

Masterthesis

DESIGN UND KONSTRUKTION EINES ROBOTER ARMES FÜR DEN LUNAR ROVER MINI

Master of Arts, Engineering Design

Melvin Laurin Groß

Matrikelnummer: 20162244

Bearbeitungszeitraum: 01.03.2023 bis 19.07.2023

Betreuung

Prof. Jan Bäse

Dr. Ing Armin Wedler

Hochschule Magdeburg-Stendal

Institut für Industrial Design

Fachbereich IWID

Eidesstattliche Erklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit eigenständig und ohne fremde Hilfe angefertigt habe. Textpassagen, die wörtlich oder dem Sinn nach auf Publikationen oder Vorträgen anderer Autoren beruhen, sind als solche kenntlich gemacht.

Die Arbeit wurde bisher keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt und auch noch nicht veröffentlicht.

Magdeburg, 19.07.2023

Ort, Datum

Melvin Laurin Groß



Name (Unterschrift)

Danksagung

Mein Dank gilt in erster Linie meinen Eltern, die mich nicht nur während meiner Arbeit an dieser Masterthesis, sondern bedingungslos während meines ganzen Studiums unterstützt haben.

Auch meinem Bruder möchte ich herzlich dafür danken, dass er sich trotz seines anspruchsvollem Medizinstudiums die Zeit nahm, meine Arbeit Probe zu lesen und mich auf unverständliche Stellen aufmerksam machte.

Ein großer Dank gebührt außerdem Prof. Jan Bäse, ohne den meine Teilnahme am Studiengang Master Engineering Design wohl nicht zustandegekommen wäre.

Zuletzt möchte ich mich noch bei Dr. Armin Wedler bedanken, der mir im Oktober 2020 die Möglichkeit gab, Teil des LRM Teams im Deutschen Zentrum für Luft und Raumfahrt zu werden um dort, zusammen mit anderen Studenten einen kleinen Rover zu entwickeln.

Ich selbst hätte mir damals nie zugetraut, dieser Aufgabe gewachsen zu sein doch Dr. Wedlers zuversicht überzeugte mich schließlich, wofür ich ihm immer sehr dankbar sein werde.

Unsere darauf folgende, fast drei jährige Zusammenarbeit werde ich nie vergessen und auf die Ergebnisse und Erfahrungen die ich dieser Zeit machen konnte, werde ich immer sehr positiv zurück blicken.

Gliederung

1. Prolog	06
1.1 Lunar Rover Mini Projekt	07
2. Motivation	8
3. Zielsetzung	10
4. Gender	11
5. Grundlagen	14
5.1 Bestandteile eines Roboterarmes	14
5.1.1 Gelenke	14
5.1.2 Gelenktypen	15
5.1.3 Armteile	15
5.1.4 Endeffektoren	15
5.1.5 Tool Center Point (TCP)	16
5.1.6 Motoren	16
5.2 Kinematische Ketten	16
5.2.1 Serielle Kinematik	16
5.2.2 Parallele Kinematik	16
5.2.3 Inverse Kinematik	17
5.2.4 Vorwärts Kinematik	17
6. Vertiefendes Wissen zu Roboterarmen	17
6.1 Freiheitsgrade	18
6.2 Kollisionsbereiche	18
6.3 Arbeitsräume	18
6.4 Roboterarmkonfigurationen	19
6.4.1 Karthesisch	19
6.4.2 Zylindrisch	19
6.4.3 Sphärisch	19
6.4.4 Artikuliert	20
6.4.5 Gelenkarmroboter	20
6.4.6 Mobiler Roboterarm	21
6.5 Motoren	21
6.5.1 DC Motoren	22

6.5.2	Schrittmotor	22
6.5.3	Servomotor	22
7.	Der Arm für den LRM	23
7.1	Lightweight Rover Unit (LRU)	24
7.2	Payload	24
7.3	Endeffektor	25
7.4	Zweifingergreifer	25
7.5	Dreifingergreifer	26
7.6	Finger	26
7.6.1	Finray Finger	27
7.7	Fazit	27
8.	Herstellung	28
8.1	3D Druck	28
8.2	Material	28
8.2.1	Material Arm	29
9.	Grundlagen für die Konstruktion	29
9.1	Arm des LRU	29
9.1.1	Freiheitsgrade	30
9.1.2	Motoren	30
9.2	Der Arm des LRM	30
9.2.1	Armkonstellation	30
9.2.2	Freiheitsgrade	30
9.2.3	Welche Motoren	30
10.	Konstruktion	31
10.1	Erster und zweiter Freiheitsgrad	31
10.2	Dritter und vierter Freiheitsgrad	32
10.3	Fünfter und sechster Freiheitsgrad	33
10.4	Endeffektor	34
11.	Verifizierung der Konstruktion	36
12.	Gehäuse	36
13.	Integration auf Rover	38
13.1	Rendering	43
14.	Schlussbemerkung	44
15.	Anhang	46
15.1	Quellen	46
15.2	Bildnachweise	50

1. Prolog

Nach Beendigung meiner Bachelorarbeit zum Thema „Experimentelles Design eines Mars Rover Reifen auf Basis einer mechanischen Metamaterialstruktur“, suchte ich nach einem Unternehmen, das evtl Interesse an meinen darin beschriebenen Designs haben könnte.

Da sich die Ergebnisse meine Arbeit auf das Gebiet der planetaren Exploration bezogen, also einen sehr speziellen Forschungsbereich, war die Auswahl begrenzt.

Nach kurzer Suche stieß ich dann auf die Oberpfaffenhofener Niederlassung des Deutsche Zentrums für Luft und Raumfahrt und Dr. Armin Wedler. Er war dort nicht nur der Leiter des Institutes für Robotik und Mechatronik, sondern gründete darüber hinaus auch noch das Lunar Rover Mini (LRM) Studentenprojekt, welches es sich zur Aufgabe gemacht hatte, einen kleinen, autonom fahrenden Rover für planetare Exploration zu entwickeln.

Ich entschied mich dazu, Dr. Wedler zu kontaktieren und ihn zu fragen, ob ich ihm meine Arbeit zukommen lassen könnte. Erfreulicherweise bejahte er das und meldete sich wenig später bei mir zurück, um mich zu sich ans Institut einzuladen und die Inhalte persönlich mit mir zu besprechen.

Diese Einladung nahm ich gerne an und neben der Besprechung meiner Designs erhielt ich eine Führung durch das gesamte Institut. Anschließend wurde mir noch das LRM Projekt vorgestellt und ich lernte die studentischen Mitglieder kennen.

1.1 Das Lunar Rover Mini Projekt

Zum Zeitpunkt meines Besuches im Institut war das Projekt bereits weit fortgeschritten, allerdings lag die gesamte Elektronik des Rovers frei.

Dr. Wendler machte mir deshalb das Angebot, mich als weiteren Werkstudent in das Projekt aufzunehmen und mich um Design und Konstruktion eines schützenden Gehäuses zu kümmern.

In den darauf folgenden (fast) drei Jahren kam ich dieser Aufgabe nach und als Team stellten wir die neuen Versionen des Rovers auf der Vulcano Summer School 2022 in Italien und während dem Festival der Zukunft 2022 in München vor.

2. Motivation

Als einziger Designer des LRM Teams arbeitete ich weitestgehend alleine an der Gestaltung der zweiten, gehäusegeschützten Version des Rovers und hatte dabei große kreative Freiheit.

Es dauerte deshalb nicht lange, bis diese Version als „Melvins Rover“ bezeichnet wurde und auch ich fing langsam an, das ähnlich zu sehen. Ich verbrachte viel Zeit damit, daran zu arbeiten und auch außerhalb des Institutes darüber nachzudenken, sodass das LRM Projekt nicht nur irgendeine Werkstudentenstelle war, sondern wirklich Bedeutung für mich hatte.

Es ist mir deshalb ein persönliches Anliegen, dem Rover nicht nur ein schützendes Gehäuse zu geben, sondern weiter daran zu arbeiten, um ihn wirklich vollständig fertigzustellen.

3. Zielsetzung

Bisher ist der LRM dazu in der Lage, ein zu befahrendes Gelände über eine Kamera zu „mappen“ und dann autonom hindurch zu navigieren, aber mit seiner Umgebung interagieren kann er noch nicht.

Dr. Wedler schlug mir deshalb vor, diesen Umstand zu ändern und einen Roboterarm zu erarbeiten, mit dem kleine Proben während der Fahrt aufgesammelt werden können.

Diesen Vorschlag nahm ich gerne an und das Thema meiner Masterarbeit stand fest.

Auf den nun folgenden Seiten wird der gesamte Design und Konstruktionsprozess des Armes ausführlich beschrieben.

4. Gender

In dieser Arbeit werden bei sämtlichen Begriffen, die absolut oder exemplarisch für eine unbestimmte, natürliche Person oder eine Gruppe natürlicher Personen stehen und sich nicht explizit auf Männer oder Frauen beziehen, zufällig männliche oder weibliche Formen verwendet. Diese Begriffe schließen unbedingt Personen weiblichen, männlichen und anderen Geschlechts, sowie Personen ohne Geschlecht mit ein.

5. Grundlagen

Um einen Roboterarm für den LRM designen und konstruieren zu können, muss sich zuerst einmal oberflächlich mit diesem großen und komplexen Bereich der Robotik vertraut gemacht werden. Im folgenden Kapitel werden deshalb wichtige Grundlagen und Begriffe erklärt, die für den Erfolg dieses Projektes unumgänglich sind.

5.1 Bestandteile eines Roboterarmes

Roboterarme gibt es in vielen verschiedenen Ausführungen, um aber dennoch auf die wichtigsten Bestandteile eingehen zu können, werden sie anhand einer der am häufigsten genutzten Konstellationen erklärt.

Der in Abbildung 1 und zwei dargestellt Roboterarm hat sechs Achsen bzw. Freiheitsgrade. Das bedeutet,

dass es sechs verschiedenen Stellen gibt, an denen eine Bewegung, in den meisten Fällen mittels eines elektrischen Motors, ausgeführt werden kann⁽¹⁾.

Im englischen werden diese Achsen auch als Joint (Gelenk) bezeichnet, weil sie in dieser Anordnung einem menschlichen Arm sehr nahekommen⁽²⁾.

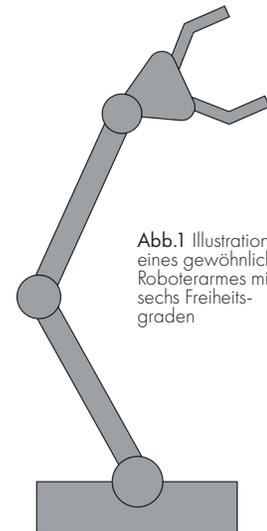


Abb.1 Illustration eines gewöhnlichen Roboterarmes mit sechs Freiheitsgraden

5.1.1 Gelenke

Joint 1: Armbasis (Torso)⁽³⁾

Joint 2: L-Achse (Schulter)⁽⁴⁾

Joint 3: U-Achse (Ellenbogen)⁽⁵⁾

Joint 4: R-Achse (Rotation des Handgelenkes)⁽⁶⁾

Joint 5: Beugen des Handgelenkes⁽⁷⁾

Joint 6: T-Achse (öffnen/schließen der Hand)

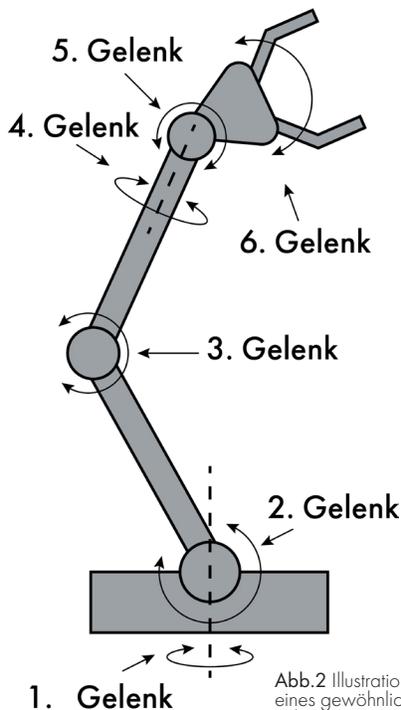


Abb.2 Illustration eines gewöhnlichen Roboterarmes mit eingezeichneten Freiheitsgraden

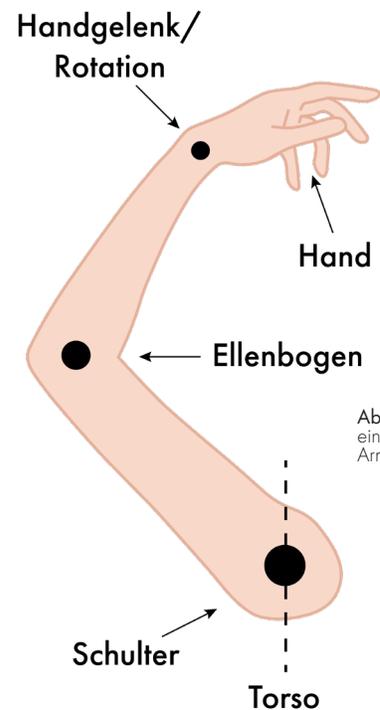


Abb.3 Illustration eines menschlichen Armes

5.1.2 Gelenktypen

Roboterarme können menschlichen Armen nicht nur in der Anzahl ihrer Gelenke ähneln, sondern auch in ihrer Funktionsweise bzw. Bewegungsart, wie die beiden folgenden Beispiele verdeutlichen:

1. Translatorische Gelenke:

Das Armglied bewegt sich auf einer geraden Bahn vorwärts/rückwärts. ⁽⁸⁾

Im menschlichen Körper kommt es zB im Ellenbogen zum Einsatz. ⁽⁹⁾

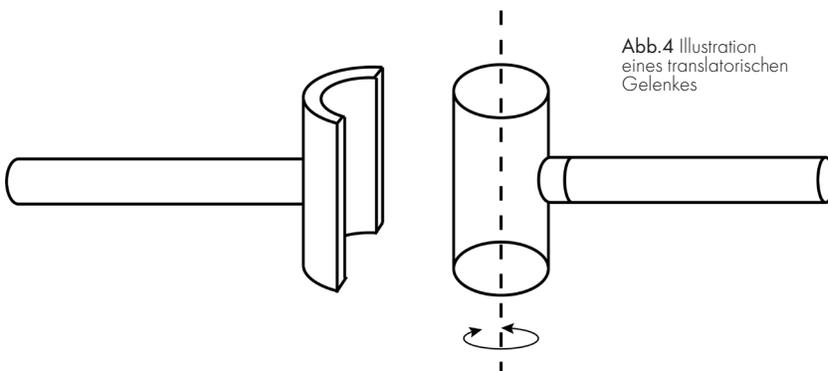


Abb.4 Illustration eines translatorischen Gelenkes

2. Rotatorische Gelenke:

Das Armglied dreht sich um eine Rotationsachse. ⁽¹⁰⁾

Ein Anwendungsbereich beim Menschen wäre zB das Kopfgelenk. ⁽¹¹⁾

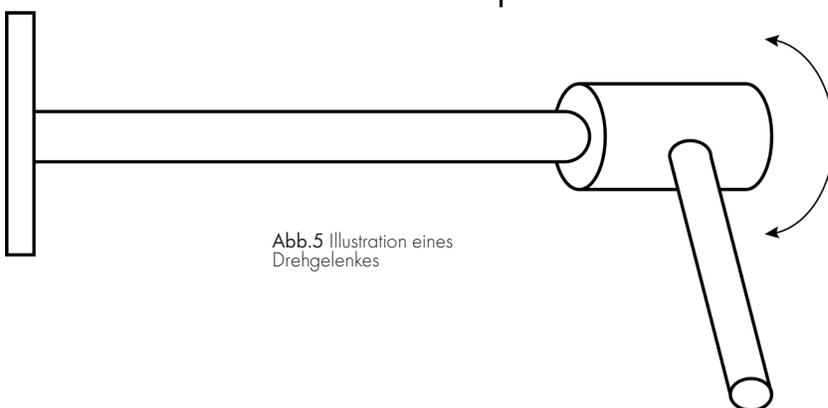


Abb.5 Illustration eines Drehgelenkes

5.1.3 Armteile

Dieser Begriff beschreibt die beweglichen Verbindungsglieder eines Roboterarmes, von dem jedes über ein Gelenk mit einem weiteren Glied verbunden ist. Eine Ausnahme bildet das letzte Armteil, denn daran schließt sich ein Endeffektor an ⁽¹²⁾.

5.1.4 Endeffektoren

Wie bereits in 5.1.3 erwähnt, ist der Endeffektor (auch Greifer, Claw, Gripper, robot tool etc genannt) ⁽¹³⁾ mit dem letzten Armteil eines Roboterarmes verbunden und ermöglicht die physische Interaktion mit seiner Umwelt.

Die meisten Endeffektoren sind dauerhaft mit dem Arm verbunden und werden nur zu Zwecken der Instandhaltung abgenommen, doch es gibt auch modulare Systeme. Diese bieten den großen Vorteil, dass durch einfaches Austauschen des Endeffektors derselbe Arm zum Erledigenden mehrerer Aufgabe genutzt werden kann ⁽¹⁴⁾.

5.1.5 Tool Center Point (TCP)

Mit diesem Begriff wird der Hauptbezugspunkt eines Endeffektors beschrieben. So wäre es bei einem Greifer der Mittelpunkt der Greifbackenverbindungsline oder, wenn ein Klebewerkzeug als Endeffektor genutzt werden sollte, der Austrittspunkt der Klebers ⁽¹⁵⁾.

5.1.6 Motoren

Damit sich die Gelenke eines Roboterarmes bewegen und eine gewünschte Position angesteuert werden kann, werden Motoren, in den meisten Fällen Elektromotoren, verwendet. Es gibt sie in vielen verschiedenen Ausführungen, welche in Kapitel 6.5 genauer betrachtet werden ⁽¹⁶⁾.

5.2 Kinematische Ketten

Nachdem in Kapitel 5.1 wichtige Begriff erklärt und ein grundlegendes Verständnis für den Aufbau von Roboterarmen geschaffen wurde, soll in dem nun folgenden Kapitel behandelt werden, wie die Bestandteile dieser Arme strukturell zusammenhängen und welche Möglichkeiten es für das Einnehmen einer gewünschten Position gibt.

Als Einstieg dazu dienen kinematische Ketten, bzw die Begriffe „serielle“ und „parallele“ Kinematik.

5.2.1 Serielle Kinematik

Die serielle Kinematik besteht aus einer Aneinanderreihung von Armteilen. Die Glieder dieser sogenannten kinematischen Kette sind durch aktive Dreh- und Schubgelenke miteinander verbunden. Sie bewegen sich ähnlich wie der Arm des Menschen. Arbeiten werden zwar präzise ausgeführt, jedoch ist es nicht möglich mehrere Produktionsvorgänge gleichzeitig auszuführen.

Die serielle Kinematik wird zum Beispiel bei Gelenkarmrobotern eingesetzt (siehe Kapitel 6.4.5). ⁽¹⁷⁾

5.2.2 Parallele Kinematik

Bei einem Roboter mit paralleler Kinematik wirken mehrere translatorische Gelenke auf den zu bewegendem Werkzeugträger. Jeder Antrieb ist direkt mit dem Werkzeugträger verbunden. Das bedeutet, alle Getriebe und Motoren sind ortsfest. Das wirkt sich besonders gut auf die Dynamik und die Präzision des Roboters aus.

Vorteile gegenüber der seriellen Kinematik sind der kompakte Aufbau, der niedrigere Schwerpunkt, keine bewegten Kabel und ein geringeres Massenträgheitsmoment. Außerdem können mehrere Vorgänge gleichzeitig erledigt werden. ⁽¹⁸⁾

Da es sich bei Roboterarmen um komplexe Anordnungen mehrerer Gelenke und Strukturbauteilen handelt, und aufgrund dessen viele verschiedene Bewegungen möglich sind, muss die Frage beantwortet werden, wie genau sich der Endeffektor von Punkt A nach B bewegen soll. Eine Antwort darauf liefern die folgenden beiden Begriffe:

5.2.3 Inverse Kinematik

Bei der inversen Kinematik wird das letzte Glied der kinematischen Kette, der Endeffektor, bewegt und in die gewünschte Lage gebracht. Die übrigen Glieder der Kette müssen dann entsprechend den Freiheitsgraden ihrer Gelenke passende Lagen einnehmen.

Vergleichen lässt sich dies mit dem menschlichen Arm, der mit seinen Gelenken auch eine solche kinematische Kette darstellt: Bringt man beispielsweise die Hand in eine bestimmte Lage, so nehmen Handgelenk, Ellenbogen und Schulter automatisch ebenfalls bestimmte Stellungen ein. Genau diese Gelenkwinkel-Stellungen müssen über die inverse Kinematik bestimmt werden.⁽¹⁹⁾

5.2.4 Vorwärts Kinematik

Sie befasst sich mit der Frage, wie aus den Gelenkwinkeln der Armelemente eines Roboters die Pose (Position und Orientierung) des Endeffektors in Bezug auf das Basiskoordinatensystem bestimmt werden kann. Sie ist das sachliche Gegenstück zur inversen Kinematik.⁽²⁰⁾

6. Vertiefendes Wissen zu Roboterarmen

Dank der erlangten Erkenntnisse über grundlegende Begriffe in Kapitel 5.1 und den darauf folgenden Erklärungen zum Thema Kinematik in Kapitel 5.2, herrscht nun ein allgemeines Verständnis über Roboterarme an sich.

Vernachlässigt wurde dabei allerdings die Umgebung von Roboterarmen, weshalb sich der nun folgende Teil dieser Arbeit genau damit befassen wird.

Den Anfang machen dabei, wie auch schon in vorangegangenen Kapiteln, Definitionen wichtiger Begriffe.

6.1 Freiheitsgrade (DOF)

Diese Bezeichnung wird verwendet, um das Gelenk eines Armes, d.h eine Stelle, an der eine Beuge-, Streck- oder Drehbewegung ausgeführt werden kann, zu beschreiben. Die Anzahl dieser DOFs gibt deshalb in den meisten Fällen Auskunft über die Motorenanzahl eines Roboterarmes. ⁽²¹⁾

In Kapitel 5.1.1 wurde bereits erwähnt, dass sich ein Roboterarm und ein menschlicher Arm in ihrem grundlegenden Aufbau gleichen. Bei der Betrachtung von Einzelteilen beider Strukturen fällt dann noch zusätzlich auf, dass sich menschliche und Roboterarmgelenke bzw. Motoren ähneln. Beide können zb mehrere Freiheitsgrade besitzen (siehe Schultergelenk) und in ihrem Bewegungsumfang eingeschränkt sein (nicht alle Gelenke/Motoren lassen sich um 360 Grad drehen). ⁽²²⁾

6.2 Kollisionsbereiche

Damit ist der Raumbereich gemeint, der von einem Roboter während der Ausführung aller möglichen Bewegungen und unter Berücksichtigung all seiner Bestandteile genutzt wird. ⁽²³⁾

6.3 Arbeitsräume

Bezogen wird sich damit auf den Bereich, welcher von dem Endeffektor eines Roboterarmes erreicht werden kann. Die vier häufigsten Fälle sehen folgendermaßen aus:

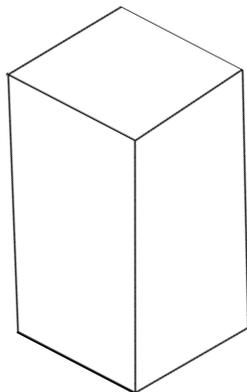


Abb.6 Kartesischer Arbeitsraum ⁽²⁴⁾

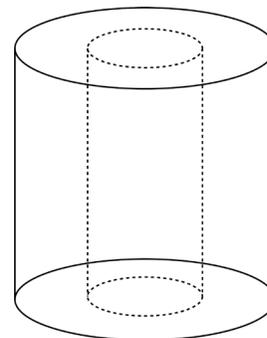


Abb.7 Zylindrischer Arbeitsraum ⁽²⁵⁾

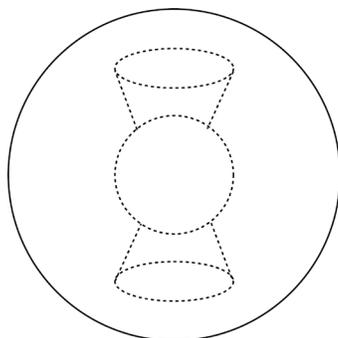


Abb.8 Späriger Arbeitsraum ⁽²⁶⁾

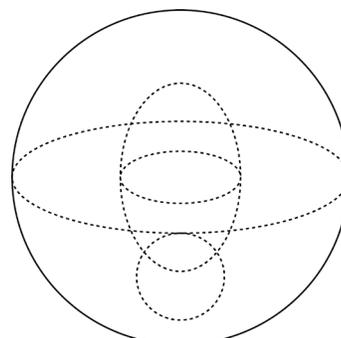


Abb.9 Artikulierter Arbeitsraum ⁽²⁷⁾

6.4 Roboterarm Konfigurationen

Die in diesem Kapitel genannten Begriffe wurden zwar erklärt, sollen aber im nun folgenden Abschnitt unter Miteinbeziehung der in Kapitel 5.1.2 erwähnten Gelenktypen und unter Zuhilfenahme der vier am häufigsten verwendeten Roboterarmkonstellationen, deutlicher dargestellt werden.

6.4.1 Kartesisch ⁽²⁸⁾

Der in Abbildung 10 vereinfacht dargestellte kartesische Roboterarm zeichnet sich durch folgende Merkmale aus:

- er besteht aus drei translatorischen Gelenken
- diese Gelenke lassen ausschließlich lineare Bewegungen zu
- dadurch lässt sich die Konstellation in X, Y und Z Richtung steuern

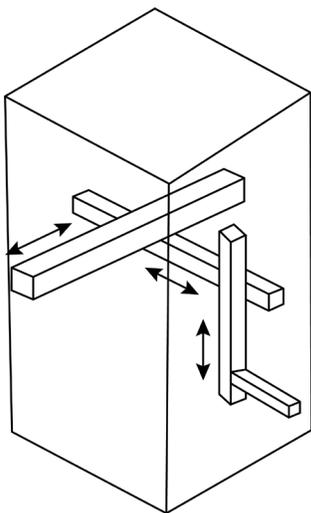


Abb.10 Kartesische Konstellation inklusive dazugehörigem Arbeitsraum

6.4.2 Zylindrisch ⁽²⁹⁾

Abbildung 11 zeigt einen zylindrischen Roboterarm mit den folgenden Eigenschaften:

- die Gesamtzahl der Gelenke beträgt drei (zwei translatorische und ein rotatorisches Gelenk)
- diese ermöglichen nicht nur Bewegungen in X, Y und Z Richtung, sondern auch Drehungen um die eigene Achse

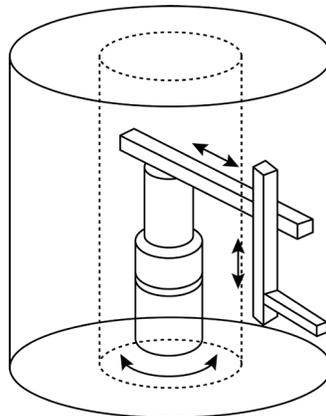


Abb.11 Zylindrische Konstellation inklusive dazugehörigem Arbeitsraum

6.4.3 Sphärisch ⁽³⁰⁾

Ein Arm dieser Art, mit den folgenden, wichtigen Merkmalen, wird in Abbildung 12 dargestellt:

- auch er besteht aus drei Gelenken (ein translatorisches und zwei rotatorische Gelenke)
- Bewegungen in X, Y und Z Richtung sind weiterhin ausführbar doch Drehungen um 2 verschiedene Achsen ermöglichen das Einnehmen komplexerer Positionen

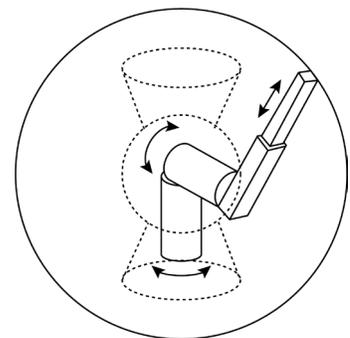


Abb.12 Sphärische Konstellation inklusive dazugehörigem Arbeitsraum

6.4.4 Artikuliert ⁽³¹⁾

Abbildung 13 verdeutlicht den Aufbau eines artikulierten Roboterarmes. Er unterscheidet sich auf folgende Art und Weise von den anderen erwähnten Konstellationen:

- statt den bisherigen drei, kommen hier vier Gelenke zum Einsatz (drei rotatorische Gelenke und ein translatorisches)
- dadurch ist er von allen bisherigen Konstellationen die flexibelste

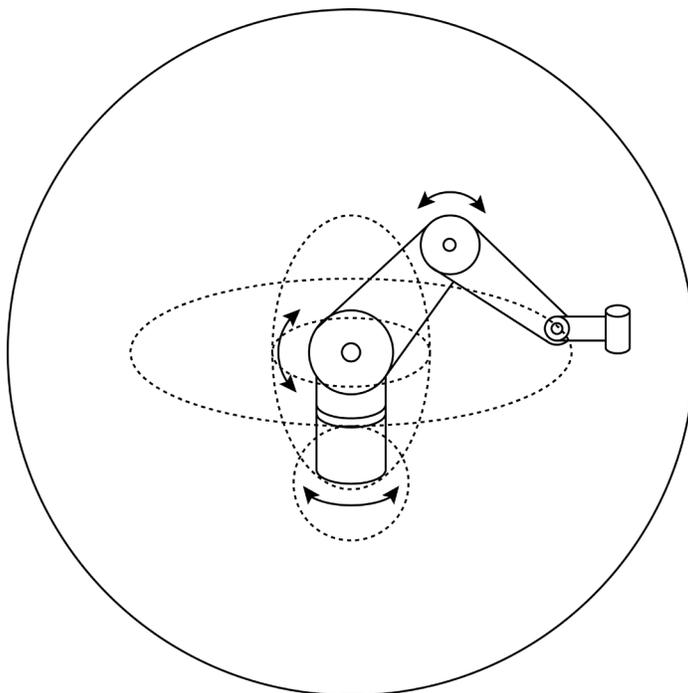


Abb.13 Artikulierte Konstellation inklusive dazugehörigem Arbeitsraum

6.4.5 Gelenkarmroboter

Sollte der Bewegungsumfang der bisher aufgeführten Konstellationen nicht ausreichen, so besteht die Möglichkeit, einen Gelenkarm bzw. Knickarmroboter zu verwenden.

Diese Art von Roboterarm lässt sich in mehrere Kategorien unterteilen, allerdings ist für diese Arbeit nur eine relevant:

Horizontal- Knickarmroboter verfügen über eine serielle Kinematik, bei der sich ein Gelenkarm an den anderen anschließt. Diese Konstruktion ermöglicht die höchste Beweglichkeit und Flexibilität von allen Roboter-Bauarten, führt jedoch zu einer Beschränkung der Traglast am Armende durch die Notwendigkeit zur Mitführung von Antrieben oder Kraftübertragungssystemen sowie zu einer geringeren Genauigkeit durch die Aufsummierung von Toleranzen. ⁽³²⁾

Je nach Anwendungsbereich können Konstellationen mit mehr oder weniger DOFs und verschiedenen Gelenken konstruiert werden, wodurch sich sowohl die Konstellation als auch der Arbeitsbereich stark ändern.

Es wird deshalb an dieser Stelle nur eine vereinfachte Version dargestellt, um das Verständnis für diese Art von Arm zu erleichtern.

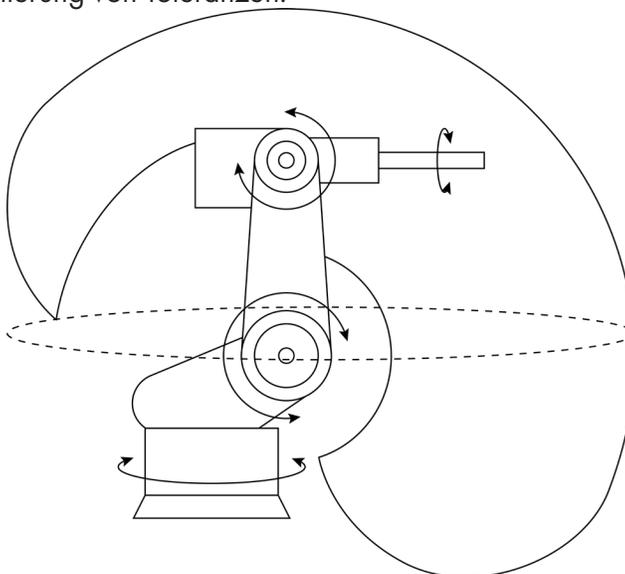


Abb.14 Gelenkarmkonstellation mit vier Freiheitsgraden inklusive dazugehörigem Arbeitsraum

Bei allen bisher behandelten Konfigurationen handelte es sich um stationäre Roboterarme, doch wie bereits in Kapitel 3 erwähnt, ist es das Ziel dieser Arbeit, einen Arm für den LRM zu entwickeln und weil es sich dabei um einen autonom fahrenden Rover handelt, ist der Arm folgenderer Sonderkategorie zuzuordnen:

6.4.6 Mobiler Roboterarm ⁽³³⁾

Ein großer Vorteil der stationären Robotik liegt darin, dass die Bewegungen auf fest programmierten Bahnen erfolgen, wodurch Arbeitsraum und Kollisionsbereich genauestens bekannt sind.

Bei einem mobilen Roboterarm ist das nicht mehr der Fall.

Es ist deshalb unbedingt notwendig, den Arm für den LRM so zu gestalten und zu konstruieren, dass er, egal in welchem Gelände er sich

befindet, immer dazu in der Lage ist, Proben einzusammeln.



Abb.15 Beispiel eines mobilen Roboters

6.5 Motoren

Mit dem bisher vermittelten Wissen über die einzelnen Bestandteile, Steuerungs- und Konstellationsmöglichkeiten von Roboterarmen sollen in diesem Kapitel die am häufigsten in der Robotik verwendeten elektronischen Motoren behandelt werden. Das damit erlangte Wissen über ihre Vor- und Nachteile wird die spätere Suche nach den geeignetsten Motoren für den Roboterarm erleichtern.

6.5.1 DC Motor ⁽³⁴⁾

Sie werden in zwei Ausführungen angeboten, einmal mit und einmal ohne Bürsten (brushed und brushless).

Ein brushed DC Motor weist eine Effizienz von 75 % bis 80 % auf, erreicht ein hohes Drehmoment bei geringer Geschwindigkeit und ist einfach zu steuern. Allerdings ist er aufgrund der verbauten Bürsten, welche für die Rotation benötigt werden, laut.

Im Gegensatz dazu ist der brushless DC Motor leiser, noch effizienter und darüber hinaus dazu in der Lage, sein kontinuierliches, maximales Drehmoment beizubehalten. Negativ anzumerken ist die schwerere Steuerung, die in manchen Fällen den Einsatz eines speziellen Regulators erfordert.



Abb.16 DC Motor

6.5.2 Schrittmotor ⁽³⁵⁾

Sie sind dazu in der Lage, präzise Bewegungen zu kontrollieren, ihr maximales Drehmoment bei niedrigen Geschwindigkeiten zu erreichen und außerdem einfach in der Steuerung zu sein.

Unvorteilhaft ist ihre Tendenz, warm zu werden, relativ ineffizient zu sein und eine Menge Lärm zu produzieren

Darüber hinaus erreichen sie nur geringe Höchstgeschwindigkeiten und sind dafür bekannt, bei großer Last Schritte zu überspringen, was kritisch für einige Anwendungsbereiche sein kann.

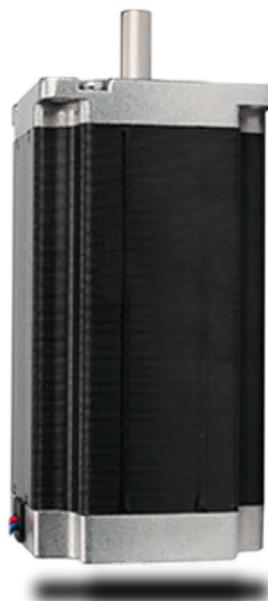


Abb.17 Schrittmotor

6.5.3 Servomotor ⁽³⁶⁾

Dieses Mitglied der Elektromotorenfamilie ist leicht, effizient und ermöglicht extrem präzise Bewegungen dank eines Feedbackloops, der Abweichungen zwischen tatsächlicher und gewünschter Geschwindigkeit erkennt und korrigiert.

Hinzu kommt das Erreichen hoher Drehmomente bei hohen Geschwindigkeiten und die Fähigkeit, mit dynamischen Ladungsänderungen zurechtzukommen

Sie werden häufig für Roboterarme genutzt, deren Bewegungen denen des Menschen nachempfunden sind.



Abb.18 Servomotor

7. Der Arm für den LRM

Für Kapitel sieben dieser Arbeit soll das bisher angesammelte theoretische Wissen auf den zu entwickelnden Roboterarm für den Lunar Rover Mini angewendet werden. Doch bevor die Design und Konstruktion Phase eingeleitet wird, muss ermittelt werden, wo genau sich der Arm idealerweise platzieren lässt.

Nach kurzer Absprache mit Dr. Wedler stand fest, dass der Arm nur im hinteren Teil des oberen Gehäuses angebracht werden kann.

Das liegt vor allem daran, dass die Kabel des Armes von dieser Position aus unkompliziert an die sich im Inneren des Rovers befindlichen Platinen angeschlossen werden können.

Störend ist lediglich die Antenne, die in ihrer jetzigen Lage die Bewegungsfreiheit des Armes blockieren würden, doch sie kann problemlos um 180° gedreht und dann weiter in Richtung Kamera (Pan Tilt Einheit) geschoben werde, wodurch sie nicht mehr im Weg ist.

Eine Bestätigung für diese Annahme findet sich in der Lightweight Rover Unit (LRU), die dem LRM nicht nur optisch ähnlich sieht, sondern auch vergleichbares Gelände befährt.

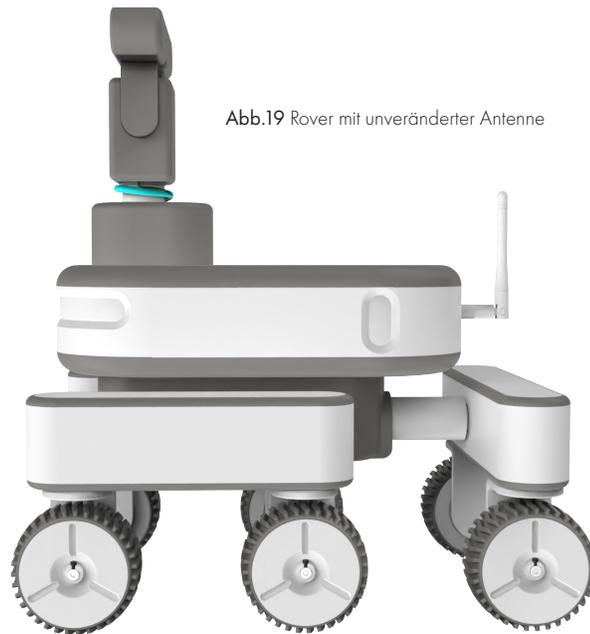


Abb.19 Rover mit unveränderter Antenne

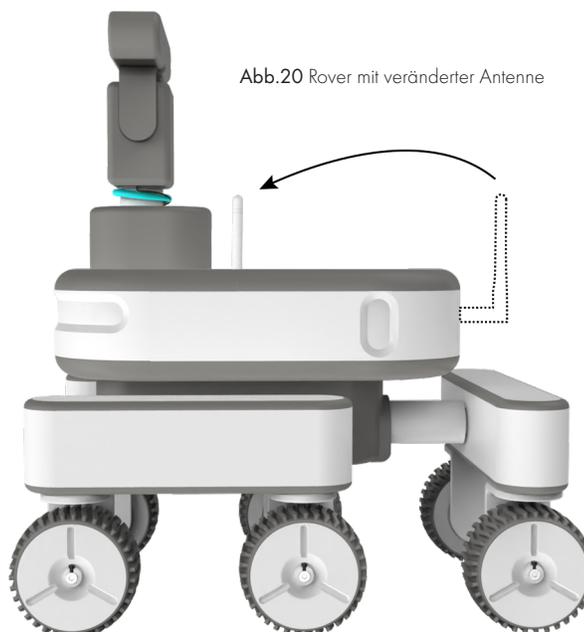


Abb.20 Rover mit veränderter Antenne

7.1 Lightweight Rover Unit (LRU)

Im Jahr 2014 wurde die Lightweight Rover Unit (LRU) erstmals der Öffentlichkeit präsentiert. Es handelt sich dabei um den Prototypen eines mobilen Roboters zur Exploration in unbekannte, unwegsame und schwer zugängliche Gelände. Die Forschungsarbeiten zur Teilautonomie dienen als Vorbereitung für zukünftige planetare Explorationsmissionen und terrestrische Katastropheneinsätze. ⁽³⁷⁾



Abb.21 Auch hier befindet sich der Arm im hinteren Teil des Rovers, was nicht nur die Montage erleichtert sondern auch das Aufsammeln von Gegenständen gut möglich macht

7.2 Payload

Trotz des gewaltigen Größenunterschiedes der beiden Rover gibt es einige Gemeinsamkeiten, dank derer sich Rückschlüsse von der Payload des LRUs, auf die des LRMs ziehen lassen.

Beide Rover befahren ähnliche Gelände und sammeln dabei Gegenstände ein, wobei der LRU mit einem Korb ausgestattet wurde, in dem diese platziert werden können.

Für den LRM bedeutet das, dass auch er Objekte einsammeln wird (voraussichtlich Gesteinsproben), allerdings wesentlich kleinere und sie ebenfalls in einem Behältnis platzieren muss.

Diese Informationen sind bei der Wahl des richtigen Endeffektors von entscheidender Bedeutung.

7.3 Endeffektor

In den zwei zuvor behandelten Kapiteln wurde festgestellt, dass das von beiden Rovern zu befahrende Gelände unbekannt, unwegsam und schwer zugänglich sein wird. Oder anders ausgedrückt: Es ändert sich ständig.

Für den Endeffektor bedeutet das, dass auch Form und Größe der einzusammelnden Proben nie einheitlich sein werden und er deshalb dazu in der Lage sein sollte, sich daran anzupassen. Darüber hinaus wäre es von Vorteil, wenn sowohl einzelne als auch mehrere Proben auf einmal erfasst werden könnten.

Diese zu erfüllenden Voraussetzungen grenzen die möglichen Endeffektorausführungen stark ein und lassen nur eine Option übrig: Den Greifer.

Aber da der Arm so kompakt und leicht wie möglich sein sollte, fallen aufwendige Konfigurationen mit schweren Motoren oder komplizierten Mechanismen weg. Dieser Umstand wirkt sich außerdem auf Art und Anzahl der Finger aus, mit denen Gegenstände aufgehoben werden.

Für gewöhnlich haben Greifer, die als Endeffektoren an Roboterarmen angebracht werden zwei bis drei Finger⁽³⁸⁾. Es gibt Fälle, in denen diese Anzahl überschritten wird, doch aufgrund ihrer komplexen technischen Umsetzbarkeit und den damit verbundenen hohen Kosten, spielen sie für diese Arbeit keine Rolle. Im folgenden Kapitel werden deshalb nur die Vor- und Nachteile von Zwei- und Dreifingergreifern besprochen, woraufhin ein finales Fazit für das zu verwendende Design des LRM Greifers gezogen werden kann.

7.4 Zweifingergreifer

Dieser technisch sehr einfach umzusetzende Greifer kann Objekte auf drei Arten aufsammeln:

1. Einklemmen⁽³⁹⁾

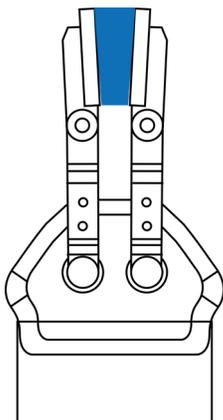


Abb.22 Zweifingergreifer mit eingeklemmtem Objekt

2. Einrollen⁽⁴⁰⁾

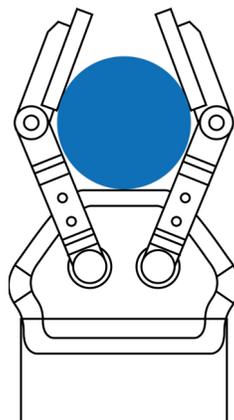


Abb.23 Zweifingergreifer mit eingerolltem Objekt

3. Mischung aus beidem⁽⁴¹⁾

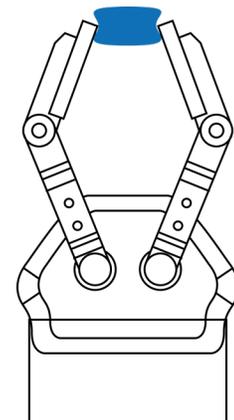


Abb.24 Zweifingergreifer mit eingeklemmtem/ eingerolltem Objekt

7.5 Dreifingergreifer

Wird das Zweifingermodell um eine weitere Gliedmaße erweitert, so steigen Komplexität und Herstellungskosten deutlich an.

Die Art, Gegenstände aufzunehmen, unterscheidet sich dabei nicht von der Zweifingervariante, allerdings ist dieses Modell dazu in der Lage, deutlich unförmigere Objekte nicht nur aufzuheben, sondern sie vor allem sicherer festzuhalten.⁽⁴²⁾

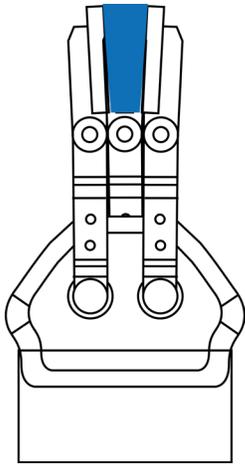


Abb.25 Dreifingergreifer mit eingeklemmtem Objekt

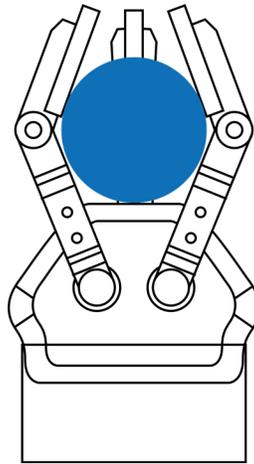


Abb.26 Dreifingergreifer mit eingerolltem Objekt

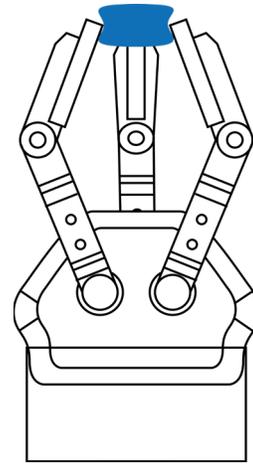


Abb.27 Dreifingergreifer mit eingeklemmtem/eingerolltem Objekt

7.6 Finger

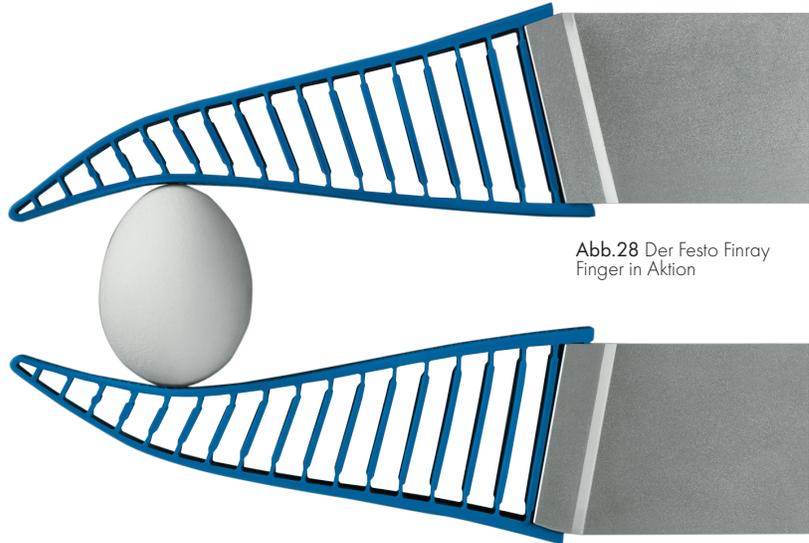
Nach Klärung der verschiedenen Vor und Nachteile der Zwei und Dreifingerkonstellationen soll nun geklärt werden, welche Eigenschaften die Finger, mit denen der Greifer arbeitet, aufweisen müssen.

In Kapitel 7.3 wurde angemerkt, dass sich Form und Gewicht der zu greifenden Payload ständig ändern wird. Die Finger des Endeffektors müssen auf diesen Umstand vorbereitet sein und sollten sich an verschiedene Formen anpassen können. Darüber hinaus müssen sie, so wie alle anderen Bestandteile des Armes, so leicht und günstig in der Herstellung sein wie nur möglich.

Erfreulicherweise muss ein Finger dieser Art nicht extra entwickelt werden, sondern existiert bereits. Das folgende Kapitel wird näher auf ihn eingehen und seine Besonderheiten hervorheben.

7.6.1 Finray Finger

Die adaptiven Finger mit Fin Ray-Struktur passen sich flexibel an unterschiedlichste Formen an. Inspiriert von Fischflossen knickt auch diese Struktur bei seitlichem Druck nicht weg, sondern wölbt sich um den Druckpunkt herum. So können damit ausgestattete Grepper ohne zusätzliche Sensorik oder Regelungstechnik verschieden geformte und auch sehr empfindliche Objekte greifen. ⁽⁴³⁾



7.7 Fazit

Nachdem das Thema Endeffektor speziell mit Bezug auf den Roboterarm des LRM umfänglich behandelt wurde, konnte sich mit Dr. Wedler auf die Konstruktion eines Greifers mit folgenden Eigenschaften geeinigt werden:

Um Kosten zu sparen und den Aufbau möglichst leicht und unkompliziert zu halten, werden zwei Finger verwendet, die einen Gegenstand durch eine simple, lineare Bewegung greifen können.

Als Finger selbst werden die in 7.5.1 behandelten Modelle von Festo verwendet.

8. Herstellung

Im Laufe dieser Arbeit wurde mehrfach angemerkt, dass Gewicht und Herstellungskosten bei der Entwicklung des Armes möglichst gering sein sollten.

Dieser Faktor spielt nicht nur in den Bereichen Design und Konstruktion eine wichtige Rolle, sondern auch bei der Suche nach einem geeigneten Herstellungsverfahren.

Grundsätzlich ist die Auswahl hierbei sehr groß, allerdings wird der Arm in Kooperation mit dem Deutschen Zentrum für Luft und Raumfahrt entwickelt, weshalb nur ein Verfahren infrage kommt, welches auch im Institut zur Verfügung steht.

Die Wahl fällt deshalb sehr leicht.

8.1 3D Druck

Die 3D Druck Werkstatt auf dem Gelände des DLR wird von hervorragenden ausgebildeten Mitarbeitern geführt, die schon während dem Druck des LRM Gehäuses mit der Qualität ihrer Arbeit überzeugen konnten.

Dank mehreren vorhandenen Druckern unterschiedlicher Preissegmente, vielen verschiedenen Filamenten und diversen Nachbearbeitungsmöglichkeiten gibt es kaum Formen, die nicht günstig und schnell hergestellt werden können



Abb.29 Großer Industrie 3D Drucker

8.2 Material

Die Frage nach dem geeigneten Druckmaterial ist ausschließlich für den Arm von großer Relevanz, denn die Finger werden nicht etwa selbst hergestellt, sondern bereits fertig von Festo erworben.

Die Rücksprache mit den Mitarbeitern führte schließlich zu folgendem Ergebnis:

8.2.1 Material Arm⁽⁴⁴⁾

Rover und Arm werden in offenem, unwegsamem Gelände genutzt und müssen deshalb nicht nur äußerst stabil sein, um die Elektronik zu schützen, sondern auch mit den Elementen zurechtzukommen.

Die Empfehlung für das zu verwendende Material lautet deshalb ASA, wobei folgenden Eigenschaften besonders hervorzuheben sind:

- Witterungs und UV beständig
- hohe Steifigkeit und Zähigkeit
- Oberflächenveredelung durch Aceton möglich
- Schäden lassen sich durch Aceton leicht reparieren
- Fett, Öl und Temperaturbeständig bis 90°



Abb.30 3D gedrucktes Objekt aus ASA

9. Grundlagen für die Konstruktion

Da es nicht Ziel dieser Arbeit ist, ein völlig neuartiges Armkonzept zu erfinden, wird sich auf Empfehlung von Dr Wedler am Arm des LRU orientiert.

Dieses Kapitel wird deshalb genutzt, um die relevanten Eigenschaften dieses Armes zu thematisieren.

9.1 Arm des LRU

Damit in dem vom Rover zu befahrenden Gelände möglichst viele Stellen für das Aufsammeln von Proben erreicht werden können, hat man den LRU mit einem Horizontal-

Gelenkarmroboter der Firma Jaco versehen.



Abb.31 Der Jaco Kinova Gen I Roboterarm

9.1.1 Freiheitsgrade

Schließt man die Anzahl der DOFs im Endeffektor aus, so besitzt der Arm selbst sechs Freiheitsgrade, aber weil er sich auf dem LRU befindet, gehört er zur Sonderkategorie „mobiler Roboterarm“.

In einem solchen Fall werden die Freiheitsgrade des Rovers mit dazugezählt, womit eine Gesamtzahl von neun erreicht wird.

9.1.2 Motoren

Es war leider nicht möglich, das Gehäuse des Armes zu entfernen und einen genaueren Blick auf die verbauten Motoren zu werfen (der wieder Zusammenbau wäre zu aufwendig gewesen), allerdings konnte Dr. Wedler dennoch erklären, dass sich im Inneren des Armes speziell entwickelte, bürstenlose DC Motoren befinden (siehe Kapitel 6.5.1). Diese wurden zusätzlich mit mehreren Sensoren für Encoder, Drehmoment, Spannung und Temperatur sowie Akzelerometern ausgestattet.

9.2 Der ARM des LRM

Die bisher aus Kapitel 9 gewonnenen Erkenntnisse können in den nun folgenden Schritten auf den LRM Arm übertragen werden.

9.2.1 Armkonstellation

In Anlehnung an den LRU wird auch der Arm des LRM als Gelenkarmroboter konstruiert. Der damit erzielte Grad an Beweglichkeit wird das Aufsammeln von Proben auch an schwer zu erreichenden Stellen möglich machen.

9.2.2 Freiheitsgrade

Sowohl bei der DOF Anzahl als auch bei den Gelenkarten wird sich am LRU orientiert.

9.2.3 Welche Motoren

Laut Dr. Wedler sollen für die ersten drei Freiheitsgrade Standard und für die letzten drei Micro Servomotoren verwendet werden.

Um den Greifer in Bewegung zu versetzen sollte ein Modell der Größe Nano ausreichen.

Damit wären nun alle notwendigen theoretischen Informationen für den Roboterarm zusammengetragen und es kann mit der Konstruktion begonnen werden.

10. Konstruktion

Bevor mit der Ausarbeitung eines ersten Konzeptes gestartet wird, soll kurz festgehalten werden, worauf hierbei besonders geachtet werden muss:

1. Es soll sich am Aufbau des LRU Armes orientieren werden.
2. Der Arm selbst wird über 6 Freiheitsgrade verfügen.
3. Insgesamt werden 7 Servomotoren verwendet (drei Standard, drei Micro, ein Nano).
4. Der lineare Greifer sollte wenig wiegen, einfach zu bauen und idealerweise modular sein.
5. Der Greifer verwendet zwei Finray Finger von Festo.
6. Alle Teile werden über das 3D Druck Verfahren aus ASA hergestellt.
7. Der Arm wird im hinteren Teil des Rovers angebracht.
8. Der LRM braucht eine Aufbewahrungsmöglichkeit für die aufgesammelten Proben.

Bei der genaueren Analyse des LRU Armes in Kapitel 7.5.1 wurde angemerkt, dass seine Bewegungen durch bürstenlose DC Motoren ermöglicht werden, die ihrer Form nach zylindrisch sind (siehe Kapitel 6.5.1).

Beim LRM Arm werden allerdings rechteckige Servomotoren verwendet, was bedeutet, dass der Aufbau des LRU Armes nicht 1:1 für den des LRM übernommen werden kann. Aus diesem Grund werden diverse Anpassungen vorgenommen, um dennoch einen ähnlichen Aufbau unter Verwendung von Servomotoren zu erzielen.

10.1 Erster und zweiter Freiheitsgrad

Abb.32 Die Pan Tilt Einheit des Lunar Rover Mini

Die Basis des LRM Armes soll sich genau so wie beim LRU, horizontal um ihre eigene Achse drehen.

Das Finden einer völlig neuartigen Lösung ist nicht nötig, stattdessen kann der von Dr. Wedler für die Pan Tilt Einheit des LRM Rovers konstruierte und erfolgreich

verwendete Aufbau exakt übernommen werden.

Auf diesem Konzept aufbauend, können weitere Armteile hinzugefügt werden, bis das angestrebte Ziel von insgesamt 6 Freiheitsgraden erreicht ist.



10.2 Dritter und vierter Freiheitsgrad

Um die Bewegungsmöglichkeiten dieser Armbasis zu erweitern, muss sie um zusätzliche Servomotoren ergänzt werden.

Dieser Schritt wurde bei der Pan Tilt Einheit zwar nicht vorgenommen, allerdings kann sich ein wenig an der Art und Weise, auf die der bewegliche Bügel der Kamera montiert wurde, orientiert werden.

Anzumerken ist hierbei, dass nur eine Seite des Bügels mit einem Servomotor verbunden ist, welcher das nach vorne und hinten Neigen (Tilt) der Kamera ermöglicht.



Abb.33 Der Bügel der Pan Tilt Einheit steckt auf der linken Seite in einem kleinen Kugellager



Abb.34 Der Bügel der Pan Tilt Einheit ist auf der rechten Seite mit einem Servomotor verbunden

Für die Konstruktion eines zweiten Armteiles kann diese Art der Verbindung übernommen werden, zusätzlich muss aber noch auf Gewicht und Stabilität geachtet werden.

Aus diesem Grund werden die 3D gedruckten Zylinder, in die ein Gewinde hineingeschnitten wurde, um beide Teile der Pan Tilt Basis miteinander zu verschrauben, durch „Abstandshalter“ ersetzt. Sie kamen schon beim Bau des Rovers zum Einsatz und sorgten dort für das zuverlässige, feste Verschrauben von 3D gedruckten Teilen. Die sich darin befindlichen Gewinden sind deutlich zuverlässiger als die per Hand geschnitten und sowohl Aufwand als auch Kosten lassen sich sparen, indem diese bereits im Institut vorrätigen Bauteile erneut genutzt werden. Die dabei entstehende, neue Basis lässt sich für weitere Armglieder nutzen.



Abb.36 Abstandshalter

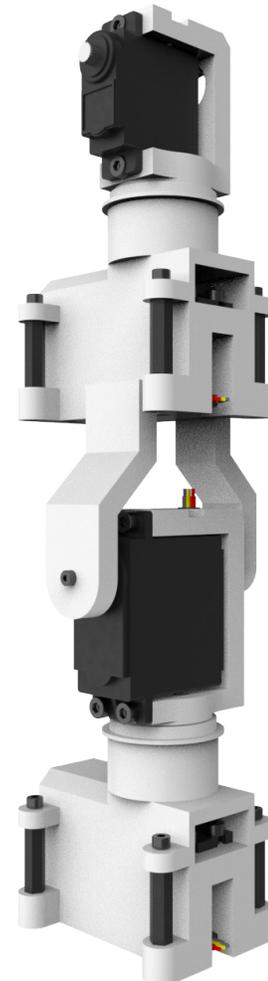


Abb.37 Neue Basis mit Abstandshalter, angeordnet zu Arm mit vier Freiheitsgraden

10.3 Fünfter und sechster Freiheitsgrad

Die beiden bisher konstruierten Armteile können einfach um ein weiteres ergänzt werden, allerdings in kleinerer Version für die Micro Motoren, wodurch die Gesamtanzahl der DOFs nun sechs beträgt.

Abb.38 Um zwei weitere Freiheitsgrade erweiterter Arm



10.4 Endeffektor

Damit der bisher modellierte Arm Proben aufsammeln kann, muss er um einen Greifer ergänzt werden.

Sowohl die zu erfüllenden Voraussetzungen als auch die Art des zu verwendenden Greifers wurden in Kapitel 10 beschrieben, weshalb ohne weitere Umschweife nach einer geeigneten Vorlage gesucht werden kann.

Auf Grabcad.com gibt es eine große Auswahl an linearen Greifern und nach kurzer Suche stand fest, dass sich die Version des Users Jinzhou Liu sehr gut eignet.

Der gesamte Aufbau ist einfach, effektiv, wiegt wenig und die verbauten Finger lassen sich schnell austauschen.



Abb.39 Linearer Grepper des Grabcad Users Jinzhou Liu

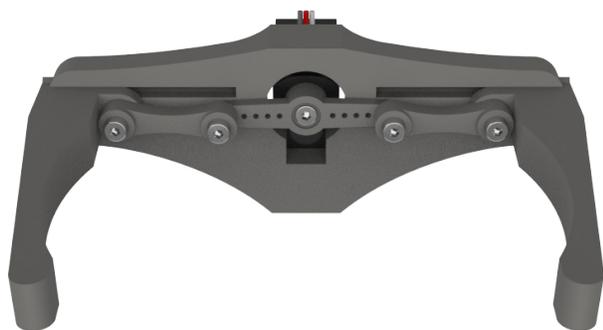


Abb.40 Linearer Grepper in geöffnetem Zustand

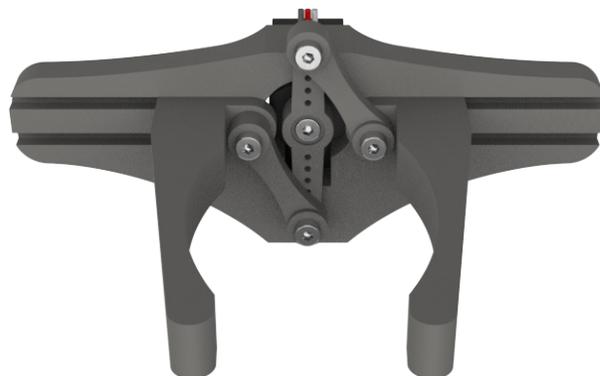


Abb.41 Linearer Grepper in geschlossenem Zustand

Dieses Modell konnte nach einigen Änderungen so angepasst werden, dass sich die Festo Finray Finger darauf montieren ließen. Über einfaches Anschrauben weiterer Bügel kann dieser Greifer dann zur bisherigen Konstruktion des Armes hinzugefügt werden, womit die zugrunde liegende Gesamtkonstruktion vollständig ist.



Abb.42 Linearer Grepper mit Festo Finray Fingern



Abb.43 Linearer Grepper mit Festo Finray Fingern in geöffnetem Zustand

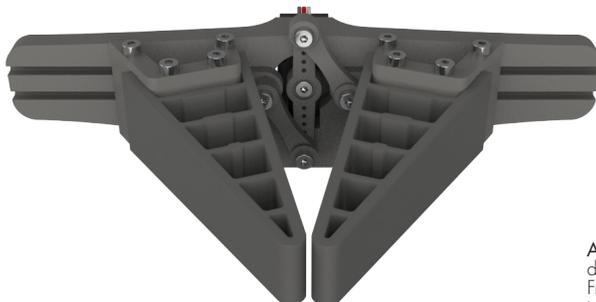


Abb.44 Linearer Grepper mit Festo Finray Fingern in geschlossenem Zustand



Abb.45 fertige Konstruktion des Roboterarmes mit sechs Freiheitsgraden und montiertem Grepper

11. Verifizierung der Konstruktion

Aufgrund von Lieferengpässen wichtiger Bauteile war es leider nicht möglich, den bis hier her konstruierten Arm auszudrucken und zusammenzubauen. Eine physische Überprüfung der Funktionsfähigkeit war deshalb leider nicht möglich, allerdings konnte sich auch hier auf die Erfahrung von Dr. Wedler verlassen werden, der das Konzept anhand des 3D Modells absegnete.

12. Gehäuse

Die Grundkonstruktion ist somit beendet, allerdings liegen alle Servomotoren noch frei und sollen deshalb in diesem Kapitel ein schützendes und zum Rest des Rovers passendes Gehäuse erhalten.

Auch bei diesem Schritt muss nicht ganz von vorne angefangen werden, denn neben dem zugrunde liegenden Aufbau, der von der Pan Tilt Einheit übernommen wurde, kann auch das Gehäuse von selbiger auf den Arm übertragen werden.

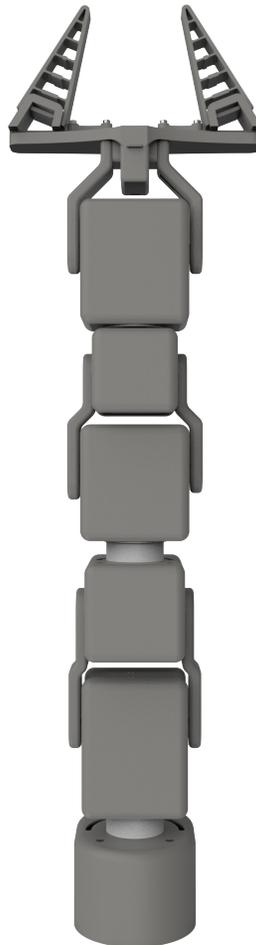


Abb.46 fertige Konstruktion des Roboterarmes mit Gehäuse (frontal)



Abb.47 fertige Konstruktion des Roboterarmes mit Gehäuse (seitlich)

Lediglich funktionale Öffnungen für das Management der Servokabel müssen ergänzt werden. Diese sind absolut notwendig, um die Bewegungen des Armes nicht zu blockieren. Die eingefügten Bilder verdeutlichen es.

Die Kabel des obersten Servomotors können durch Vertiefungen in den Bügeln den Beugebewegungen folgen und laufen von dort aus in das Innere des mittleren Gehäuses (siehe Abbildung 48). Von dort treten sie über ein kleines Loch auf der Unterseite aus und gelangen durch die halbkreisförmige Öffnung in das unterste Gehäuse (siehe Abbildung 49). Auf diese Weise werden Beuge- noch Drehbewegungen von den Kabeln blockiert. Diese Kabelführung wiederholt sich bei jedem Armglied.

Abb.48 Bügel mit Vertiefung für Kabel der Servomotoren

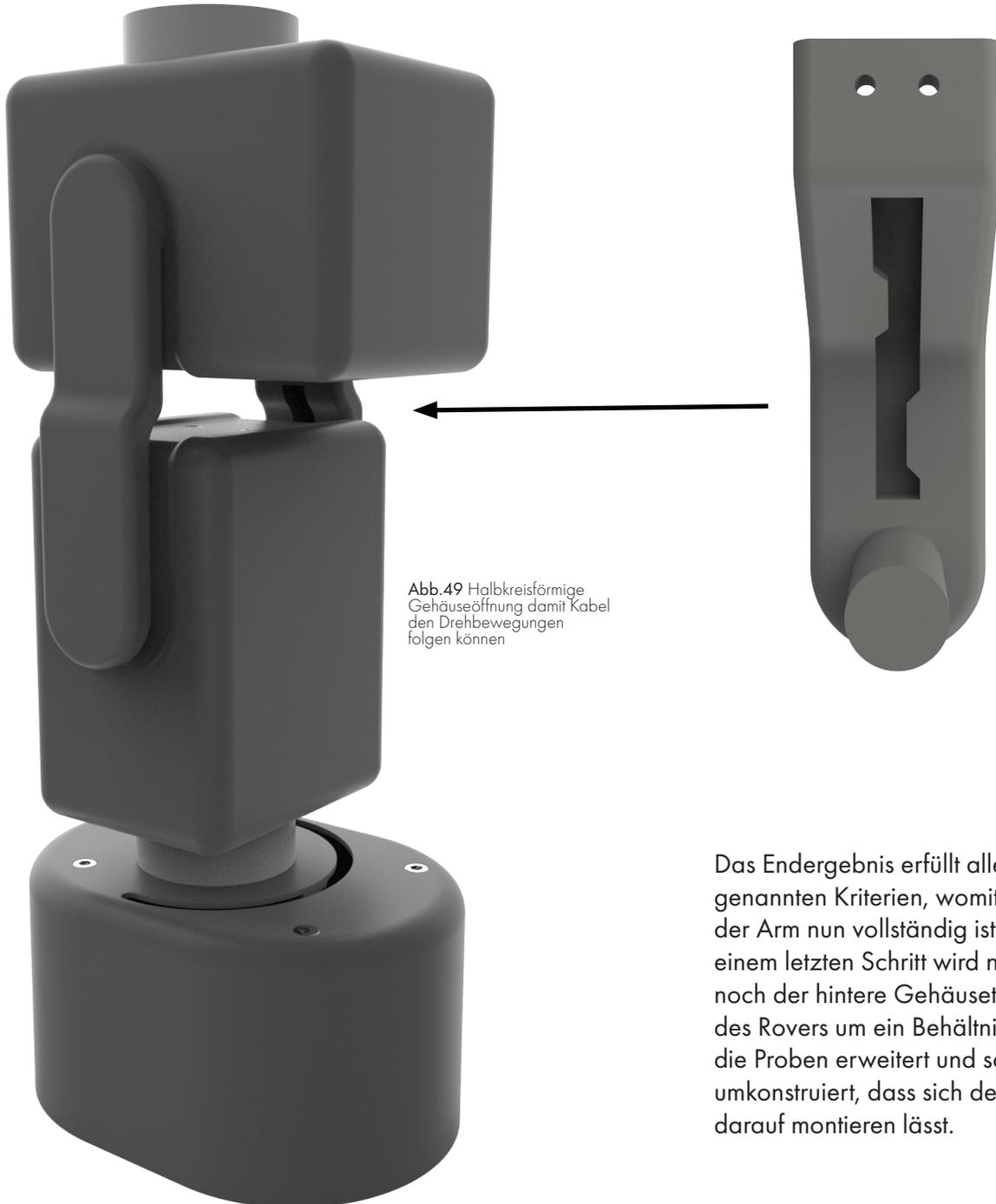


Abb.49 Halbkreisförmige Gehäuseöffnung damit Kabel den Drehbewegungen folgen können

Das Endergebnis erfüllt alle genannten Kriterien, womit der Arm nun vollständig ist. In einem letzten Schritt wird nur noch der hintere Gehäuseteil des Rovers um ein Behältnis für die Proben erweitert und soweit umkonstruiert, dass sich der Arm darauf montieren lässt.

13. Integration auf Rover

Nachdem bereits in Kapitel 7 erklärt wurde, dass die Antenne des Rovers problemlos um 180 Grad gedreht und weiter nach innen verschoben werden kann, ist genügend Platz auf dem hinteren Teil des Gehäuses frei, um den Arm darauf zu montieren.

Anschließend wurde nach Absprache mit Dr Wedler der Entschluss gefasst, den Arm in einem Winkel von 45 Grad anzubringen, damit der Boden leichter erreicht werden kann.

Die Basis des Armes wird dafür fest in das Gehäuse integriert. Alle weiteren Komponenten können dann einfach hinzugefügt werden.

Darüber hinaus wurde auch gleich eine einfache Vertiefung in das neue Gehäuseteil eingelassen, in der eingesammelte Proben abgelegt werden können.

Abb.50 Normaler, hinterer Gehäuseteil des LRM

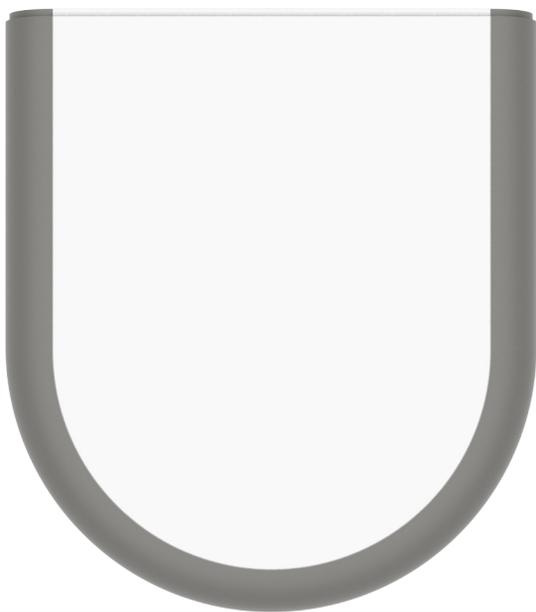


Abb.51 Veränderter, hinterer Gehäuseteil des LRM inkl. Vertiefung für Proben und Roboterarmbasis



Abb.52 Montierter Arm
kann den Boden problemlos
erreichen

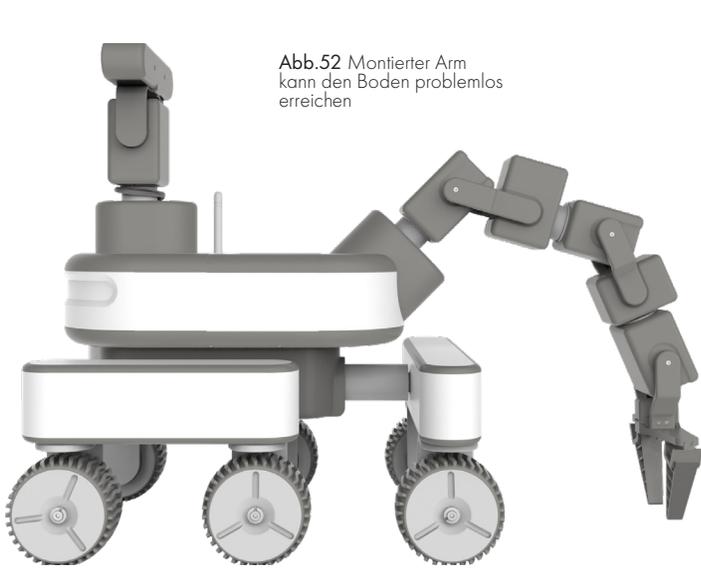
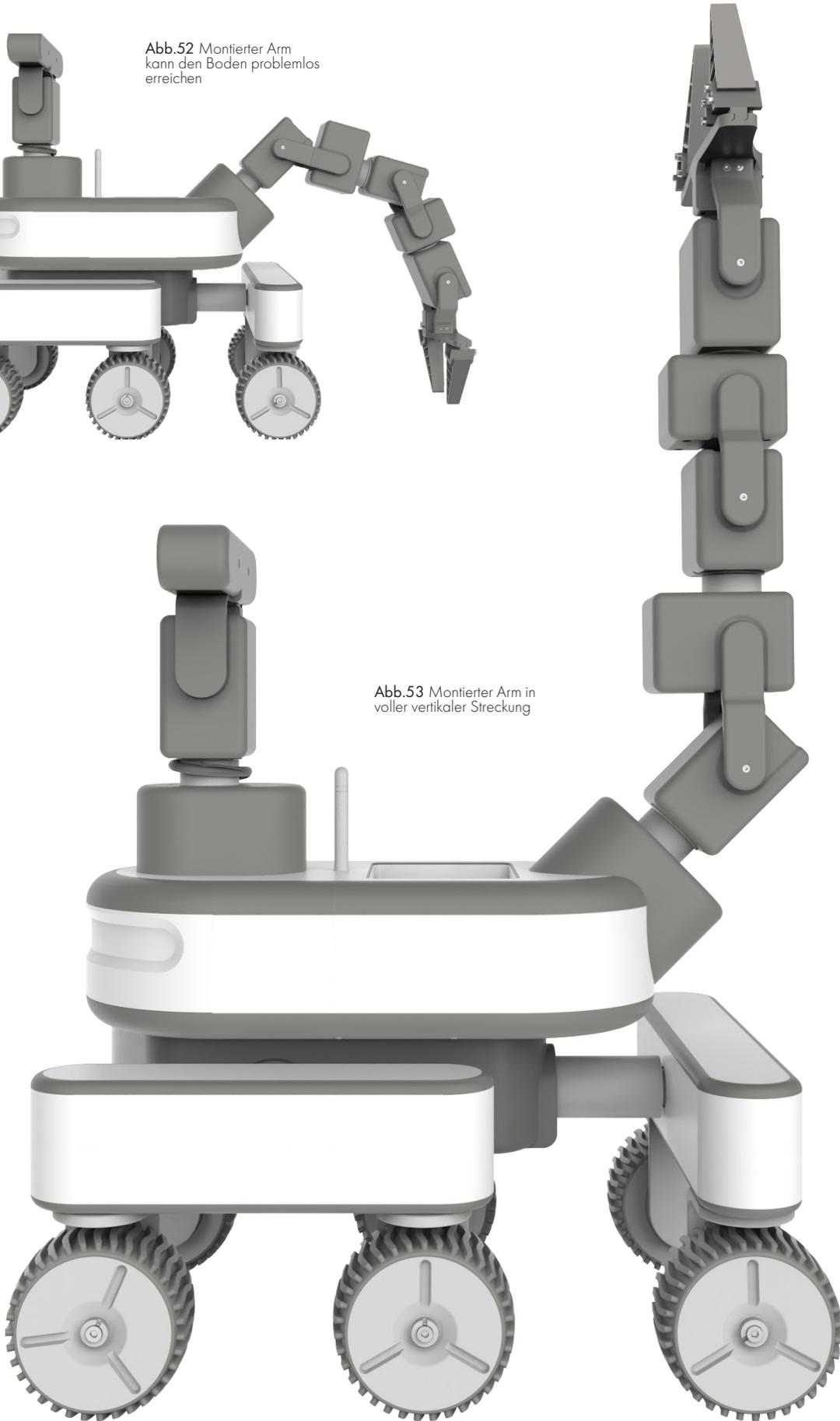


Abb.53 Montierter Arm in
voller vertikaler Streckung



Bei der bisherigen Version des Rovers war es nicht nötig, das hintere Gehäuseteil fest mit dem Rest zu verbinden, weil es für mögliche Reparaturen der darunter liegenden elektronischen Komponenten schnell und einfach abgenommen werden können sollte.

Eine simple Magnetverbindung gewährleistet das zwar, allerdings ist sie nicht stark genug, um die neu hinzugefügte zusätzliche Last des Armes zu halten.

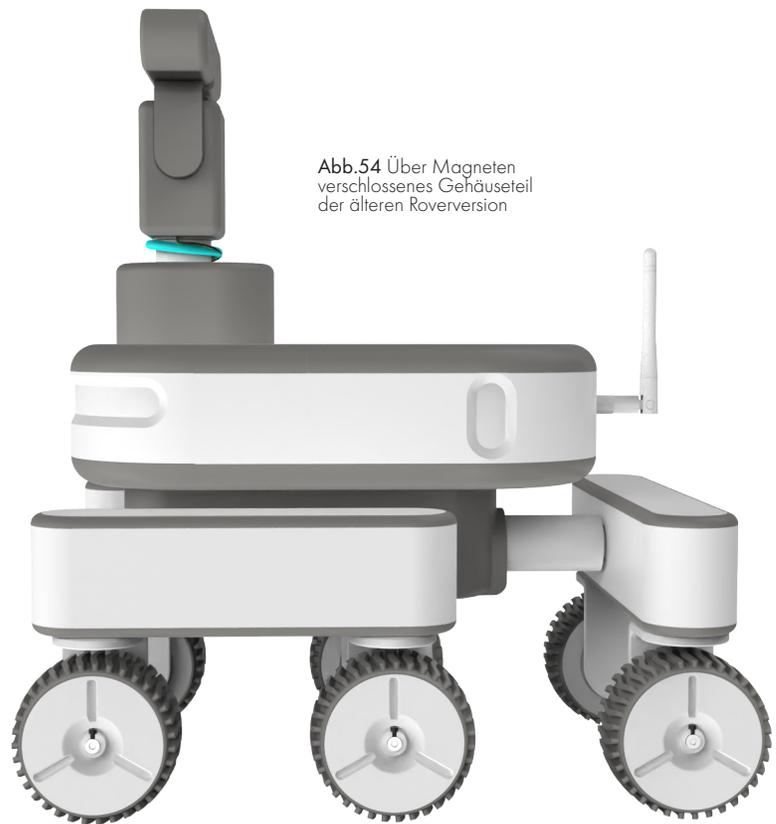


Abb.54 Über Magneten verschlossenes Gehäuseteil der älteren Roverversion

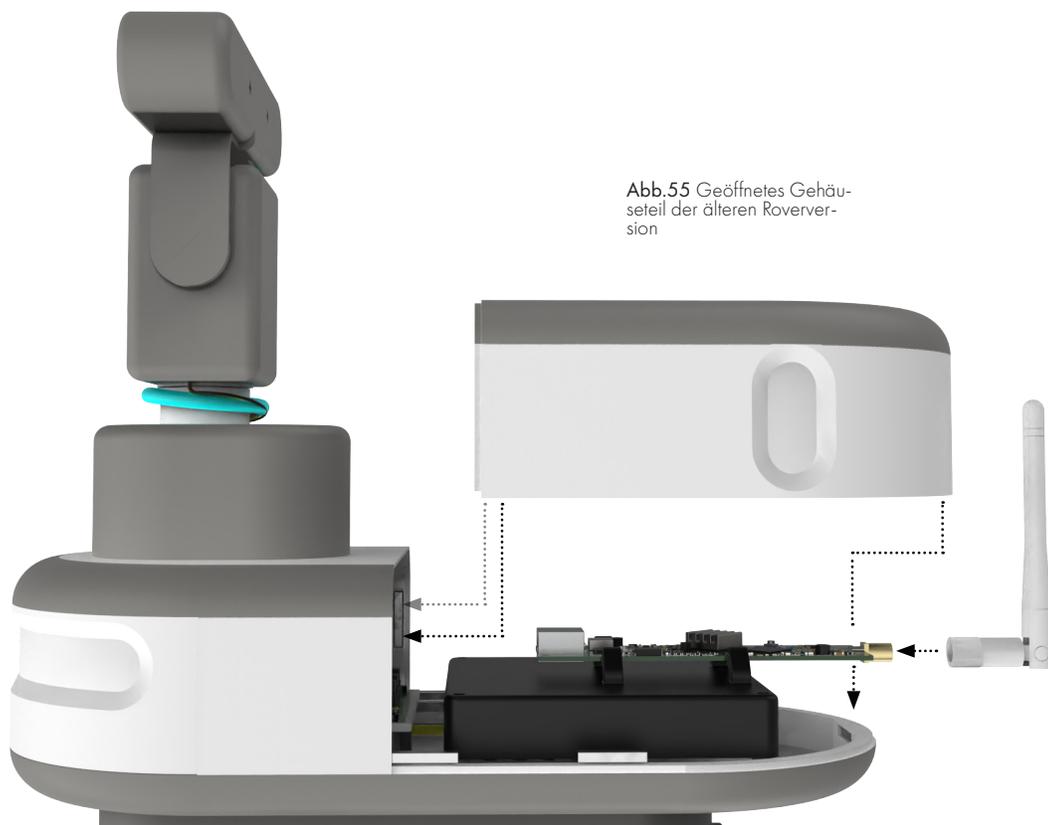


Abb.55 Geöffnetes Gehäuseteil der älteren Roverversion

Aus diesem Grund wurde der Aufbau des Gehäuseteils leicht abgeändert. Die Magneten wurden entfernt und an ihre Stelle treten vier Gewindeeinsätze, wodurch es jetzt über vier Schrauben von unten fest mit dem Rest des Rovers verbunden werden kann.

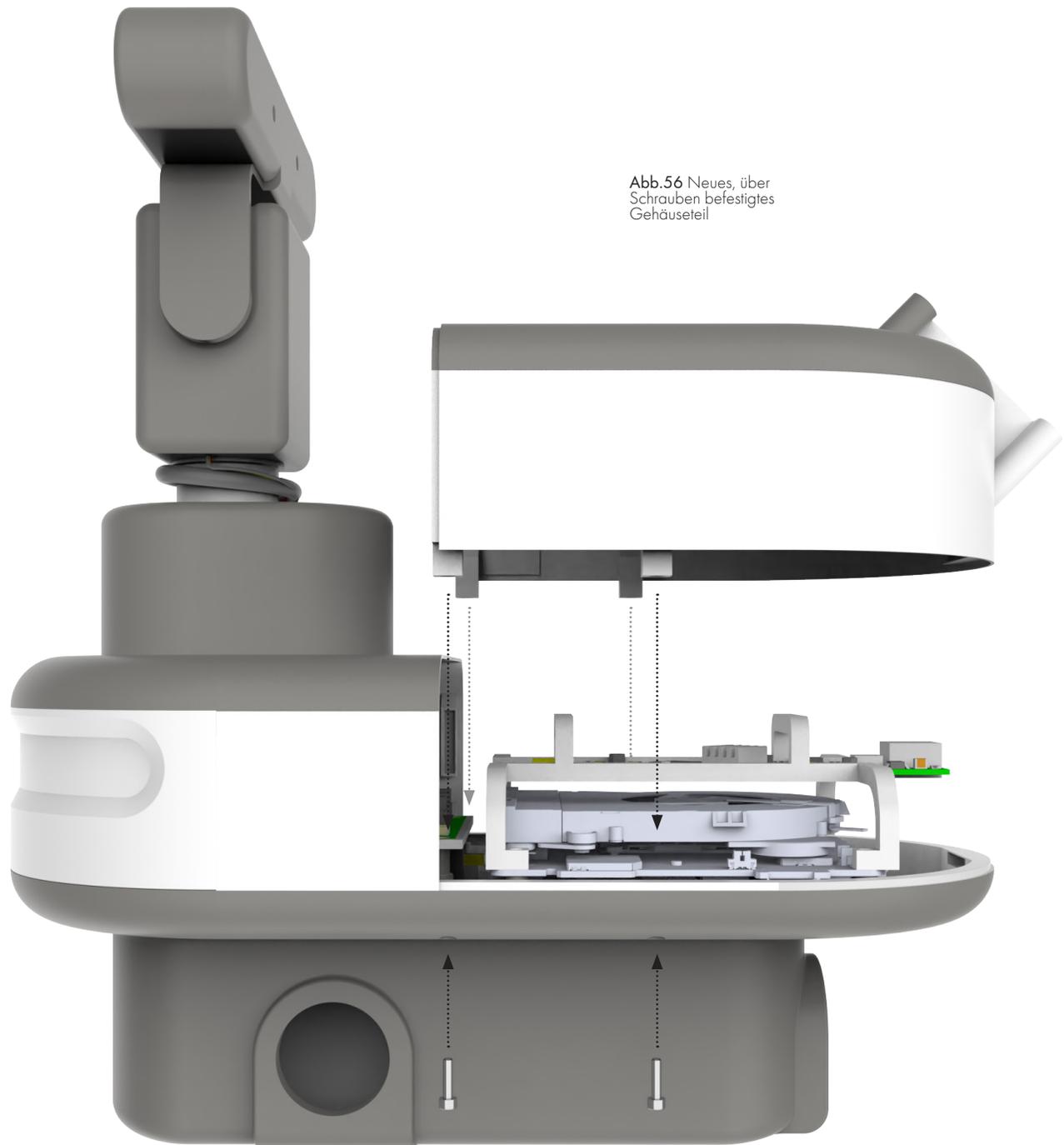


Abb.56 Neues, über Schrauben befestigtes Gehäuseteil

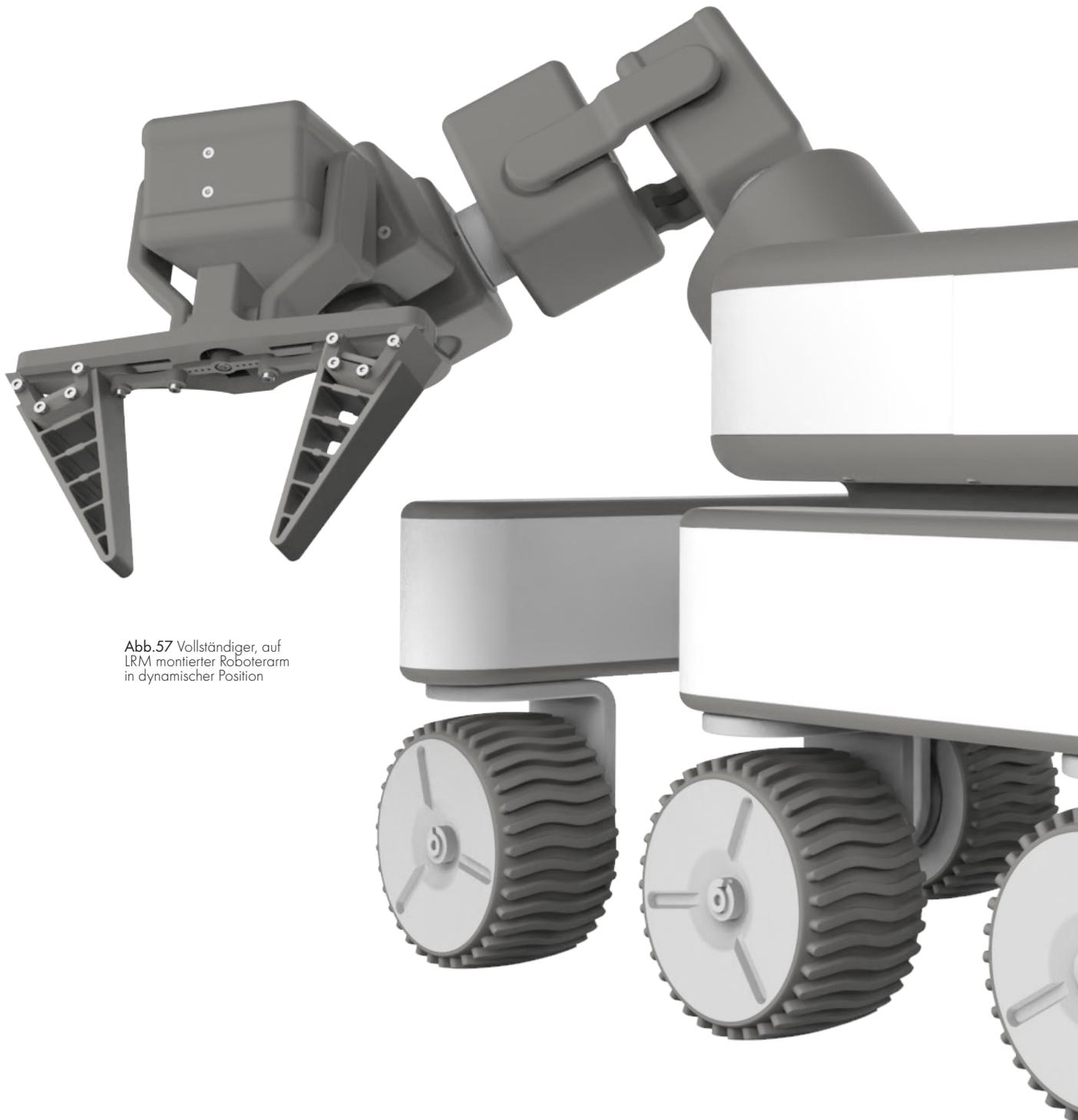
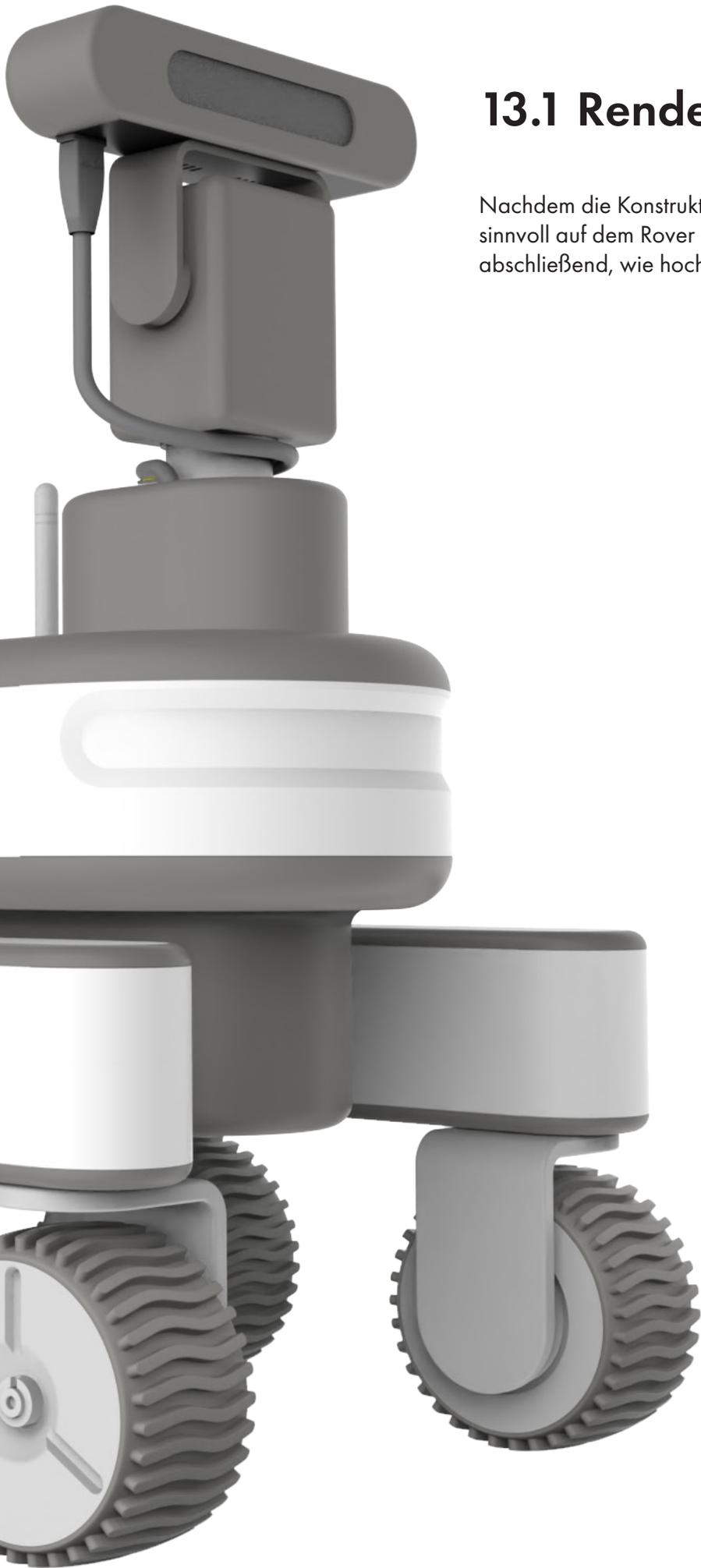


Abb.57 Vollständiger, auf LRM montierter Roboterarm in dynamischer Position



13.1 Rendering

Nachdem die Konstruktion des Armes abgeschlossen wurde und sinnvoll auf dem Rover montiert werden konnte, zeigt dieses Kapitel abschließend, wie hoch die Beweglichkeit des Armes ist.

14.

Schlussbemerkung

Wie bereits in Kapitel 11 erwähnt, war es leider nicht möglich, den gesamten Arm bis zum Abgabetermin dieser Arbeit drucken zu lassen.

Damit bleiben leider auch reale Tests aus, mit denen die Funktions- oder nicht Funktionsfähigkeit hätte überprüft werden können.

Dieser Schritt wird deshalb DLR intern nachgeholt, um dann aufbauend auf diesen Ergebnissen das Projekt LRM weiter zu verbessern.

15. Anhang

15.1 Quelle

1 vgl. This is Automation. (2020, August 05). How Do Robot Arms Work? [YouTube]. Abgerufen von <https://www.youtube.com/watch?v=QXkBM30JAs>

2 vgl. This is Automation. (2020, August 05). How Do Robot Arms Work? [YouTube]. Abgerufen von <https://www.youtube.com/watch?v=QXkBM30JAs>

3 vgl. This is Automation. (2020, August 05). How Do Robot Arms Work? [YouTube]. Abgerufen von <https://www.youtube.com/watch?v=QXkBM30JAs>

4 vgl. This is Automation. (2020, August 05). How Do Robot Arms Work? [YouTube]. Abgerufen von <https://www.youtube.com/watch?v=QXkBM30JAs>

5 vgl. This is Automation. (2020, August 05). How Do Robot Arms Work? [YouTube]. Abgerufen von <https://www.youtube.com/watch?v=QXkBM30JAs>

6 vgl. This is Automation. (2020, August 05). How Do Robot Arms Work? [YouTube]. Abgerufen von <https://www.youtube.com/watch?v=QXkBM30JAs>

7 vgl. This is Automation. (2020, August 05). How Do Robot Arms Work? [YouTube]. Abgerufen von <https://www.youtube.com/watch?v=QXkBM30JAs>

8 vgl. Prof. Dr. Mark Ross (2018). Robotik. Abgerufen von https://www.hs-koblenz.de/fileadmin/media/profiles/ingenieurwesen_elektrotechnik_und_informationstechnik/ross/ROB/Material/handout.pdf

9 vgl. Seite „Themenseite zum Ellenbogen“, <https://www.hessing-kliniken.de/orthopaedische-fachkliniken/zentrum-fuer-endoprothetik-fusschirurgie-und-rheumaorthopaedie/ellenbogen/#:~:text=Aufbau%20unseres%20Ellenbogen&text=F%C3%BCr%20das%20Strecken%20und%20Beugen,Oberarmknochen%20%E2%80%93%20fachsprachlich%20Articulatio%20humeroulnaris%20%E2%80%93%20zust%C3%A4ndig> (Abgerufen: 19.07.2023, Juni 2020, 21:35 UTC)

10 vgl. keine Angabe (2020). Robotik. Abgerufen von https://www.hs-koblenz.de/fileadmin/media/profiles/ingenieurwesen_elektrotechnik_und_informationstechnik/ross/ROB/Material/handout.pdf

11 vgl. Prof. Dr. Mark Ross (2018). Meine Gelenke. Abgerufen von <https://www.schule-lengnau.ch/wp-content/uploads/2020/03/GelenkeAB2.pdf>

12 vgl. Prof. Dr. Klaus Wust (2004). Grundlagen der Robotik. Abgerufen von <https://homepages.thm.de/~hg6458/Robotik/Robotik.pdf>

13 vgl. RealPars. (2022, Januar 17). What is an End of Arm Tool (EOAT) in a Robot? [YouTube]. Abgerufen von <https://www.youtube.com/watch?v=S61CEF8ZmqE>

14 vgl. RealPars. (2022, Januar 17). What is an End of Arm Tool (EOAT) in a Robot? [YouTube]. Abgerufen von <https://www.youtube.com/watch?v=S61CEF8ZmqE>

15 vgl. RealPars. (2022, Januar 17). What is an End of Arm Tool (EOAT) in a Robot? [YouTube]. Abgerufen von <https://www.youtube.com/watch?v=S61CEF8ZmqE>

16 vgl. RealPars. (2022, Januar 17). What is an End of Arm Tool (EOAT) in a Robot? [YouTube]. Abgerufen von <https://www.youtube.com/watch?v=S61CEF8ZmqE>

17 vgl. Höchsmann (2017, November 17). Serielle Kinematik. Abgerufen am 19.07.2023, von https://wtp.hoehsmann.com/lexikon/31786/serielle_Kinematik

18 vgl. Höchsmann (2017, November 17). Parallele Kinematik. Abgerufen am 19.07.2023, von https://wtp.hoehsmann.com/lexikon/31787/parallele_Kinematik

19 vgl. James zu Hüningen (2022, März 29). Inverse Kinematik. Abgerufen am 19.07.2023, von <https://filmlexikon.uni-kiel.de/doku.php/i:inversekinematik-8748>

20 vgl. Seite „Direkte Kinematik“. In: Wikipedia, Die freie Enzyklopädie. Bearbeitungsstand: 26. Mai 2020, 10:25 UTC. URL: https://de.wikipedia.org/wiki/Direkte_Kinematik (Abgerufen: 19. Juli 2023, 15:12 UTC)

21 vgl. Society of Robots (keine Angabe). Robot Arm Tutorial. Abgerufen am 19.07.2023, von https://www.societyofrobots.com/robot_arm_tutorial.shtml#DOF

22 vgl. Society of Robots (keine Angabe). Robot Arm Tutorial. Abgerufen am 19.07.2023, von https://www.societyofrobots.com/robot_arm_tutorial.shtml#DOF

23 vgl. Shubham Kola. (2020, Juni 16). Types of Robot Configuration: Cartesian Coordinate, Cylindrical, Articulated, Spherical, SCARA [YouTube]. Abgerufen von <https://www.youtube.com/watch?v=a4ca04wG-cA>

24 vgl. Shubham Kola. (2020, Juni 16). Types of Robot Configuration: Cartesian Coordinate, Cylindrical, Articulated, Spherical, SCARA [YouTube]. Abgerufen von <https://www.youtube.com/watch?v=a4ca04wG-cA>

25 vgl. Shubham Kola. (2020, Juni 16). Types of Robot Configuration: Cartesian Coordinate, Cylindrical, Articulated, Spherical, SCARA [YouTube]. Abgerufen von <https://www.youtube.com/watch?v=a4ca04wG-cA>

26 vgl. Shubham Kola. (2020, Juni 16). Types of Robot Configuration: Cartesian Coordinate, Cylindrical, Articulated, Spherical, SCARA [YouTube]. Abgerufen von <https://www.youtube.com/watch?v=a4ca04wG-cA>

27 vgl. Shubham Kola. (2020, Juni 16). Types of Robot Configuration: Cartesian Coordinate, Cylindrical, Articulated, Spherical, SCARA [YouTube]. Abgerufen von <https://www.youtube.com/watch?v=a4ca04wG-cA>

28 vgl. Shubham Kola. (2020, Juni 16). Types of Robot Configuration: Cartesian Coordinate, Cylindrical, Articulated, Spherical, SCARA [YouTube]. Abgerufen von <https://www.youtube.com/watch?v=a4ca04wG-cA>

29 vgl. Shubham Kola. (2020, Juni 16). Types of Robot Configuration: Cartesian Coordinate, Cylindrical, Articulated, Spherical, SCARA [YouTube]. Abgerufen von <https://www.youtube.com/watch?v=a4ca04wG-cA>

15.2 Bildnachweis

Abb. 1: Autor

Abb. 2: Autor

Abb. 3: Autor

Abb. 4: Autor

Abb. 5: Autor

Abb. 6: Pedro Ney Stroski, 12.01.22, <https://www.electricalibrary.com/en/2022/01/12/work-envelope-of-robots/>

Abb. 7: Pedro Ney Stroski, 12.01.22, <https://www.electricalibrary.com/en/2022/01/12/work-envelope-of-robots/>

Abb. 8: Pedro Ney Stroski, 12.01.22, <https://www.electricalibrary.com/en/2022/01/12/work-envelope-of-robots/>

Abb. 9: Pedro Ney Stroski, 12.01.22, <https://www.electricalibrary.com/en/2022/01/12/work-envelope-of-robots/>

Abb. 10: Autor

Abb. 11: Autor

Abb. 12: Autor

Abb. 13: Autor

Abb. 14: Autor

Abb. 15: Autor

Abb. 16: Autor

Abb. 17: Autor

Abb. 18: Autor

Abb. 19: Autor

Abb. 20: Autor

Abb. 21: DLR (CC-BY 3.0), 10.07.2017, <https://www.dlr.de/rm/desktopdefault.aspx/tabid-11431/#gallery/32387>

Abb. 22: Autor

Abb. 23: Autor

Abb. 24: Autor

Abb. 25: Autor

Abb. 26: Autor

Abb. 27: Autor

Abb. 28: Festo AG & Co. KG, 11. Mär. 2015, <https://www.ke-next.de/industrie-forschung/industrie/fuenf-produkte-von-festo-erhalten-den-if-product-design-award-2015-101.html>

Abb. 29: keine Angabe, 05.11.2008, <https://www.creatbot.com/en/creatbot-f1000.html>

Abb. 30: Robin Buck, 16.10.2013, <https://filamentworld.de/shop/special-filament/asa-filament/asa-filament-3-mm-natur/>

Abb. 31: Mike Chaussee, 25.06.2016, <https://ndassistive.org/blog/jaco2-robotic-arm-a-new-generation-of-assistive-technology/>

Abb. 32: Autor

Abb. 33: Autor

Abb. 34: Autor

Abb. 35: Autor

Abb. 36: Autor

Abb. 37: Autor

Abb. 38: Autor

Abb. 39: Autor

Abb. 40: Autor

Abb. 41: Autor

Abb. 42: Autor

Abb. 43: Autor

Abb. 44: Autor

Abb. 45: Autor

Abb. 46: Autor

Abb. 47: Autor

Abb. 48: Autor

Abb. 49: Autor

Abb. 50: Autor

Abb. 51: Autor

Abb. 52: Autor

Abb. 53: Autor

Abb. 54: Autor

Abb. 55: Autor

Abb. 56: Autor