem soll die Plattform detaillierte Studien in Zusammenarbeit mit Klimaforschern ermöglichen, um zuverlässige Untersuchungsergebnisse für bevorstehende Berichte des Intergovernmental Panel on Climate Change zu liefern, sodass die Grundlage für das Verständnis von weltraumgestützten Sonnenschilden als unterstützende Maßnahme zu terrestrischen SRM-Methoden auf wissenschaftlicher und politischer Ebene geschaffen werden kann. Im Einklang mit den Technologie-Roadmaps internationaler Raumfahrtagenturen soll das digitale Modell frühzeitige Hinweise und eine wissenschaftliche Grundlage bieten, um zeitkritische Entscheidungen für eine schrittweise Entwicklung einer geeigneten Produktionsinfrastruktur im Weltraum und letztendlich über die potentielle Umsetzung des IPSS-Systems zu ermöglichen.

3. IN-SPACE MANUFACTURING AND ASSEMBLY KONZEPT

Neben einer robusten lunaren Infrastruktur, um die Bereitstellung des hohen Materialbedarfs sowie den initialen Transport der aufbereiteten Materialien und Halbzeuge in den cislunaren Raum gewährleisten zu können, ist in Kombination mit einem auf den Materialbedarf angepassten Logistikkonzept [43] eine modulare, skalierbare Produktionsinfrastruktur in Abhängigkeit der Designanforderungen der Sonnenschilder notwendig. Die Nutzung von Weltraumressourcen (In-Situ Resource Utilization, ISRU) in Kombination mit ISMA bietet neue Designmöglichkeiten, stellt aber gleichzeitig neue Fertigungsanforderungen an die Produktionsinfrastruktur.

3.1. Rahmenbedingungen für ISMA

Die Fertigung und der Zusammenbau von Strukturen im All bietet einige Vorteile. Ohne die Begrenzung der Fairing-Größe, lassen sich im Prinzip beliebig große künstliche

Objekte im All errichten. Ein weiterer Vorteil der Endmontage im All ist, dass die Strukturen angepasst an die marginalen Lasten der Mikrogravitation ausgelegt werden können. Der heutige für die Dimensionierung relevante Lastfall des Raketenstarts entfällt, wodurch die Strukturen explizit für die reduzierten Betriebslasten im Betriebsorbit ausgelegt werden können. Beim Transport von Rohmaterialien sind die Belastungen beim Raketenstart unkritisch. Hierdurch können die Rohmaterialien im All in einer sehr feinen, lastoptimierten Bauweise verarbeitet werden, wobei die Strukturen am Ende dieselbe Funktion erfüllen können. Aus diesen Gründen spart man mit der Möglichkeit von ISMA-Masse, Kosten, Komplexität und öffnet das Potenzial für Strukturen einer anderen Größenordnung.

Sonnenschilder sind mit einer Kantenlänge eines Kilometers Objekte einer nie dagewesenen Größenordnung. Die Fertigung solcher bedarf ebenfalls einer neuartigen Fertigungsherangehensweise, die die Weltraumbedingungen optimal nutzt und dabei die Kosten geringhält. Neben der baulichen Dimension der einzelnen Sonnenschilder ist auch die enorme Produktionsrate ein Designtreiber für den Aufbau des IPSS-Konzeptes. Unter der initialen Annahme, dass die finale Sonnenschildkonstellation aus einer Million, je ein Quadratkilometer großen Objekten besteht und in einem Produktionszeitraum von 20 Jahren aufgebaut werden soll, hat dies zur Folge, dass 137 Sonnenschilder pro Tag gefertigt werden müssen. Ein Sonnenschild alle zehn Minuten erfordert eine Sonnenschild-Massenproduktion. Die enorme Anzahl an zu fertigenden Objekten setzt hohe Anforderungen an das Design der Sonnenschilder, um Masse, Transportaufwand und Kosten möglichst gering zu halten [44].

Die hohe Produktionskadenz erfordert einen effizienten und vollautomatisierten Fertigungsprozess. Geschwindigkeit und Zuverlässigkeit müssen im Vordergrund stehen. Daher wird unter den diversen Ansätzen initial ein Schablonenansatz mit einem permanenten Bauareal als geeigneter erachtet als ein Schwarm frei fliegender Roboter. Bei vollautomatisierten Produktionsstraßen auf der Erde, ist menschliches Eingreifen im Falle von Problemen notwendig. Für den Weltraum wäre der Einsatz von Teleoperation eine geeignete Kompromisslösung, um menschliche Problemlösungsfähigkeiten während des Aufbaus und der frühen Inbetriebnahme-Phase beizubehalten, ohne die Station selbst komplett mit einem Lebenserhaltungssystem auszustatten zu müssen. Um den Produktionsprozess abzustimmen und zu überwachen, bietet sich die Implementierung eines digitalen Prozesszwilings an [45]. Diese digitale Umgebung ermöglicht auch den Einsatz von maschinellem Lernen und künstlicher Intelligenz, um das Gesamtsystem während des Betriebs zu überwachen, zu warten und zu verbessern.

3.2. Aufbau der ISMA-Anlage

Der Aufbau einer Weltraumfabrik ist grundsätzlich vergleichbar mit dem Aufbau einer Raumstation wie der ISS, wobei der Fokus auf dem größeren Maßstab sowie der Integration von ISMA-Technologien liegt. Beim Aufbauprozess der Station handelt es sich um einen fortschreitenden Prozess, der darauf abzielt, zunächst ein funktionsfähiges Minimum Viable Product (MVP) zu etablieren. Unter der Annahme, dass die Station zu Beginn

hauptsächlich aus terrestrischen Materialien aufgebaut wird, könnte es vorteilhaft sein, den Aufbau im niedrigen Erdbit durchzuführen, um Delta-V-Anforderungen zu reduzieren.

Ein integriertes Modul wie das Airbus LOOP-Konzept könnte der erste funktionale Block sein, von dem aus der weitere Aufbau stattfinden kann [46]. Basierend auf dem LOOP-Konzept, könnten für die Fertigung adaptierte sowie vollständig integrierte Module eine kontinuierliche Erweiterung der Station ermöglichen, um eine Fertigungsstraße im All aufbauen zu können. Ein aufblasbares Modul wie das Sierra LIFE-Habitat wäre eine weitere Möglichkeit, um kostengünstig und zeiteffizient zusätzliches Volumen für Fertigungsprozesse zu bieten. Die Ausstattung solcher Module könnte aber erst im All erfolgen.

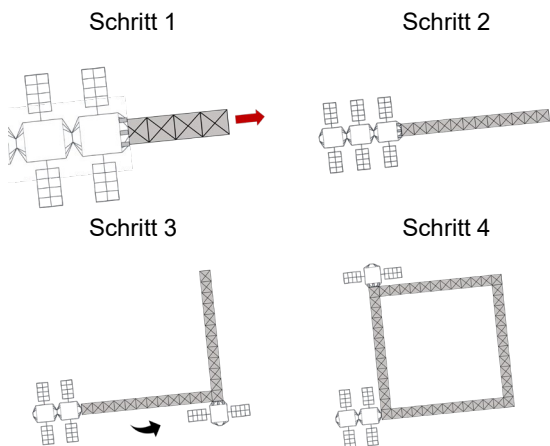


BILD 2: Aufbauprozess des Konstruktionsquadrates.

Nachdem eine funktionale Grundstruktur etabliert wurde, wird die für die eigentliche Produktion der Sonnenschilde nötige Schablone aufgebaut. Ein das jeweilige Sonnenschild umspannendes Konstruktionsquadrat mit einer Kantenlänge von über einem Kilometer wird hierfür vorgeschlagen. In dessen Bauraum können die Sonnenschilde schnell und effektiv gefertigt werden. Um das Gerüst von der MVP-Station aus aufzubauen, kommen Extrusionsverfahren, wie herkömmliche Alustrangpressverfahren (Bosch-Profil) oder der von Tethers Unlimited entwickelte Trusselator in Frage [47]. So kann das Material an der Station in einem speziellen Balken-Extrusions-Modul verarbeitet und dann linear ins All extrudiert werden. Durch Repositionierung des Moduls lassen sich dann auch die anderen Kanten herstellen und anschließend verbinden (BILD 2).

Das aktuelle Design sieht drei Hauptkomponenten vor: Eine mit Solarzellen integrierte Folie, eine Stützstruktur und sogenannte Modular Bays, die Subsysteme und Elektronik beherbergen (BILD 3). Da Leichtbau im Vordergrund steht, sind faserbasierte Materialien eine gute Wahl für die Stützstruktur. Ein vielversprechendes Fertigungsverfahren, das in der Lage ist, sehr große steife Faserverbundstrukturen zu ermöglichen, ist Coreless Filament Winding (CFW) [48]. Da die Stützstruktur einen Großteil der Masse der Sonnenschilde ausmacht, ist eine Integration von lunaren Materialien unabdingbar. Bei der reinen Einbindung von lunaren Materialien sind

Kohlenstofffasern somit keine Option, jedoch lassen sich basaltbasierte Fasern aus Regolith herstellen [49]. An der Vor-Ort-Produktion des erforderlichen Bindematerials auf dem Mond wird ebenfalls geforscht [50].

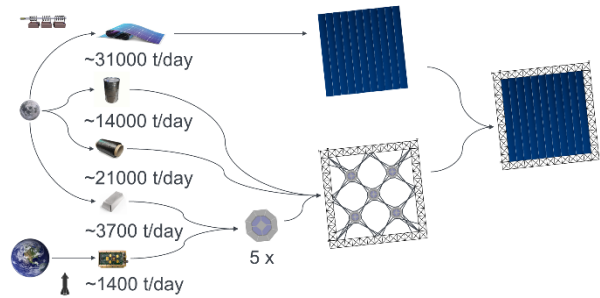


BILD 3: Schematische Darstellung der Materialflüsse sowie der Sonnenschild-Produktion.

Zur Bereitstellung einer leichten Folienstruktur mit bereits integrierten Solarzellen bedarf es neuester Dünnschichtsolarellentechnologie auf Perowskit-Basis. Initiale Abschätzungen von Foliendicken im 0,1 mm Bereich und einem spezifischen Gewicht von ca. 0,23 [kg/m²] existieren vom Institut für Photovoltaik der Universität Stuttgart. Die hierfür benötigten Fertigungsverfahren sind Roll-to-Roll Prozesse, Physical-Vapor-Deposition und Sputtering. Da für die Energieversorgung der Launch-Infrastruktur auf dem Mond ohnehin eine In-Situ-Solarzellenproduktion auf dem Mond geplant ist (BILD 4), kann durch Skalierung diese Produktionsanlage ebenfalls die Solarzellenfolienrollen für die Sonnenschilde bereitstellen. Die fertigen Folienrollen können kompakt verpackt werden und nach dem Transport zur ISMA-Anlage im All in den Sonnenschild-Fertigungsprozess integriert werden.

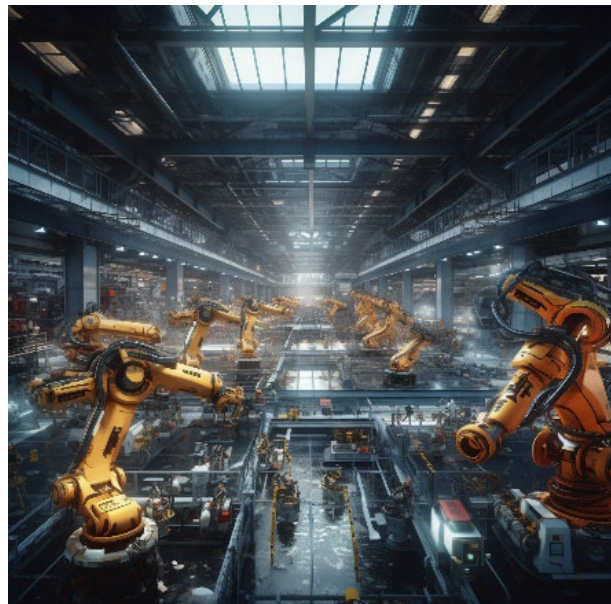


BILD 4: Künstlerische Impression der In-Situ Solarzellenproduktion auf dem Mond.

Die Modular Bays selbst sind Aluminiumgehäuse, in welche die auf der Erde vorgefertigten Subsystemcontainer

integriert werden. Da die Modular Bays keine komplexen Objekte sind und um der Massenproduktion gerecht zu werden, bieten sich Aluminiumdruckgussverfahren zur Fertigung an. Zur Nachbereitung und für die Detailintegration können ergänzend Robotersysteme und additive Fertigungsverfahren kombiniert werden. 3D-Druckverfahren oder Electron-Beam-Free-Form-Fabrication eignen sich dazu ebenfalls die nötigen Ankerpunkte für den CFW-Prozess im Fertigungsprozess zu integrieren [51].

3.3. Fertigungsablauf

Auf Basis des initialen ISMA-Anlagenkonzeptes wird im Folgenden auf den Fertigungsablauf der einzelnen Sonnenschilde eingegangen.

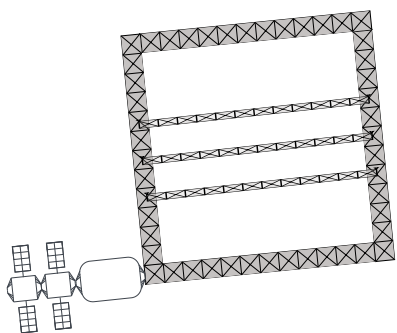


BILD 5: Sonnenschild-Produktion – Schritt 1: Initiierung.

Die ISMA-Anlage verfügt über mehrere bewegliche Fertigungsbalken die Teil des Konstruktionsquadrats sind, um beliebige Punkte innerhalb der Fläche anfahren zu können. Im ersten Schritt werden diese in Position gebracht (BILD 5).

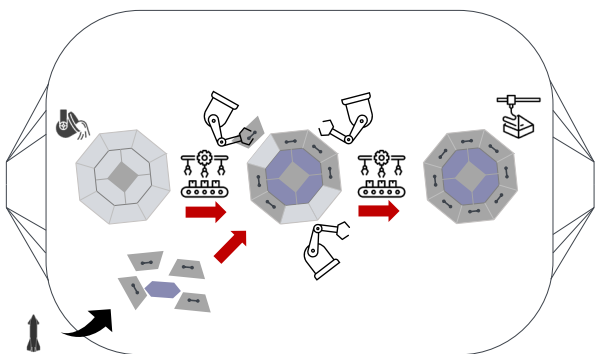


BILD 6: Sonnenschild-Produktion – Schritt 2: Fertigung der Modular Bays.

Innerhalb des Fertigungsvolumens der Station werden die Modular Bays gefertigt und die Subsystem-Container integriert. Das vom Mond transportierte Aluminium wird geschmolzen und im Druckgussverfahren zur Modular Bay gefertigt. Die auf der Erde gefertigten Subsystem-Container werden daraufhin integriert, bevor zum Schluss Detailarbeiten vorgenommen, und auch die Ankerpunkte des CFW-Verfahrens gesetzt werden (BILD 6).

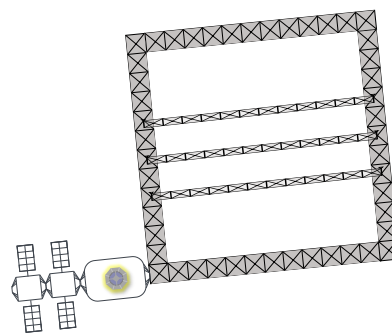


BILD 7: Sonnenschild-Produktion – Schritt 3: Fertigstellung der Modular Bays.

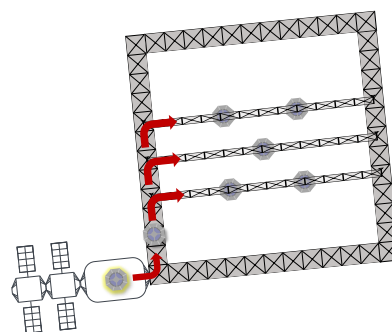


BILD 8: Sonnenschild-Produktion – Schritt 4: Transport der Modular Bays.

Die fertig integrierten Modular Bays verlassen das Fertigungsvolumen (BILD 7). Die Modular Bays werden mittels eines Schienen-basierten Transportsystems entlang des Konstruktionsquadrates auf die beweglichen Fertigungsbalken geladen und an der gewünschten Position hängend fixiert. Fünf Modular Bays sind je Sonnenschild im aktuellen Design vorgesehen (BILD 8).

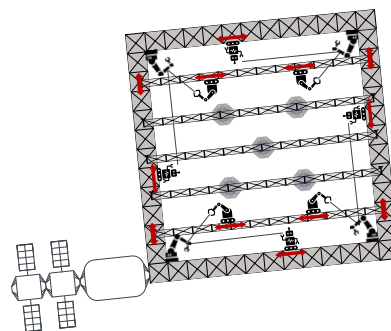


BILD 9: Sonnenschild-Produktion – Schritt 5: Initiierung des CFW-Prozesses.

Für die faserbasierte Stützstruktur beginnt nun das CFW-Verfahren. Parallel werden mehrere Fasern imprägniert und ausgewickelt. Die Faserenden werden von Zugsystemen von Ankerpunkt zu Ankerpunkt transportiert, wo Industrieroboter dann den eigentlichen Windungsprozess übernehmen (BILD 9).

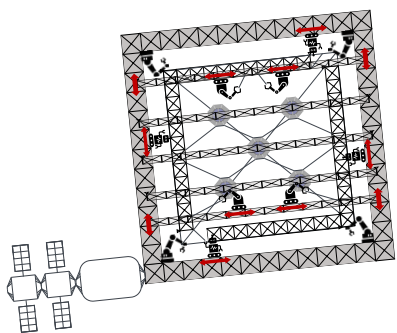


BILD 10: Sonnenschild-Produktion – Schritt 6: Diagonale Verstärkung sowie Einbettung der Verkabelung.

Entlang der Kanten des Konstruktionsquadrates laufen die Zugsysteme auf Schienen. Für die diagonalen Verbindungen werden weitere bewegliche Fertigungsbalken mit orthogonal beweglichen Roboterarmen eingesetzt. Die Windungs-Syntax wird automatisch abgefahren, wobei die Modular Bays fest in die Stützstruktur integriert werden. Die Verkabelung für die späteren Solarzellen werden in diesem Schritt ebenfalls in die Fasertunnel integriert. Dies bietet später Schutz gegen Strahlung sowie Kollisionen (BILD 10).

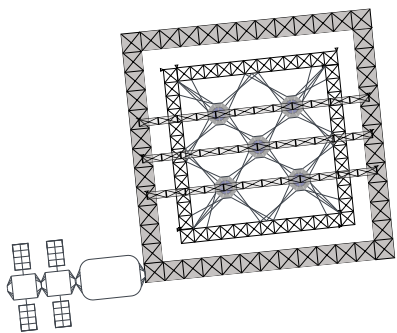


BILD 11: Sonnenschild-Produktion – Schritt 7: Finalisierung des Flechtprozesses.

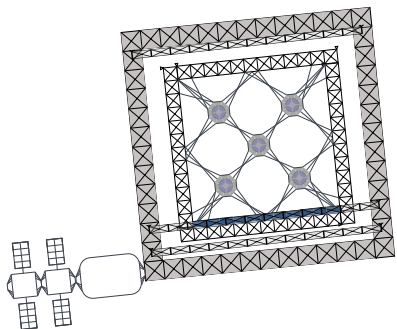


BILD 12: Sonnenschild-Produktion – Schritt 8: Initiierung des Ausrollprozess der Solarzellenfolie.

Mit der Finalisierung des Flechtprozesses ist die finale Stützstruktur mit integrierten und verschalteten Modular Bays als ein großes Bauteil fertiggestellt. Ausgehärtet bietet diese eine enorme Steifigkeit und hohe Festigkeit, bei minimaler Masse (BILD 11). Die beweglichen Fertigungsbalken müssen die Modular Bays nun nicht weiter fixieren und können folglich nun für den Ausrollprozess der Solarzellenfolie genutzt werden. Die an

die Station gelieferte Roll-Ware wird nebeneinander mit einem minimalen Versatz auf eine Ausrollvorrichtung entlang einer Kante des Konstruktionsquadrates geladen (BILD 12).

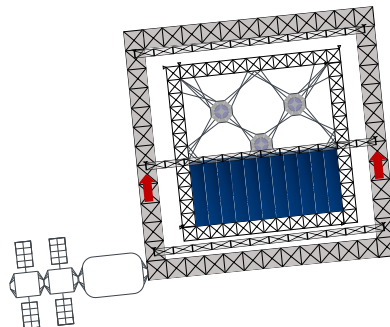


BILD 13: Sonnenschild-Produktion – Schritt 9: Ausrollprozess der Solarzellenfolie.

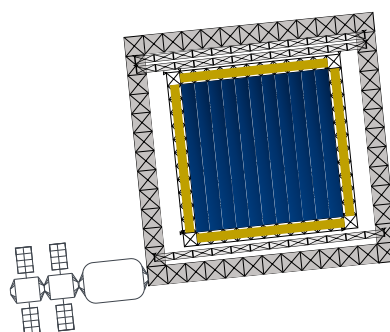


BILD 14: Sonnenschild-Produktion – Schritt 10: Installation der Folie sowie der Reflective Control Devices.

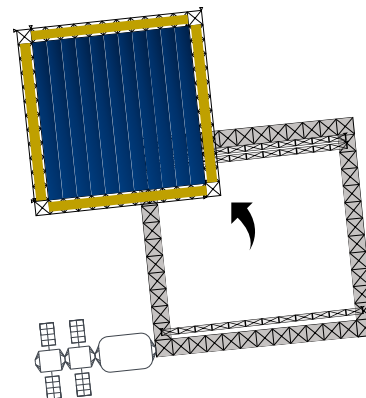


BILD 15: Sonnenschild-Produktion – Schritt 11: Fertigstellung des Sonnenschildes.

Simultan werden nun die Folienrollen abgerollt und die Enden der Folien mit gleicher Geschwindigkeit über die Stützstruktur gezogen. Zugspannungen müssen minimal gehalten werden, um die fragile Folienstruktur nicht zu beschädigen (BILD 13). Nachdem Abschluss des Ausrollprozesses werden die Folienenden an der Stützstruktur umgeschlagen und befestigt. Zuletzt werden die Reflective Control Devices für die Lageregelung installiert werden (BILD 14). Abschließend kann das fertige Sonnenschild das Konstruktionsquadrat verlassen und die nächste Produktion initiiert werden (BILD 15).

3.4. Modularität & Skalierbarkeit

Das Konzept des Konstruktionsquadrates ist modular und skalierbar. Durch einfache Anpassung der Ankerpunkte und Roboterpositionen des CFW-Verfahrens lassen sich eine Vielzahl unterschiedlicher Designs für Stützgerüste fertigen (BILD 16). Panelartige Strukturen lassen sich im Rollout-Prozess integrieren und Details können mittels der beweglichen Roboterarmen im gesamten Bauraum hinzugefügt werden.

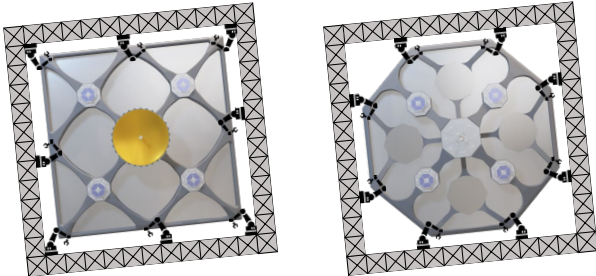


BILD 16: Flexibilität und Modularität des ISMA-Konzeptes.

Um die Produktionskapazitäten zu steigern, lassen sich die Konstruktionsquadrate beliebig in die Tiefe erweitern (BILD 17). So können viele Prozesse parallel ablaufen und die fertigen Objekte werden seitlich ausgestoßen. Die restliche Infrastruktur für den Materialnachschub, Lage- und Bahnregelungssystem (Attitude and Orbit Control System), Energie und Thermalmanagement kann leicht angepasst wiederverwendet werden.

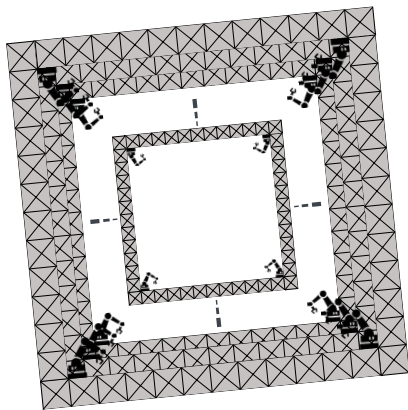


BILD 17: Skalierungspotenzial des ISMA-Konzeptes.

3.5. Energetische Aspekte

Roboter, Schienensysteme, 3D Drucker und Schmelzen benötigen Energie. Durch die permanente Sonneneinstrahlung am Sonne-Erde-Langrange-Punkt 1 und die großen zur Verfügung stehenden Flächen, bieten sich Solarzellen als Energieversorgung an. Für den Aufbau der ISMA-Anlage müssen Solarzellen von der Erde zur Verfügung gestellt werden. Sobald das MVP in Betrieb ist, kann die Fabrik vom Mond bereitgestellte Perowskit-Solarzellen an der Station integrieren, um die Leistungsversorgung zu steigern. Sobald erste Sonnenschilde operationell sind, wird lokal Energie

produziert. Die hier überschüssige Energie kann über Mikrowellenstrahlung an die ISMA-Anlage gesendet werden. Schon ein einzelnes Sonnenschild mit einer Fläche von einem Quadratkilometer, kann mit Perowskit-Zellen bei 20 % Effizienz 273 MW an Leistung generieren. Aktuelle Abschätzungen für den Energiebedarf der ISMA-Anlage liegen bei einer Größenordnung von 300 MW. Der Großteil der Leistung der Fertigungsprozesse wird benötigt, um den hohen Aluminiummassenstrom für die Modular Bays zur Schmelze zu bringen (Vergleich: Schmelzwärme Aluminium bei 3700 Tonnen pro Tag). Die für den Betrieb der Motoren der Roboter und Schienensysteme erforderliche Energie fällt im Vergleich relativ gering aus. Somit lässt sich initial folgern, dass selbst bei einem niedrigen Wirkungsgrad der medienlosen Energieübertragung, bereits wenige mit Solarzellen ausgestattete Sonnenschilde den Energiebedarf der ISMA-Anlage decken könnten.

4. FAZIT UND AUSBLICK

Anhand des initialen ISMA-Konzeptes konnte das Potenzial für eine modulare skalierbare Massenproduktion der Sonnenschilde unter Einbindung terrestrischer und lunarer Materialien sowie Halbzeuge aufgezeigt werden. Der modulare Aufbau bietet die Möglichkeit für Erweiterungen der Produktionsstraße, sodass parallel mehrere Konstruktionsquadrate aufgebaut werden können, um unterschiedliche Sonnenschild-Designs in verschiedenen Größenordnungen herstellen zu können. Die initialen energetischen Abschätzungen zeigen, dass die Energieanforderungen für die modulare ISMA-Infrastruktur bereits mit einer geringen Anzahl an Sonnenschilden als Solar Power Satelliten erfüllt werden können, wobei eine detailliertere Auslegung der benötigten ISMA-Energieinfrastruktur notwendig ist.

Die technologischen und logistischen Herausforderungen eines IPSS-Systems erfordern eine frühzeitige Initiierung und internationale Zusammenarbeit, um die Entwicklung eines auf ISRU-basierenden Sonnenschildes zu ermöglichen. Die Erstellung eines digitalen IPSS-Modells bietet die Möglichkeit, verschiedene Szenarien zu erörtern, um den Bedarf für technologische Entwicklungen für verschiedene Konzepte zu identifizieren und auf der Grundlage einer intensiven internationalen Zusammenarbeit die zeitliche Integration eines evolutionären Sonnenschild-Designs in Verbindung mit terrestrischen Maßnahmen zu ermöglichen. Spin-Ins sind ein Haupttreiber, um die Entwicklung eines IPSS-Konzepts zu ermöglichen, daher ist es möglich, technisch-wirtschaftliche Hürden mit Hilfe des digitalen Modells zu identifizieren und zu umgehen. Zukünftige Entwicklungen werden das Modell weiter verfeinern, sodass Subsysteme oder Elemente durch neue Technologien ersetzt werden können.

Das initiale ISMA-Konzept soll im nächsten Schritt mit den potenziellen Fertigungstechnologien in Hinblick auf ihre fertigungsspezifischen sowie energetische Anforderungen charakterisiert und im IPSS-Modell-Framework implementiert werden. In weiterführenden Arbeiten werden die verbleibenden Subsysteme des digitalen Modells untersucht und charakterisiert, um eine Wissensgrundlage für die Gestaltung eines globalen Entwicklungsplans für das IPSS-System zu schaffen. Darüber hinaus werden Kosten- und Risikoanalysen durchgeführt, um eine Gesamtbewertung der Auswirkungen eines IPSS-Systems

zu erhalten, um auf der Grundlage der Potenziale einen geeigneten rechtlichen Rahmen zu entwerfen. Das Hauptziel wird darin bestehen, das IPSS-System zu charakterisieren, um ein internationales Verständnis für die Potenziale zur Integration des IPSS-Systems in die Klimaschutz-Roadmaps zu schaffen.

5. DANKSAGUNG

Diese Arbeit als Teil der Gesamtsystemanalyse eines International Planetary Sunshade (IPSS) Konzeptes wird von Airbus Defence and Space, ArianeGroup sowie von der europäischen Raumfahrtagentur (European Space Agency, ESA) im Rahmen der ESA Initial Support for Innovation (Idea: I-2021-04411) finanziell unterstützt.

6. QUELLEN

- [1] Copernicus Climate Change Service: *July 2023 sees multiple global temperature records broken*. Website: <https://climate.copernicus.eu/july-2023-sees-multiple-global-temperature-records-broken> [accessed: 08.09.2023]
- [2] CA Horowitz: *Paris Agreement*, International Legal Materials, 55, Nr. 4, 2016, S. 740–755
- [3] J Ainger: *EU Lawmakers Remove Last Hurdle to Label Gas, Nuclear as Green*. Website: <https://www.bloomberg.com/news/articles/2022-07-06/eu-lawmakers-remove-last-hurdle-for-gas-nuclear-as-green> [accessed: 08.09.2023]
- [4] United Nations Environment Programme: *Emissions Gap Report 2020*. Website: <https://www.unep.org/emissions-gap-report-2020> [accessed: 08.09.2023]
- [5] National Oceanic and Atmospheric Administration: *Climate Change: Global Temperature*. Website: <https://www.climate.gov/news-features/understanding-climate/climate-change-global-temperature> [accessed: 08.09.2023]
- [6] The Intergovernmental Panel on Climate Change: *AR6 Synthesis Report: Climate Change 2023*. Website: <https://www.ipcc.ch/report/sixth-assessment-report-cycle/> [accessed: 08.09.2023]
- [7] Intergovernmental Panel on Climate Change: *Climate change 2022: Mitigation of climate change*. Summary for policy makers. Website: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg3/> [accessed: 08.09.2023]
- [8] United Nations Office for Disaster Risk Reduction: *Human Cost of Disasters 2000-2019*. Website: <https://www.undrr.org/publication/human-cost-disasters-overview-last-20-years-2000-2019> [accessed: 08.09.2023]
- [9] International Energy Agency: *World Energy Outlook 2021*. Website: <https://iea.blob.core.windows.net/assets/4ed140c1-c3f3-4fd9-acae-789a4e14a23c/WorldEnergyOutlook2021.pdf> [accessed: 08.09.2023]
- [10] P Philip, C Ibrahim, C Hodges: *The turning point: A Global Summary*. Website: <https://www.deloitte.com/global/en/issues/climate/global-turning-point.html> [accessed: 08.09.2023]
- [11] K Caldeira, B Govindasamy, L Cao: *The Science of Geoengineering*, Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 41, Nr. 1, 2013, S. 231–256
- [12] I Dicaire: *Climate Engineering: Which Role for Space?*, Proceedings of the 64th International Astronautical Congress 2013, IAC-13,D4,4,5,x20121, 2013, S. 9233–9241
- [13] L Burns, D Keith, P Irvine, et al.: *Technology Factsheet Series: Solar Geoengineering, Paper*, Belfer Center for Science and International Affairs, Harvard Kennedy School, June 2019
- [14] A Ridgwell, JS Singarayer, AM Hetherington, et al.: *Tackling regional climate change by leaf albedo bio-geoengineering*, Current biology : CB, 19, Nr. 2, 2009, S. 146–150
- [15] CE Doughty, CB Field, AMS McMillan: *Can crop albedo be increased through the modification of leaf trichomes, and could this cool regional climate?*, Climatic Change, 104, Nr. 2, 2011, S. 379–387
- [16] H Akbari, S Menon, A Rosenfeld: *Global cooling: Increasing world-wide urban albedos to offset CO₂*, Climatic Change, 94, 3-4, 2009, S. 275–286
- [17] S Menon, H Akbari, S Mahanama, et al.: *Radiative forcing and temperature response to changes in urban albedos and associated CO₂ offsets*, Environmental Research Letters, 5, Nr. 1, 2010, S. 14005
- [18] R Seitz: *Bright water: Hydrosols, water conservation and climate change*, Climatic Change, 105, 3-4, 2011, S. 365–381
- [19] J Latham, P Rasch, C Chen, et al.: *Global temperature stabilization via controlled albedo enhancement of low-level maritime clouds*, Philosophical transactions. Series A, Mathematical, physical, and engineering sciences, 366, Nr. 1882, 2008, S. 3969–3987
- [20] PJ Rasch, J Latham, C Chen: *Geoengineering by cloud seeding: Influence on sea ice and climate system*, Environmental Research Letters, 4, Nr. 4, 2009, S. 45112
- [21] A Robock, A Marquardt, B Kravitz, G Stenchikov: *Benefits, risks, and costs of stratospheric geoengineering*, Geophysical Research Letters, 36, Nr. 19, 2009, S. 1369
- [22] J Shepherd: *Geoengineering the climate: Science, governance and uncertainty*, London, The Royal Society, 2009
- [23] D Keith, O Morton, Y Shyur, et al.: *Reflections on a Meeting about Space-based Solar Geoengineering*. Website: <https://geoengineering.environment.harvard.edu/blog/reflections-meeting-about-space-based-solar-geoengineering> [accessed: 08.09.2023]

- [24] JP Sánchez, CR. McInnes: *Optimal Sunshade Configurations for Space-Based Geoengineering near the Sun-Earth L1 Point*, PloS one, 10, Nr. 8, 2015, e0136648
- [25] R Angel: *Feasibility of cooling the Earth with a cloud of small spacecraft near the inner Lagrange point (L1)*, Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 103, Nr. 46, 2006, S. 17184–17189
- [26] RG Kennedy, KI Roy, DE Fields: *Dyson Dots: Changing the solar constant to a variable with photovoltaic lightsails*, Acta Astronautica, 82, Nr. 2, 2013, S. 225–237
- [27] T Maheswaran, S. Fix: *Roadmap for an International Planetary Sunshade (IPSS)*, Proceedings of the 72nd International Astronautical Congress 2021, 2021. Website: https://www.researchgate.net/publication/362911007_Roadmap_for_an_International_Planetary_Sunshade_IPSS [accessed: 08.09.2023]
- [28] T Maheswaran, D Acker, S Fasoulas, et al.: *The International Planetary Sunshade - An Umbrella Project to Foster International Collaboration to Mitigate Global Warming*, Proceedings of the 73rd International Astronautical Congress 2022, 2022. Website: https://www.researchgate.net/publication/364153880_The_International_Planetary_Sunshade_-_An_Umbrella_Project_to_Foster_International_Collaboration_to_Mitigate_Global_Warming [accessed: 08.09.2023]
- [29] D Acker: *Parametrized Sunshade Design Study for an Evolutionary Sunshade Concept*. University of Stuttgart, Institute of Space Systems, Master Thesis, 2022.
- [30] T Maheswaran, D Acker, S Fasoulas: *The International Planetary Sunshade System - An Umbrella Project Combining Sustainable Energy Supply with Mitigation of Global Warming*, Proceedings of the 17th International Conference on Space Operations, 2023. Website: https://www.researchgate.net/publication/371987573_The_International_Planetary_Sunshade_System_-_An_Umbrella_Project_Combining_Sustainable_Energy_Supply_with_Mitigation_of_Global_Warming
- [31] European Space Agency (ESA): *Space Resources Strategy*, 2019
- [32] National Aeronautics and Space Administration (NASA): *Artemis Plan: NASA's Lunar Exploration Program Overview*, 2020
- [33] IA Crawford: *Lunar resources*, Progress in Physical Geography: Earth and Environment, 39, Nr. 2, 2015, S. 137–167
- [34] R Bewick, JP Sánchez, CR McInnes: *Usage of Asteroid resources for Space-Based Geoengineering*, In Asteroids - Prospective energy and material resources, 2013, S. 581–603
- [35] Blue Origin: *Blue Alchemist Technology Powers our Lunar Future*. Website: <https://www.blueorigin.com/news/blue-alchemist-powers-our-lunar-future/> [accessed: 20.02.2023]
- [36] Frazer-Nash Consultancy: *Space based solar power: de-risking the pathway to net zero*. Website: <https://www.fnc.co.uk/media/e15ing0q/frazer-nash-sbsp-executive-summary-final.pdf>
- [37] J Black, L Slapakova, K Martin: *Future Uses of Space out to 2050*, RAND Corporation, 2022
- [38] European Space Agency: *Solaris*. Website: https://www.esa.int/Enabling_Support/Space_Engneering_Technology/SOLARIS [accessed: 30.01.2023]
- [39] European Space Agency: *Destination Earth*. Website: https://www.esa.int/Applications/Observing_the_Earth/Destination_Earth [accessed: 30.01.2023]
- [40] European Space Agency: *Working towards a Digital Twin of Earth*. Website: https://www.esa.int/Applications/Observing_the_Earth/Working_towards_a_Digital_Twin_of_Earth [accessed: 30.01.2023]
- [41] Gaia-X European Association for Data and Cloud AISBL: *Gaia-X Framework*. Website: <https://gaia-x.eu/gaia-x-framework/> [accessed: 30.01.2023]
- [42] DLR: *Collaborative Processes and Services for Aeronautics and Space - COOPERANTS-Projekt gestartet*. Website: https://www.dlr.de/irs/desktopdefault.aspx/tabid-11893/20910_read-76625/admin-1/ [accessed: 30.01.2023]
- [43] T Maheswaran, J Ganzmann, D Acker, et al.: *Logistical Infrastructure for an ISRU-based Sunshade Concept to Support Climate Action*, Proceedings of the Global Space Conference on Climate Change 2023, 2023
- [44] D Acker: *Parametrized Sunshade Design Study for an Evolutionary Sunshade Concept*, Master Thesis, 2023
- [45] F Kempf, MS Mühlbauer, T Dasbach, et al.: *AI-In-Orbit-Factory - AI approaches for adaptive robotic in-orbit manufacturing of modular satellites*, Proceedings of the 72nd International Astronautical Congress 2021, 2021. Website: <https://elib.dlr.de/144939/> [accessed: 08.09.2023]
- [46] Airbus: *Airbus LOOP*. Website: <https://www.airbus.com/en/airbus-loop> [accessed: 08.09.2023]
- [47] R Hoyt: *SpiderFab™: Process for On-Orbit Construction of Kilometer-Scale Apertures*, 2016
- [48] T Maheswaran, P Mindermann, D Acker, et al.: *International planetary sunshade concept with a function-integrated and scalable support structure based on coreless filament winding*, Journal of Physics: Conference Series, 2526, Nr. 1, 2023, S. 12113

- [49] T Becker, A Lüking, T Meinert, et al.: *MoonFibre - Fibres from Lunar Regolith*. 2019
- [50] K Oh, T Chen, R Kou, et al.: *Ultralow-binder-content thermoplastic composites based on lunar soil simulant*, *Advances in Space Research*, 66, Nr. 9, 2020, S. 2245–2250. Website: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S027311720305500>
- [51] RA Hafley, KMB Taminger, RK Bird: *Electron Beam Freeform Fabrication in the Space Environment*. Website: <https://ntrs.nasa.gov/citations/20070005152> [accessed: 08.09.2023]