



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
WIEN
Vienna University of Technology

Diplomarbeit

Prototypische Entwicklung eines Verbindungssystems und dessen Analyse für einen modular rekonfigurierbaren mobilen Manipulator

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines
Diplom-Ingenieurs (Dipl.-Ing.)

unter der Leitung von

Ao.Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Manfred Grafinger

(E307 Institut für Konstruktionswissenschaften und Produktentwicklung)

Maximilian Papa, MSc.

(E330 Institut für Managementwissenschaften,
Bereich: Human Centered Cyber Physical Production and Assembly Systems)

eingereicht an der TU Wien

Fakultät für Maschinenwesen und Betriebswissenschaften

von

David Gündhör

01611131

Wien, im Mai 2023

David Gündhör



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
WIEN
Vienna University of Technology

Ich habe zur Kenntnis genommen, dass ich zur Drucklegung meiner Arbeit unter der Bezeichnung

Diplomarbeit

nur mit Bewilligung der Prüfungskommission berechtigt bin.

Ich erkläre hiermit Eides statt, dass ich meine Diplomarbeit nach den anerkannten Grundsätzen für wissenschaftliche Abhandlungen selbstständig ausgeführt habe und alle verwendeten Hilfsmittel, insbesondere die zugrunde gelegte Literatur, genannt habe.

Weiters erkläre ich, dass ich dieses Diplomarbeitsthema bisher weder im In- noch Ausland (einer Beurteilerin/einem Beurteiler zur Begutachtung) in irgendeiner Form als Prüfungsarbeit vorgelegt habe und dass diese Arbeit mit der vom Begutachter beurteilten Arbeit übereinstimmt.

Wien, im Mai 2023

David Gündhör

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich allen, die mich bei meiner Diplomarbeit unterstützt haben, meinen tiefen Dank aussprechen.

Zuerst möchte ich meiner Freundin Lisa danken, die mich nicht nur emotional unterstützt hat, sondern mir auch stets motivierend zur Seite stand.

Besonders hervorheben möchte ich auch Prof. Manfred Grafinger und meinen Betreuer Maximilian Papa, die mir stets mit Rat und Tat zur Seite standen und mich durch ihre fachliche Expertise maßgeblich unterstützt haben. Ich bin zutiefst dankbar für Ihre engagierte Betreuung und die vielen wertvollen Inputs, die ich von ihnen erhalten habe.

Ein weiterer Dank geht an Andreas Schütz, der mir bei der Fertigung und der Montage des Produkts stets zur Seite gestanden ist. Und Alexander Kinzer, der mir mit vielen wertvollen Diskussionen und auch seiner fachlichen Kenntnis einen großen Mehrwert für die Arbeit brachte.

Auch möchte ich mich bei meinen Studienkollegen bedanken, die mich das ganze Studium lang begleitet und unterstützt haben. Die gemeinsamen Prüfungsvorbereitungen und ihre Motivation haben mir immer wieder geholfen, Herausforderungen zu meistern und meine Ziele zu erreichen. Ich bin unendlich dankbar für diese wunderbare Erfahrung und die wertvollen Beziehungen, die ich im Rahmen meiner Arbeit und meines Studiums aufbauen durfte.

Kurzfassung

Modular rekonfigurierbare mobile Manipulatoren sind Robotersysteme, die aus verschiedenen Modulen aufgebaut sind, welche jeweils notwendige Komponenten des Roboters beinhalten. Mit diesem Aufbau sind sie nicht nur für Forschungs- und Lehrzwecke interessant, sondern aufgrund ihrer flexiblen Eigenschaften auch in der Industrie von großer Bedeutung. Je nach Aufgabenbereich kann das Robotersystem an die Anforderungen angepasst werden, wodurch sowohl ökonomische als auch ökologische Vorteile entstehen. Einen wesentlichen Einfluss auf die Stabilität und die Bedienbarkeit dieser Robotersysteme haben die Schnittstellen, welche die einzelnen Module miteinander koppeln. In der Literatur gibt es bisher keine Systeme, die den Anforderungen für diese Art von Robotersystemen entsprechen. Deshalb wird in dieser Arbeit ein neuartiges Verbindungssystem auf Basis einer Literaturrecherche für modular rekonfigurierbare mobile Manipulatoren entwickelt und ein Prototyp gebaut, welcher dann hinsichtlich der zuvor definierten Anforderungen verifiziert und validiert wird.

Für den Produktentwicklungsprozess wird ein methodisches Vorgehen verwendet, dass sich an der VDI-Richtlinie 2221 orientiert. Der Fokus liegt auf der mechanischen Belastungsübertragung, denn eine stabile Verbindung ist die Voraussetzung für eine gute Modularität und eine hohe Präzision der gesamten Roboterstruktur. Neben dem genannten mechanischen Teil besteht das Verbindungssystem außerdem aus einem elektrischen Teil, der für die Informations- und Leistungsübertragung zuständig ist. Der Kopplungsvorgang erfolgt manuell durch einfaches Zusammenstecken der beiden Verbindungshälften. Für den Entkopplungsvorgang wird ein einfaches Werkzeug in Form einer kleinen Platte benötigt. Der geschlechtsspezifische elektrische Teil ist substituierbar im mechanischen Teil gelagert. Das gesamte Verbindungssystem kann in vier, um 90° verdrehte Orientierungen gekoppelt werden.

Die Fertigung wurde nur mit spanender Bearbeitung und mit dem FDM-Druckverfahren durchgeführt. Die zugekauften Teile waren alle einfach verfügbar und wurden hauptsächlich online bestellt. Es wurden recyclebare Werkstoffe, wie zum Beispiel Aluminiumlegierungen und PETG verwendet, da auch ein großer Wert auf die Wiederverwendbarkeit gelegt wurde. Die Ergebnisse der Verifizierung und der Validierung zeigen, dass der Prototyp des entwickelten Verbindungssystems den meisten Anforderungen entspricht. Es konnte gezeigt werden, dass wesentliche Funktionen, wie gute Bedienbarkeit, Stabilität und Modularität vom Verbindungssystem erfüllt werden. Dennoch gibt es Verbesserungspotential und insofern bildet das entwickelte Produkt eine entsprechende Basis für zukünftige Arbeiten.

Abstract

Modular reconfigurable mobile manipulators are robot systems that are built up from different modules, which contain necessary components of the robot in each case. These features make them interesting, not only for research and teaching purposes, but also of great importance in industry due to their flexible characteristics. Depending on the task, the robot system can be adapted to the requirements, which results in both, economic and ecological advantages. A significant influence on the stability and operability of these robot systems are the interfaces, that couple the individual modules. So far, there are no systems in the literature that meet the requirements for this kind of robot systems. Therefore, in this thesis a novel coupling system is developed based on the literature research for modular reconfigurable mobile manipulators and a prototype is built which is then verified and validated with reference to the pre-defined requirements.

For the product development process, a methodical approach that is based on VDI Guideline 2221 is used. The focus is on the mechanical load transmission, because a stable connection is the prerequisite for good modularity and high precision of the entire robot structure. In addition to the mechanical part mentioned above, the connection system also consists of an electrical part that is responsible for information and power transmission. The coupling process is performed manually, by simply plugging together the two halves of the connection. A simple tool in the form of a small plate is required for the decoupling process. The gender-specific electrical part is substitutably mounted in the mechanical part. The entire connection system can be coupled in four 90° rotated orientations.

Manufacturing was done only with metal cutting machining operations and with the FDM printing process. The purchased parts were all readily available and mainly ordered online. Recyclable materials, such as aluminum alloys and PETG, were used, as great focus was also placed on reusability. The results of the verification and validation show that the prototype of the developed connection system meets most of the requirements well. It could be shown that essential functions, such as good usability, stability and modularity are fulfilled by the connection system. Nevertheless, there is potential for improvement and in this respect the developed product forms a good basis for future work.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Problemstellung.....	2
1.2	Ziele und Forschungsfragen.....	3
1.3	Methodik.....	4
2	Merkmale von Verbindungssystemen	6
2.1	Geschlecht	6
2.2	Betätigung	7
2.3	Rollachsensymmetrie	8
2.4	Toleranz gegenüber Ausrichtungsfehlern.....	8
2.5	Größe	9
2.6	Mechanische Stabilität.....	10
2.7	Kommunikation.....	10
2.8	Energie	10
3	Verbindungssysteme - Stand der Technik	12
3.1	Mechanische Verbindung	13
3.1.1	Stift und Bohrung (S&B).....	13
3.1.2	Haken	17
3.1.3	Schloss und Schlüssel (S&S)	21
3.1.4	Formanpassung	22
3.2	Elektrische Verbindung.....	25
3.3	Vergleich und Übersicht der Verbindungssysteme	28
4	Konzepterstellung	32
4.1	Anforderungen.....	32
4.2	Morphologischer Kasten.....	34
4.3	Konzept: Mechanisch mit vier Zugängen (M4Z).....	36
4.4	Konzept: Mechanisch mit fünf Zugängen (M5Z).....	38
4.5	Konzept: Mechanische und elektr. Betätigung (MEB)	39
4.6	Konzept: Elektrische Betätigung (ELB).....	41
5	Konzeptevaluierung	43
5.1	Bewertungskriterien und paarweiser Vergleich	43

5.2	Nutzwertanalyse	45
6	Design und Analyse	49
6.1	Detailausarbeitung des Konzepts M4Z.....	49
6.1.1	Verbindungssystem	49
6.1.2	Steckersystem	52
6.1.3	Kopplungsmechanismus und Konfigurationsmöglichkeiten	54
6.2	Festigkeitsanalyse	57
6.2.1	Befestigungsplatte	58
6.2.2	Hakenscheibe	61
6.2.3	Gering beanspruchte Bauteile.....	61
7	Prototyp.....	64
7.1	Fertigung und Montage	65
7.2	Verifizierung und Validierung.....	67
8	Zusammenfassung.....	72
9	Diskussion und Ausblick	74
	Literaturverzeichnis	76
	Abbildungsverzeichnis.....	82
	Tabellenverzeichnis.....	85
	Anhang A: Anforderungsliste Projekt TURBO	86

1 Einleitung

In dieser Arbeit wird ein Prototyp eines Verbindungssystems für modular rekonfigurierbare mobile Manipulatoren (MRMM) erstellt. MRMM sind nicht nur für Forschungs- und Lehrzwecke interessant, sondern aufgrund ihrer flexiblen Eigenschaften auch in der Industrie oder bei Weltraummissionen von Bedeutung [1, 2]. Einem jährlichen Bericht der IFR (International Federation of Robotics) [3] zufolge, wurden im Jahr 2021 so viele Industrie-Roboter wie noch nie installiert. So wurden weltweit über 517.385 Einheiten aufgebaut und damit um 31% mehr als im Jahr davor. Obwohl der Boom als Folge der Pandemie gesehen wird und der Ausblick für die folgenden Jahre nicht ganz so hohe Wachstumsraten erwarten lässt, ist dennoch eine eindeutige Tendenz zu erkennen: Robotersysteme für die Industrie nehmen mit enormer Geschwindigkeit an Bedeutung zu. Je nach Verwendung in Automobil-, Elektronik-, Metall-, Kunststoff-, Lebensmittelindustrie oder anderen Industrien wird ein spezielles Robotersystem benötigt, welches genau auf den Tätigkeitsbereich zugeschnitten ist. Verändert sich dieser Bereich hinsichtlich der Größe, der Tätigkeit oder anderen Merkmalen muss in den meisten Fällen das gesamte Robotersystem ausgetauscht werden. Dies führt nicht nur zu hohen Investitionskosten, sondern hat auch negative Effekte auf die Umwelt zur Folge.

Robotersysteme, wie MRMM stellen diesbezüglich eine Alternative mit vielen Vorteilen dar. Sie bestehen meist aus einem Roboterarm (Manipulator), welcher auf einer mobilen Plattform angebracht wird und somit die Flexibilität hinsichtlich der Reichweite des Roboterarms erhöht. Wie in der Abbildung 1 zu sehen ist, bestehen sie aus einer Vielzahl von Modulen, die jeweils eine oder mehrere Aufgaben des Roboters erfüllen. Die modulare Rekonfiguration erhöht die Flexibilität dieser relativ neuen Technology weiter, indem die Anzahl der möglichen Anwendungsfälle zusätzlich erhöht wird [4]. Bei Veränderung der Rahmenbedingungen kann das Robotersystem durch eine Modifizierung der Konfiguration eine neue Struktur bilden und dadurch an die neuen Verhältnisse angepasst werden. Einerseits kann beispielsweise ein Roboterarm auf drei Achsen beschränkt werden, falls der Roboter für das Aufheben, den Transport und das Ablegen von Teilen benötigt wird. Andererseits könnte der Roboterarm für eine Schweißanwendung auf sechs oder sieben Achsen erweitert werden. Auch die mobile Plattform könnte angepasst werden, falls mehr Tragfläche oder eine kleinere Plattform für engere Gänge benötigt wird. Darüber hinaus muss beim Auftreten einer Störung in einem Modul, nicht wie bei einem monolithischen Aufbau der gesamte Roboter ersetzt werden, sondern nur die defekte Einheit. Und jene Module, die bei einem Roboter nicht mehr benötigt werden, können bei einem anderen wiederverwendet werden. Durch diese besonderen Eigenschaften entstehen flexible, nachhaltige und ökonomische Robotersysteme [5].

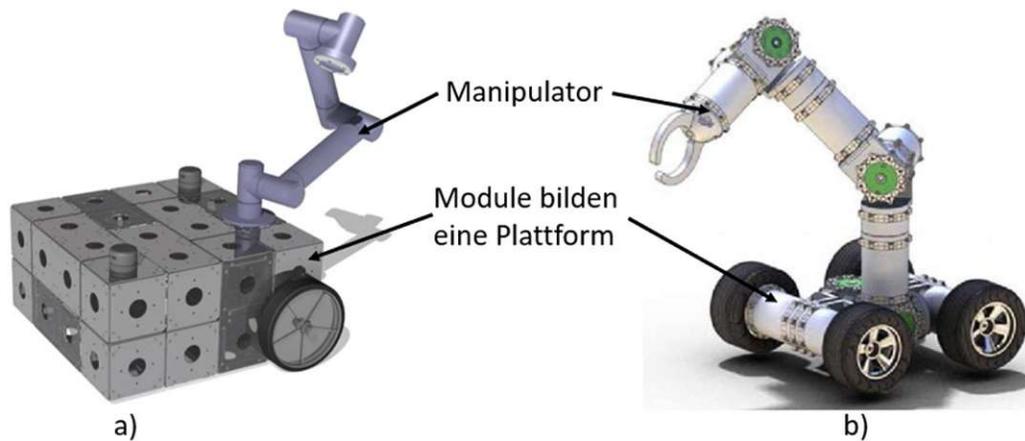


Abbildung 1: Beispiele für MRMM (modifiziert übernommen): a) TURBO [6] b) Thor Robot [4]

Eine wesentliche Rolle für die Gesamtfunktionalität von modularen Robotersystemen spielt die Verbindung zwischen den einzelnen Modulen, welche auch die Kernthematik dieser Arbeit darstellt. Seit Ende der 80er Jahre haben Forscher bereits eine Vielzahl an neuartigen Kopplungsmechanismen, die eine stabile Verbindung zwischen zwei Modulen erzeugen und trotzdem eine gute Rekonfigurierbarkeit ermöglichen, entwickelt [7]. Ob diese Systeme auch die Anforderungen von manuell rekonfigurierbaren MRMM erfüllen, wird am Beginn dieser Arbeit evaluiert. Folglich werden zuerst die wichtigsten Forschungsergebnisse beschrieben und auf Basis der daraus gewonnenen Erkenntnisse und der Anforderungen aus dem TURBO-Projekt anschließend mithilfe eines methodischen Vorgehens ein Verbindungssystem für einen MRMM entwickelt. Im Rahmen dieses Projekts kann der gefertigte Prototyp des Verbindungssystems auf das Erfüllen der zuvor definierten Anforderungen verifiziert und validiert werden.

Projekt TURBO: Im Zuge des interdisziplinären Projekts TURBO der TU Wien wird ein modular rekonfigurierbares mobiles Robotersystem entwickelt. Neben der Pilotfabrik Industrie 4.0 arbeiten auch das Institut für Fertigungstechnik (IFT), das Institut für Managementwissenschaften (IMW) und das Institut für Konstruktionswissenschaften und Produktentwicklung (IKP) daran. Die Kernaufgabe dieses Projekts ist die Entwicklung eines mobilen Roboters, der abhängig vom Einsatzgebiet in der Forschung, Lehre oder Industrie aus unterschiedlich rekonfigurierbaren Modulen aufgebaut wird und später bei möglichen Änderungen der Rahmenbedingungen mit wenigen Handgriffen das Austauschen oder Hinzufügen von weiteren Modulen erlauben soll.

1.1 Problemstellung

Der wesentliche Unterschied zwischen monolithischen Robotersystemen und modular rekonfigurierbaren Manipulatoren ist der Aufbau. Ein modulares Robotersystem

besteht aus mehreren Modulen, die jeweils eine Komponente wie einen Antrieb, Energiespeicher, Boardcomputer, verschiedene Sensoren oder Aktuatoren beinhalten. Diese Module haben definierte Abmessungen und können mit möglichst wenigen Handgriffen gekoppelt und entkoppelt werden. In Summe bilden sie eine ganzheitliche Roboterstruktur, welche auf die vorgesehene Anwendung angepasst werden kann. Für die Gesamtfunktionalität und die Bedienbarkeit nimmt die Schnittstelle zwischen den Modulen eine zentrale Rolle ein und stellt somit einen wesentlichen Faktor für die Akzeptanz des MRMM beim Anwender dar.

In dieser Arbeit soll deshalb ein Verbindungssystem entwickelt werden, das in erster Linie als Schnittstelle zwischen den Modulen für die mechanischen Belastungen dient, aber auch die Übertragung von Energie und Informationen ermöglicht. Das Verbindungssystem besteht demnach aus einem mechanischen und einem elektrischen Teil. Bei der elektrischen Verbindung ist zum einen die Leistungsversorgung der Module zu gewährleisten und zum anderen die Signalverbindung für die Kommunikation zwischen den Modulen sicherzustellen. Für die mechanische Verbindung ist neben einem entsprechend stabilen Aufbau auch die Positioniergenauigkeit unter Berücksichtigung der aufkommenden Lasten zu beachten. Die Kopplung und Entkopplung soll manuell erfolgen. Weiters muss die Kopplung für eine unkomplizierte Nutzung werkzeuglos durchführbar sein. Die Entkopplung soll mit einfachen Werkzeugen und mit wenigen Handgriffen möglich sein. Um eine größtmögliche Flexibilität in der Modulauswahl zu erhalten, ist ein symmetrischer Aufbau des mechanischen Teils der Schnittstelle notwendig. Darüber hinaus soll sie möglichst wartungsfrei und nutzerfreundlich sein.

1.2 Ziele und Forschungsfragen

Ziel der Arbeit ist zum einen, eine übersichtliche Aufbereitung vom Stand der Technik der Verbindungssysteme von MRMM zu erstellen und zum anderen, der 3D-Entwurf einer solchen mechanischen Verbindung mittels Computer Aided Design (CAD). Dieser soll anschließend mithilfe von Finite-Elemente-Methoden (FEM) auf dessen Steifigkeit und Stabilität gegenüber den aufkommenden Lasten analysiert werden.

Beim Design ist ein besonderes Augenmerk auf die werkzeuglose Kopplung und die damit einhergehende Nutzerfreundlichkeit zu legen. Neben der primären Anforderung der mechanischen Belastungsübertragung, soll außerdem mit der Verbindung eine Leistungsversorgung, sowie eine Signalverbindung zwischen den Modulen des MRMM möglich sein. Die Ergebnisse aus der Verifizierung und der Validierung des gefertigten Prototypen bilden den Abschluss der Arbeit.

Aus diesen Zielen ergeben sich somit die folgenden drei Forschungsfragen, welche in dieser Arbeit bearbeitet und beantwortet werden:

1. Was ist der Stand der Technik in Bezug auf die Verbindungssysteme für die Kopplung der einzelnen Module von MRMMs und durch welche Merkmale unterscheiden sich die einzelnen Systeme?
2. Wie kann eine Verbindung für die Übertragung von Energie, Informationen und mechanischen Belastungen, unter Berücksichtigung der notwendigen Steifigkeit, Positioniergenauigkeit und Nutzerfreundlichkeit zwischen den Modulen eines MRMMs realisiert werden?
3. Mit welchen Fertigungsverfahren kann das Verbindungssystem für einen MRMM gefertigt werden und wie kann der Prototyp anschließend hinsichtlich der definierten Anforderungen verifiziert und validiert werden?

1.3 Methodik

Um den Stand der Technik darstellen zu können, werden mithilfe einer Literaturrecherche das Thema „*Verbindungstechnik*“ im Allgemeinen, aber vor allem auch die mechanischen Verbindungen, sowie die Leistungsverbindungen und die Signalverbindungen von modular rekonfigurierbaren Robotern ausgearbeitet.

Ein wesentlicher Teil dieser Arbeit umfasst die Produktentwicklung. Eine methodische Vorgehensweise in diesem Bereich wird in der VDI-Richtlinie 2221 [8] beschrieben und von Pahl et al. [9] in Bezug auf die komplexen Veränderungen der Rahmenbedingungen im Zusammenhang mit der Industrie 4.0, überarbeitet. Die Hauptphasen der Produktentwicklung sind in der Abbildung 2 dargestellt.

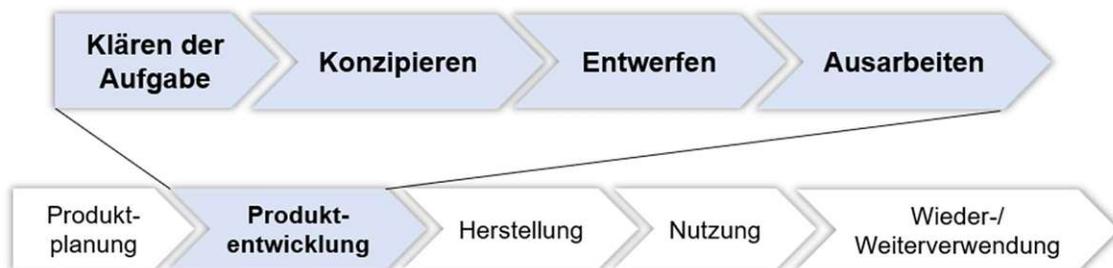


Abbildung 2: Hauptphasen des Produktentwicklungsprozesses (modifiziert übernommen aus [9])

Die Basis bildet dabei die erste Phase, „*Klären der Aufgabe*“, welche die klare Definition der Aufgabenstellung und die Ableitung einer darauf basierenden Anforderungsliste beinhaltet. Darauf aufbauend und mithilfe eines morphologischen Kastens [10] werden in der „*Konzeptphase*“ verschiedene Konzepte erstellt und deren grundsätzliche Funktions- und Wirkstruktur dargestellt. Eine Nutzwertanalyse [9] wird anschließend verwendet, um jenes Konzept zu evaluieren, welches den zuvor definierten Kriterien am besten entspricht und im nächsten Schritt dann genauer ausgearbeitet werden soll. In der „*Entwurfsphase*“ werden die technischen und

wirtschaftlichen Aspekte umfassend erarbeitet, sodass anhand des Gesamtentwurfes eine Kontrolle der Funktion, der Haltbarkeit und der räumlichen Verträglichkeit in Bezug auf die Anforderungsliste ermöglicht wird. Sind alle Anforderungen erfüllt, kann mit der „*Ausarbeitungsphase*“ begonnen werden. Hier wird schließlich die Struktur eines technischen Konstrukts durch abschließende Bestimmungen bezüglich der Form, Dimensionierung und Oberflächenbeschaffenheit jedes einzelnen Bestandteils, Festlegung der verwendeten Materialien, Überprüfung der Fertigungsmöglichkeiten, sowie endgültiger Kostenangaben erweitert. Dazu werden verbindliche zeichnerische Unterlagen erstellt, um eine physische Umsetzung des Produkts zu ermöglichen [9].

Eine klare Trennung der verschiedenen Phasen ist nicht immer möglich. Zum einen, weil oft verschiedene Gestaltungsuntersuchungen bereits in der Konzeptphase durchgeführt oder fertigungstechnische Festlegungen schon in der Entwurfsphase vollzogen werden müssen. Und zum anderen kann es während späteren Phasen zu neuen Erkenntnissen kommen, die Lösungsfindungen für weitere Nebenfunktionen erforderlich machen [9].

Weiters ist darauf zu achten, dass während aller Phasen Eigenschaftsabsicherungen vollzogen werden. Dabei wird sichergestellt, dass alle definierten Anforderung auch stets von der verfolgten Produktlösung erfüllt werden. Das kann durch Berechnungen, Simulationen oder auch durch Versuche geschehen. Dieses Vorgehen kann zwar auch zu einem Rückspringen in früheren Phasen führen, jedoch wird dadurch eine Abweichung von Vorgaben im Endergebnis verhindert [9]. Abbildung 3 zeigt den Produktentwicklungsprozess mit dieser Methodik anhand eines V-Modells.

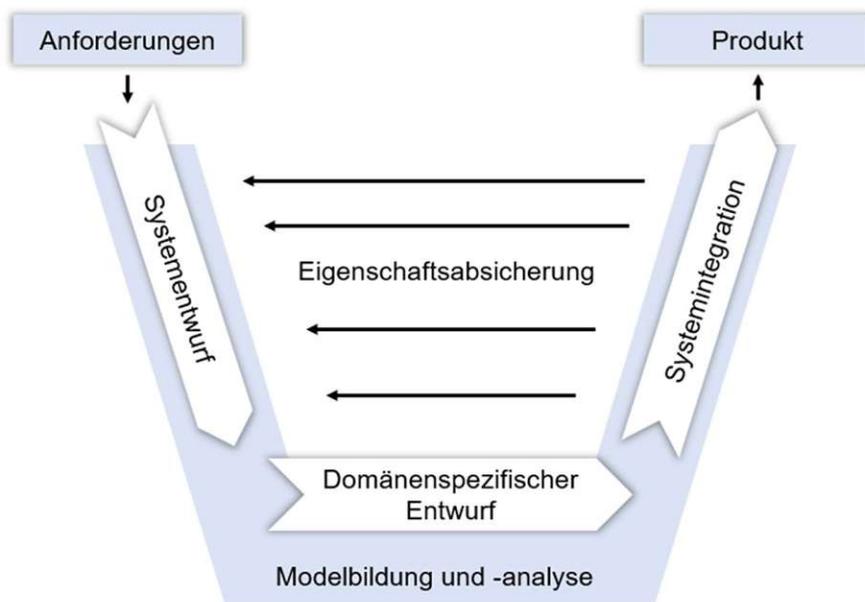


Abbildung 3: Modell des Produktentwicklungsprozesses (modifiziert übernommen aus [9])

2 Merkmale von Verbindungssystemen

Wie bereits in der Einleitung erwähnt, besteht ein MRMM aus einer Plattform und wenn erforderlich einem darauf montierten Roboterarm mit einem entsprechenden Endeffektor. Die Plattform des Robotersystems setzt sich aus einzelnen Modulen zusammen, die jeweils benötigte Komponenten wie Antrieb, Energiespeicher, Boardcomputer, verschiedene Sensoren oder Aktuatoren beinhalten. Für eine ganzheitliche Roboterstruktur werden die benötigten Module mit den jeweiligen Bauteilen miteinander gekoppelt. Die daraus entstehende Plattform muss zum einen stabil genug sein, um die zu transportierenden Lasten tragen zu können und andererseits, um eine hinreichend hohe Präzision des Endeffektors zu erlauben. Das Verbindungssystem spielt dabei eine wesentliche Rolle. Es stellt eine stabile physische Verbindung zwischen zwei oder mehreren Modulen von MRMMs her und besteht aus zwei Hälften. Es bildet dabei die Schnittstelle zur Übertragung von mechanischer Belastung und wenn erforderlich von elektrischer Energie und Informationen. Eine Reversibilität der Verbindung ist die Voraussetzung für die Rekonfigurierbarkeit dieser Robotersysteme. Deswegen besteht neben einer stabilen Verbindung gleichzeitig die Notwendigkeit eines Mechanismus, der eine einfache Trennung der physischen Verbindung zwischen den zwei Verbindungshälften ermöglicht. Die technischen Lösungen für diese Probleme unterscheiden sich durch diverse Merkmale. Um ein besseres Verständnis der folgenden Kapitel zu ermöglichen, werden in diesem Abschnitt die wichtigsten Merkmale beschrieben [4].

2.1 Geschlecht

Beim Geschlecht wird zwischen weiblich, männlich, zweigeschlechtig oder geschlechtslos unterschieden. Die Ausführungen haben einen großen Einfluss auf die Komplexität und die Rekonfigurierbarkeit des Verbindungssystems und müssen deshalb bei der Konstruktion genau beachtet werden. In Abbildung 4 sind die Ausführungen in einfacher Form dargestellt. Auf der linken Seite ist die männliche und weibliche Hälfte einer Verbindung zu sehen. Einer der beiden Hälften wird dabei als aktiver Teil ausgeführt und ist für die Kopplung und Entkopplung mit dem gegenüberliegenden passiven Teil zuständig [11]. Konstruktiv ist dies zwar die einfachste Form einer Schnittstelle, da der Kopplungsmechanismus erfahrungsgemäß die höchste Komplexität des Verbindungssystem aufweist, jedoch leidet die Rekonfigurierbarkeit und die Zuverlässigkeit darunter. Zum einen, weil immer nur weibliche Module mit männlichen Modulen verbunden werden können, wodurch sich die Anzahl der zu verbindenden Module um die Hälfte reduziert und zum anderen kann bei einem Ausfall des aktiven Teils die Verbindung nicht mehr geöffnet werden [12].

Auf der rechten Seite der Abbildung 4 ist eine zweigeschlechtliche Schnittstelle zu sehen. Jeder Teil der Verbindung weist sowohl weibliche als auch männliche

Eigenschaften auf. Dies führt zu einem antisymmetrischen Aufbau, wodurch die Einschränkung von geschlechtsspezifischen Kopplungen aufgelöst wird. Infolgedessen nimmt die Rekonfigurierbarkeit deutlich zu, was jedoch auch mit einer Erhöhung der Konstruktionskomplexität einhergeht [11].

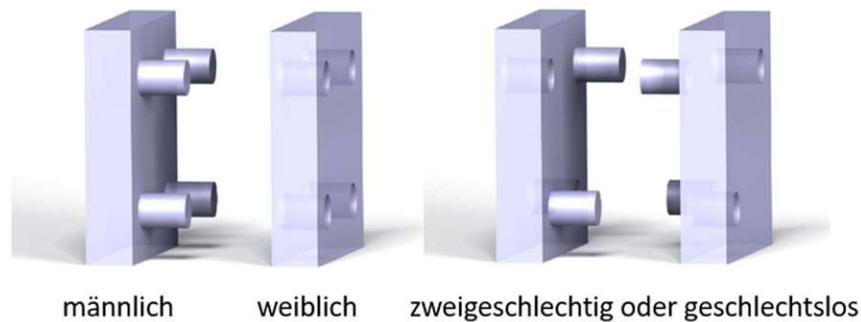


Abbildung 4: Einfache Darstellung der Geschlechter von Verbindungssystemen (modifiziert übernommen aus [7])

Die geschlechtslose Verbindung ist ähnlich aufgebaut wie die zweigeschlechtliche Verbindung. Auch sie zeichnet sich durch eine antisymmetrische Schnittstelle aus und unterscheidet sich zur zweigeschlechtlichen Verbindung nur durch ihre Betätigung. So ist bei dieser ein Kopplungsvorgang nur möglich, wenn beide Seiten der Verbindung betätigt werden. Bei der geschlechtslosen Verbindung hingegen genügt eine Betätigung von nur einer Seite der Schnittstelle. Dadurch ergibt sich der Vorteil, dass Module von defekten Modulen getrennt werden können und somit ausfallsicherer sind und eine Selbstreparatur vollzogen werden kann [7].

2.2 Betätigung

Die Betätigung für den Kopplungsvorgang ist essentiell für eine gute Nutzerfreundlichkeit und eine hohe Zuverlässigkeit der Schnittstelle. Welche Art für die Module am geeignetsten ist, hängt hauptsächlich von der Modulgröße ab. Getriebemotoren werden am häufigsten für Module im Makrobereich verwendet. Diese Systeme zeichnen sich nicht nur durch ihre vielseitigen Anwendungsmöglichkeiten und das relativ hohe Drehmoment aus, sondern es kann durch eine gezielte Konstruktion des Übertragungssystems auch eine einseitig antreibbare Lösung realisiert werden. Dadurch wird eine Öffnung der Verbindung ohne ständiger Energiezufuhr vermieden. Für Module im Mikrobereich werden Elektromagnete und FGL-Drähte (Formgedächtnislegierung) häufiger verwendet. Elektromagnete haben jedoch einen wesentlichen Nachteil gegenüber anderen Betätigungen. Um die Kopplungskraft Aufrecht zu erhalten, benötigen sie einen konstanten Strom [7].

Das Verbindungssystem, welches in dieser Arbeit entwickelt werden soll, ist dem Makrobereich zuzuordnen. Um den Rahmen dieser Arbeit nicht zu sprengen, wird deswegen auch die Recherche im Kapitel 3 auf den Makrobereich eingegrenzt.

2.3 Rollachsensymmetrie

Die Rollachsensymmetrie ist die Symmetrie um die Achse normal zur Verbindungsfläche. Von ihr hängt die Verdrehbarkeit mit der eine Verbindung gekoppelt werden kann ab und hat somit einen direkten Einfluss auf die Modularität des Verbindungsmoduls. Das heißt je höher die Verdrehbarkeit ist, desto flexibler lassen sich die Module miteinander koppeln. Wie in der Abbildung 5 zu sehen ist, wird die Verdrehbarkeit erhöht, wenn die redundante Anordnung von Verbindungselementen um die Rollachse erhöht wird [13]. Mit nur einem Verbindungselement ist die Schnittstelle asymmetrisch und es gibt genau eine Möglichkeit wie die beiden Verbindungshälften miteinander gekoppelt werden können (Abbildung 5a). Im Vergleich dazu, können die Seiten eines Verbindungsmoduls mit zwei Verbindungselementen (Abbildung 5 b)) um 180° verdreht gekoppelt werden bzw. bei vier Verbindungselementen um 90° (Abbildung 5 c)). Bei einer vollständigen Rollachsensymmetrie ist es möglich, die Verbindung bei jedem Verdrehwinkel miteinander zu koppeln [7].

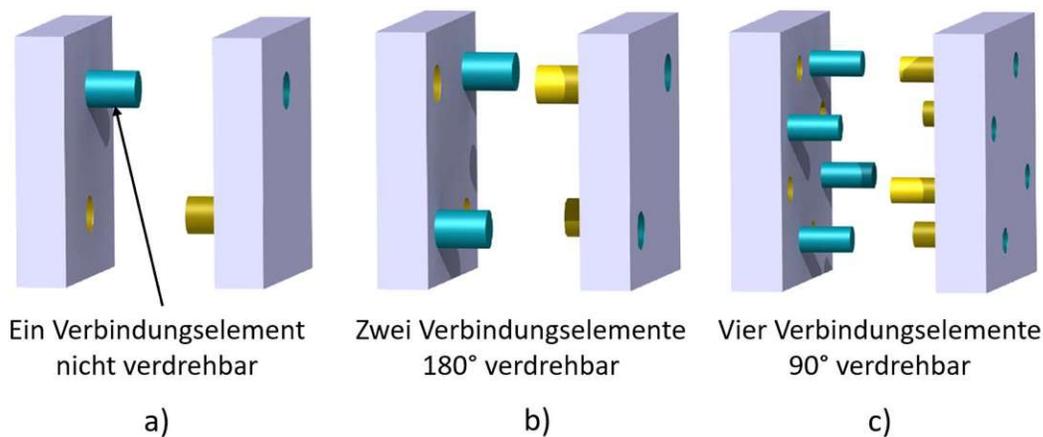


Abbildung 5: Darstellung der Rollachsensymmetrie (modifiziert übernommen aus [13])

2.4 Toleranz gegenüber Ausrichtungsfehlern

Dieses Merkmal beschreibt die Toleranz gegenüber Ausrichtungsfehlern der beiden Verbindungsteile zueinander, bei denen ein Kopplungsvorgang trotzdem erfolgreich durchgeführt werden kann. Je größer die Toleranz ist, desto zuverlässiger und einfacher ist die Schnittstelle zu koppeln. Vor allem bei selbst rekonfigurierbaren Systemen ist eine möglichst große Toleranz von Bedeutung, da sie die Wahrscheinlichkeit einer erfolgreichen Kopplung erhöht [14]. Denn eine exakte

Positions- und Rotationsausrichtung ist trotz der Verwendung von Sensoren und Regelungsalgorithmen oft aufgrund von sensorischen Rückkopplungen und Steuerungsfehlern im stationären Zustand nicht möglich [7]. Für manuelle Systeme, das bedeutet Systeme, die nur mit manueller Hilfe gekoppelt werden können, spielt dieses Merkmal zwar eine geringere Rolle aber vernachlässigt werden darf es dennoch nicht. Denn neben einer schlechten Bedienfreundlichkeit kann eine zu geringe Toleranz vor allem zu zeitintensiven Kopplungsvorgängen führen. Die Größe der Toleranz wird von der konstruktiven Gestaltung der Schnittstelle und vor allem der Verbindungselemente definiert. Dabei kann es notwendig sein, dass ein Kompromiss zwischen der Präzision der Schnittstelle und hoher Toleranz gegenüber Ausrichtungsfehler gefunden werden muss [12].

Wie in Abbildung 6 dargestellt, werden für die Beschreibung sechs verschiedene Toleranzrichtungen verwendet. Wobei a) – c) die Translationstoleranzen in die drei Koordinatenrichtungen X , Y und Z beschreiben und d) – f) die Rotationstoleranzen um die gleichen Koordinaten [7].

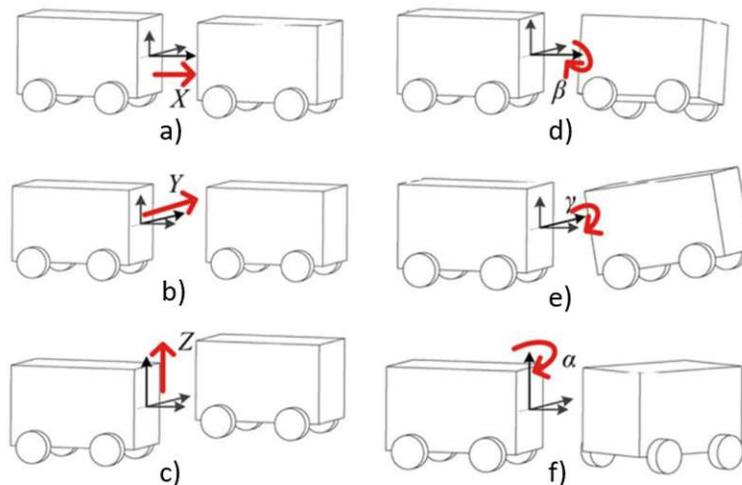


Abbildung 6: Festlegung der möglichen Abweichungstoleranzen (modifiziert übernommen aus [7])

2.5 Größe

Ein Verbindungsmodul wird in den meisten Fällen mehrmals pro Robotermodul verbaut. Dies hat zur Folge, dass die Konfigurierbarkeit steigt aber gleichzeitig ein hoher Platzbedarf erforderlich ist. Um trotzdem ausreichend Platz im Inneren des Robotermoduls für die notwendigen Komponenten zu erhalten, ist es notwendig das Verbindungsmodul so klein und dünn wie möglich zu gestalten. Bei zu kleinen Schnittstellen kann es jedoch dazu kommen, dass die notwendige Stabilität und Steifigkeit für die geplante Anwendung des Roboters nicht mehr erreicht wird oder der Platz für die Unterbringung von Systemen, die eine Übertragung von Energie und Information gewährleisten sollen, nicht mehr ausreicht [12].

2.6 Mechanische Stabilität

Das Verbindungssystem überträgt die mechanische Belastung zwischen den gekoppelten Modulen und muss im verbundenen Zustand stabil genug sein, um die Funktionen der Gesamtkonfiguration des Robotersystems trotz Stößen und Bewegungen nicht einzuschränken. Die mechanische Festigkeit eines MRMMs wird definiert durch die niedrigste Festigkeit eines Teilmoduls innerhalb des Roboters. Meist handelt es sich dabei um das Verbindungsmodul, weshalb die Festigkeit des gesamten Systems durch eine stabile Konstruktion der Schnittstelle eine direkte Verbesserung darstellt [12].

2.7 Kommunikation

Bei der Kommunikation von MRMMs kann zwischen interner und externer Kommunikation unterschieden werden. Die interne Kommunikation stellt die Daten- und Signalübertragung zwischen den einzelnen Modulen dar und ist somit eine wesentliche Eigenschaft dieser Robotersysteme. Als externe Kommunikation hingegen wird die Kommunikation des MRMMs mit externen Systemen, wie etwa dem Host-PC bezeichnet. Hier wird oft zu kabellosen Lösungen wie Bluetooth oder WLAN gegriffen, da eine physische Bindung zu einem stationären System für die Beweglichkeit von mobilen Robotersystemen ein Hindernis darstellt. Bei der internen Kommunikation wird eine mechanische Kopplung zwischen den Modulen erwünscht, wodurch auch die Übertragung der Daten durch eine physische Verbindung in Form eines Stecksystems ausgeführt werden kann. Bei selbst-rekonfigurierbaren Systemen ist es jedoch notwendig, dass eine Kommunikation zwischen den einzelnen Modulen bereits vor der mechanischen Kopplung ebendieser erfolgt und somit oft zusätzlich auf kabellose Systeme, wie Bluetooth oder Infrarot zurückgegriffen wird [12, 15, 16].

Die Wahl der Datenschnittstelle hängt auch davon ab welche Netzwerksysteme und Kommunikationsprotokolle verwendet werden. So benötigen etwa Bussysteme wie CAN oder Profibus eine geringere Anzahl an elektrischen Kontakten als Industrial Ethernet – Systeme wie PROFINET oder EtherCAT. Außerdem können spezielle Netzwerksysteme Voraussetzung für gewisse Bauteile sein. Ein Beispiel dafür liefern die Komponenten von Beckhoff, wo ein Teil der Antriebstechnik auf EtherCat abgestimmt ist [17]. Um den Umfang dieser Arbeit nicht zu überschreiten, werden die einzelnen Protokolle nicht näher behandelt. Stattdessen wird auf das Buch "Vernetzte Systeme für die Automatisierung 4.0" von Langmann [18] verwiesen.

2.8 Energie

Bei selbst-rekonfigurierbaren Robotern und bei der Verwendung von elektromechanischen Verbindungssystemen, benötigt jedes Modul einen eigenen

Energiespeicher, damit die Bewegung und das Manövrieren beim Kopplungsvorgang, beziehungsweise der elektrische Verbindungsmechanismus funktionieren kann. Eine Energieübertragung zwischen den Modulen ist dadurch nicht immer zwingend erforderlich [19]. Ist der MMRM jedoch so aufgebaut, dass jedes Modul eine Teilaufgabe des gesamten Robotersystems übernimmt, das heißt ein Modul ist für den Antrieb zuständig, eines für die Steuerung und ein anderes für die Energieversorgung, dann ist es notwendig die Energie aus dem Energieversorgungsmodul an die übrigen Module zu übertragen [6].

Für eine hohe Zuverlässigkeit der Gesamtstruktur ist dabei von wesentlicher Bedeutung, dass die elektrische Verbindung im gekoppelten Zustand stets aufrechterhalten wird. Bei mechanischen Verbindungen mit großen Toleranzen kann dies zu Problemen führen und muss deshalb bereits in der Konstruktion beachtet werden.

3 Verbindungssysteme - Stand der Technik

Ende der 80er Jahre entwickelte Fukuda et. al. [20] erstmals einen modular aufgebauten, von der Biologie inspirierten Roboter, namens CEBOT (CELLular roBOT) und beschäftigt sich mit einem Verbindungssystem für diese Art von Robotern. Seitdem wurden schon diverse Lösungen für die reversible Verbindung von zwei Objekten entwickelt und aus diesem Grund wurde eine ausführliche Recherche betrieben, um eine geeignete Lösung für einen MRMM zu finden. Diese unterscheiden sich durch mehrere Merkmale und können so simpel wie eine Flanschverbindung oder so komplex wie die Kopplung zwischen Raumfahrzeug und Raumstation sein [21].

In diesem Kapitel wird zuerst die Verbindung für die mechanische Belastungsübertragung jener Verbindungssysteme, welche für diese Arbeit am relevantesten sind, genauer beschrieben. Grundsätzlich lassen sich diese nach Art der wirkenden Kräfte unterscheiden. Wie in Abbildung 7 zu sehen ist, gibt es mechanische und magnetische Verbindungsmechanismen [7].

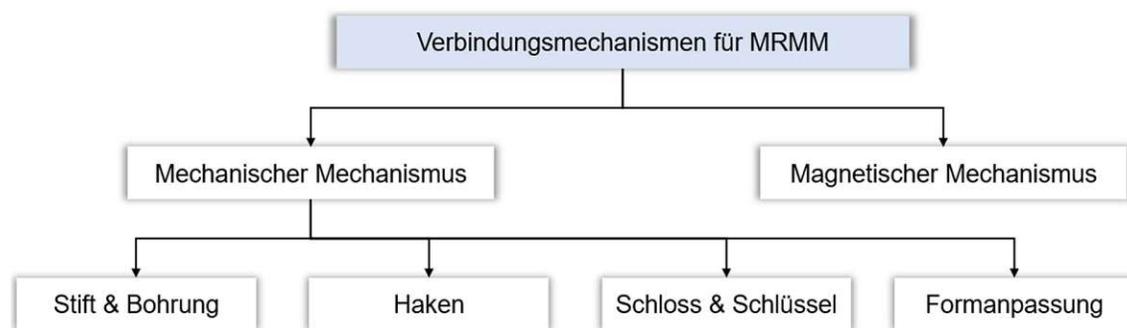


Abbildung 7: Einteilung von Verbindungssystemen von MRMM (modifiziert übernommen aus [7])

Magnetische Mechanismen sind für diese Arbeit nicht geeignet, da bei der Verwendung von Elektromagneten für die Aufrechterhaltung der Verbindung dauerhaft Energie benötigt wird. Und bei einer hohen Anzahl an Schnittstellen führt dies unweigerlich zu einem hohen Energieverbrauch. Darüber hinaus können elektrische Defekte unmittelbar zu einer Entkopplung der Module führen, wodurch keine Ausfallsicherheit mehr gegeben ist. Wie bei den Elektromagneten ist auch bei der Verwendung von Permanentmagneten ein starkes Magnetfeld die Voraussetzung für eine sichere Kopplungskraft. Das führt jedoch gleichzeitig zu einem hohen Kraftbedarf bei der Entkopplung. Außerdem können hohe Magnetfelder zu Schäden an den elektrischen Komponenten in den Modulen führen. Aus diesen Gründen und wegen der relativ hohen Kosten der Magnete, werden in Bezug auf die mechanische Belastungsübertragung nur mechanische Mechanismen betrachtet.

Für eine vollständige Verbindung kann es bei MRMMs neben der Übertragung von mechanischer Belastung außerdem notwendig sein, die elektrischen Belastungen zu

transferieren. Je nach Konfiguration und Aufgabe der Module müssen sowohl elektrische Energie als auch Daten und Signale von Modul zu Modul übertragen werden, um eine ganzheitliche Roboterstruktur zu erreichen. Wie der Stand der Technik diesbezüglich ist, wird im Kapitel 3.2 erläutert.

3.1 Mechanische Verbindung

Die mechanische Verbindung stellt die physische Kopplung zur Übertragung von Kräften und Momenten zwischen mindestens zwei Modulen dar. Bei erfolgreich durchgeführter Kopplung sollen dabei die Freiheitsgrade zwischen den verbundenen Modulen verschwinden und so eine stabile Verbindung entstehen [12].

Mechanische Verbindungen können je nach Art der Aufrechterhaltung der Verbindung unterteilt werden. Dabei wird zwischen Stift und Bohrung, Haken, Schloss und Schlüssel, sowie Formanpassung unterschieden. Im Folgenden werden diese Verbindungsarten näher beschrieben und dazu passende Verbindungssysteme erklärt [7].

3.1.1 Stift und Bohrung (S&B)

Eine gängige Art eine mechanische Kopplung zwischen zwei Modulen zu gestalten, ist die Verwendung von einem oder mehreren Stiften und dazu passenden Bohrungen auf der gegenüberliegenden Seite. Beim Zusammenfügen der beiden Verbindungshälften werden die Stifte in die Bohrungen geführt, wodurch nur mehr ein Freiheitsgrad übrigbleibt. Wie in Abbildung 8 zu sehen ist, handelt es sich dabei um die Verschiebung in X -Richtung. Für eine stabile Verbindung ist also ein zusätzlicher Mechanismus notwendig, der die beiden Hälften in deren gekoppelter Position verriegelt [7].

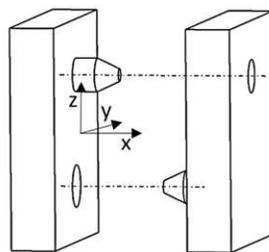


Abbildung 8: Einfache Darstellung eines S&B-Verbindungssystems

S&B-Verbindungen können einfach an die Größe der Robotermodule angepasst werden und die Stabilität der Verbindung ohne großen Aufwand durch eine Änderung der Stiftdimension oder der Stiftnzahl an die Anwendung angepasst werden. Außerdem führen konisch ausgeführte Stifte und Bohrungen zu einer gewissen Toleranz gegenüber Ausrichtungsfehlern. Hinzu kommt der platzsparende Aufbau, der genügend Freiraum bietet, um weitere Schnittstellen für die Übertragung von Energie

und Informationen zu integrieren. Einen Nachteil dieser Art von Mechanismus stellt jedoch, wie oben bereits angedeutet wurde, die Notwendigkeit einer Verriegelung dar. Diese führt zu einer höheren Komplexität der Schnittstelle [7]. In weitere Folge werden die relevantesten Systeme mit dieser Art der Kopplung vorgestellt und hinsichtlich der verwendeten Verriegelung analysiert.

Das Verbindungssystem der CONRO-Module [22] hat eine Seitenlänge von 25,4 mm und besteht aus einem weiblichen und männlichen Teil. Letzterer ist von passiver Art und besitzt zwei konische Stifte mit Nuten entlang des Umfangs. Die weibliche Seite hingegen ist aktiv und enthält den Mechanismus für die Verriegelung der Verbindung. Abbildung 9 zeigt eine dreidimensionale Darstellung dieser Verbindung im entkoppelten a) und gekoppelten Zustand b).

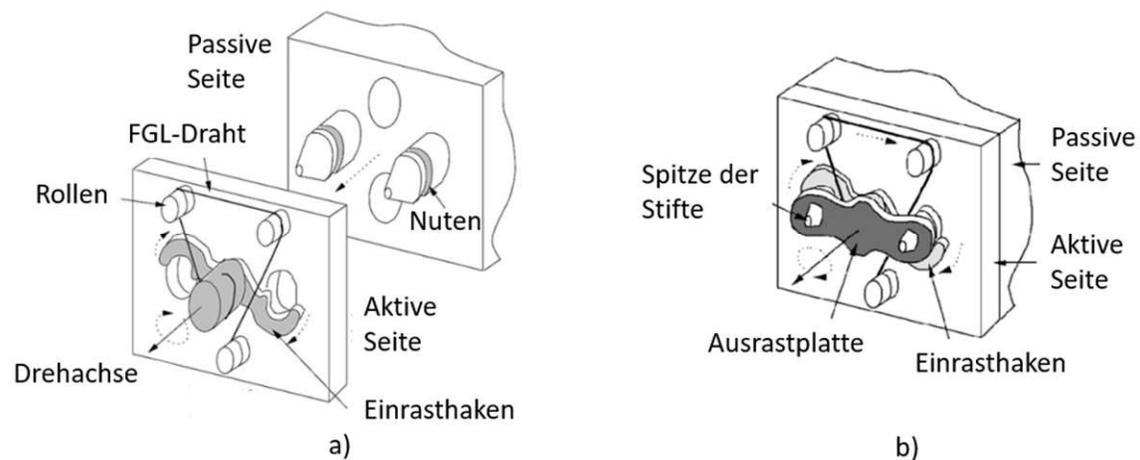


Abbildung 9: CONRO Verbindungsmechanismus: a) entkoppelt und b) gekoppelt (modifiziert übernommen aus [22])

Der Einrasthaken ist federbelastet und deckt die Bohrungen, wo die Stifte eingeführt werden, teilweise ab. Werden die beiden Seiten zusammengeführt, rasten die Einrasthaken automatisch in die Nuten der Stifte ein. Dies funktioniert rein mechanisch. Durch die Kraft, die beim Zusammendrücken der Seiten aufgebracht wird, wird der Einrasthaken um die Drehachse weggedreht. Dieser ist mittels Drehfeder vorgespannt und erzeugt damit das notwendige Rückstellmoment für die Verriegelung.

Der Entkopplungsvorgang erfolgt mithilfe eines FGL-Drahtes, welcher auf der einen Seite an einer festen Rolle verbunden ist und auf der anderen Seite mit dem Einrasthaken. Wird der FGL-Draht aktiviert, so verkürzt er sich, dreht den Einrasthaken gegen die Federkraft und öffnet dadurch die Verriegelung. Damit die Verbindung sofort getrennt wird und der Einrasthaken nicht wieder einrastet, wenn der FGL-Draht wieder deaktiviert wird, besitzt der aktive Teil noch eine Ausrastplatte. Diese ist am Einrasthaken montiert und dreht sich somit um dieselbe Drehachse beim Entkopplungsvorgang. Dabei drückt sie die Stifte so weit aus der Bohrung, dass der Einrasthaken nicht wieder einrasten kann. Durch die doppelt ausgeführten Stifte ist die

Verbindung zweifach achsensymmetrisch und kann somit auch bei einer Verdrehung von 180° gekoppelt werden (Siehe Kapitel 2.3).

Mit einer Seitenlänge von 50 mm ist der PolyBot in seiner zweiten Generation [23] deutlich größer als der CONRO. Wie in Abbildung 10 zu sehen ist, besitzt dieses Verbindungssystem vier spitze Stifte mit Nuten und vier konische Bohrungen. Diese Kombination ermöglicht der Verbindung, trotz eines translatorischen Ausrichtungsfehlers von bis zu 3 mm und rotatorischen Ausrichtungsfehler von 8° , erfolgreich zu koppeln.

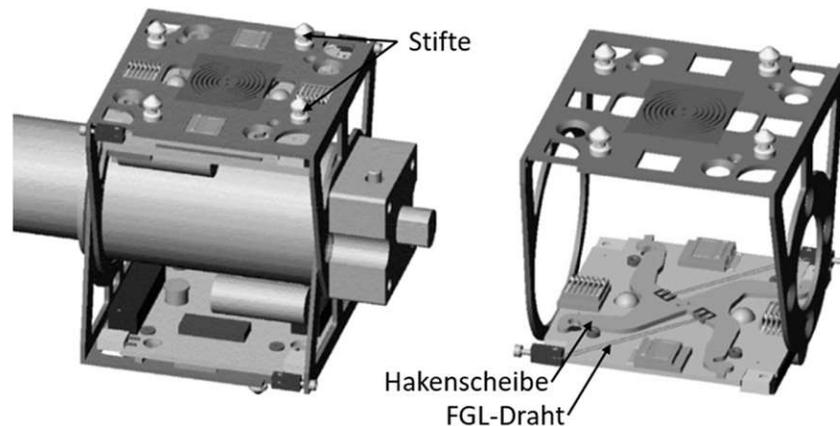


Abbildung 10: Verbindungsmechanismus des PolyBot Gen 2 (modifiziert übernommen aus [23])

Durch die höhere Anzahl an Stiften und Bohrungen, ist es möglich diese Verbindung mit einer Verdrehung von 90° zu koppeln, wodurch vier mögliche Orientierungen entstehen. Darüber hinaus ist dieser Verbinder zweigeschlechtig ausgeführt und bietet somit eine höhere Rekonfigurierbarkeit als die CONRO-Module.

Beim Kopplungsvorgang rasten die vier Haken der Hakenscheibe, welche im Zentrum drehbar gelagert und federvorgespannt sind, in die Stiftnuten der gegenüberliegenden Moduleseite ein. Beim Öffnen wird der FGL-Draht kurz mit Strom belastet, wodurch er sich bis zu 4 % zusammenzieht und die Hakenscheibe entgegen der Federkraft dreht und damit die Stifte des gegenüberliegenden Moduls frei gibt. Eine Energiezufuhr ist somit nur kurz beim Öffnungsvorgang notwendig. Es gibt auch bereits eine dritte Generation der PolyBot-Verbindung, wobei das Prinzip und die Funktion gleich sind. Nur die Performance wurde durch eine Änderung der Positionen von einzelnen Komponenten etwas verbessert [23].

Die UCT-Verbindung [14] verwendet auch vier konische Stifte und Bohrungen für die Kraftübertragung und ist somit ebenso zweigeschlechtig. Sie hat eine Abmessung von 100 mm x 100 mm und besteht hauptsächlich aus dem Material ABS (Acrylnitril-Butadien-Styrol). Wie in Abbildung 11 zu sehen ist, unterscheidet sich die Betätigung deutlich von der PolyBot- und der CONRO-Betätigung. Der Mechanismus besteht aus

der Befestigungsplatte, der Zahnradbaugruppe mit der Lochplatte und dem Schneckenrad, welches von einem DC-Motor angetrieben wird.

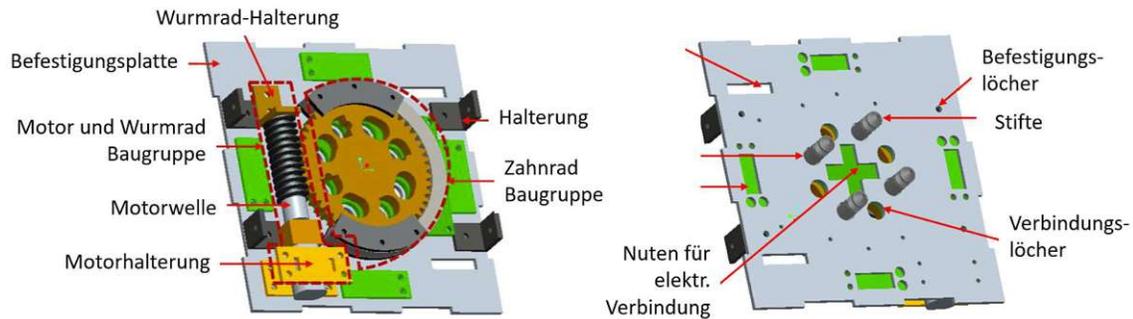


Abbildung 11: UCT-Verbindungsmechanismus (modifiziert übernommen aus [14])

Für die Kopplung werden die Stifte in die gegenüberliegenden Verbindungslöcher eingeführt. Die außenverzahnte Lochscheibe ist im Eingriff mit einem Schneckenrad, welches mittels Elektromotor gedreht werden kann. Bei Betätigung dreht sich die Lochscheibe und verriegelt dadurch die Stifte der gegenüberliegenden Modulseite. Beim Öffnungsvorgang dreht der Motor in die gegensätzliche Richtung und gibt die Stifte dadurch wieder frei. Die Kombination der Außenverzahnung mit dem Schneckenrad hat die besondere Eigenschaft, dass das Drehmoment nur über das Schneckenrad eingeleitet werden kann und in die andere Richtung sperrt. Dadurch muss der Motor nur für die Kopplungs- und Entkopplungsvorgänge verwendet werden.

Die CoBoLD-Verbindung (Cone Bolt Locking Device) [24] verhält sich ähnlich wie die UCT-Verbindung. Auch hier funktioniert der Mechanismus mit einem außen verzahnten Rad, einem Schneckenrad und einem Elektromotor, wie die Abbildung 12 zeigt.

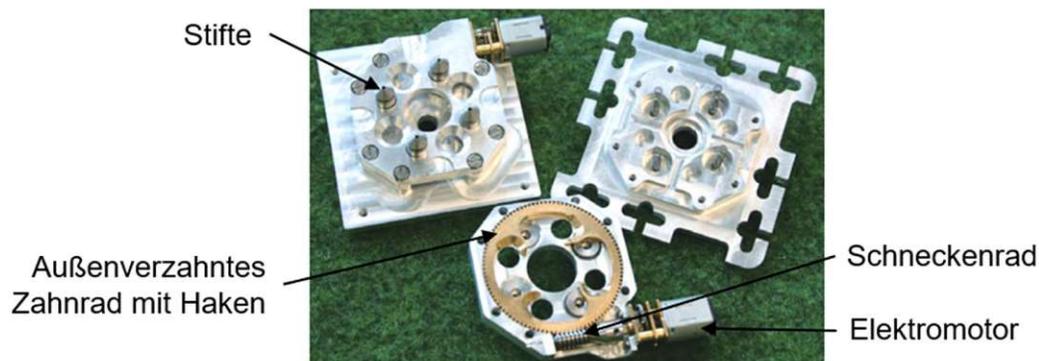


Abbildung 12: CoBoLD Verbindungsmechanismus (modifiziert übernommen aus [24])

Die Schnittstelle hat eine 17 cm² große Oberfläche und durch ihre Bauweise aus Aluminium ein Gewicht von 54 g. Beim Kopplungsvorgang ist eine translatorische Abweichung von 5 mm und eine rotatorische Abweichung von 20° möglich. Durch die einseitige Klemmwirkung des Schneckenradgetriebes ist der Mechanismus wie bei der

UCT-Verbindung nicht rückwärts antreibbar, wodurch der DC-Motor nur für den Entkopplungs- und Kopplungsvorgang benötigt (2,6 J) wird.

Das Verbindungssystem kann eine Zugkraft von 4 kN, ein Biegemoment von 100 Nm und ein Torsionsmoment von 150 Nm ohne Schaden aushalten. Eine besondere Eigenschaft ist die Fähigkeit, durch die spezielle Form der Hakenplatte und der Kraft des DC-Motors, die Stifte in die Bohrung zu ziehen (bis zu 100 N). Details zu den elektrischen Eigenschaften sind in Kapitel 3.2 angeführt.

3.1.2 Haken

Eine weitere Möglichkeit zwei Objekte miteinander zu verbinden, ist die Verwendung von Haken oder Greifer auf einer Seite und Löcher, Rillen oder Stangen auf der gegenüberliegenden Seite [7]. Die Bewegung der Haken vom geöffneten Zustand bis zum geschlossenen Zustand kann dabei eine reine Kreisbewegung sein, wie die Abbildung 13 a) zeigt. Zwei weitere Möglichkeiten sind durch eine Kombination aus einer rotatorischen und translatorischen Bewegung definiert und in der Abbildung 13 b) und c) dargestellt. Dies funktioniert durch die Lagerung der Haken auf einem festen und einem beweglichen Drehpunkt.

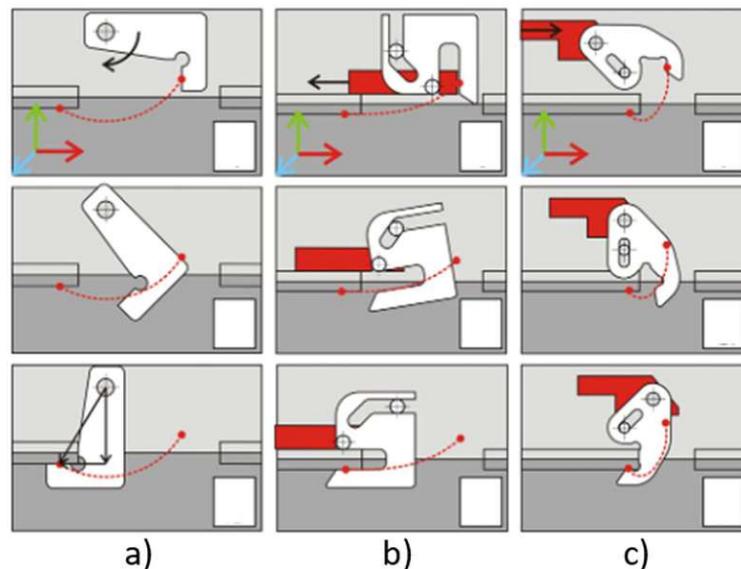


Abbildung 13: Unterschiedliche Hakenbewegungen: a) reine Kreisbewegung b, c) Kombination aus rotatorischer und translatorischer Bewegung (modifiziert übernommen aus [25])

Es besteht die Möglichkeit den Hakenmechanismus so zu gestalten, dass die Haken im geöffneten Zustand nicht aus dem Modul herausragen, wodurch zwei Vorteile entstehen. Zum einen wird kein zusätzlicher Außenraum eingenommen [7] und zum anderen ist die Kopplung flexibler, da eine Zusammenführung nicht zwingend in X -Richtung erfolgen muss, wie es bei den S&B-Verbindungen der Fall ist.

Mehrere modulare Robotersysteme nutzen dieses Prinzip für die Kopplung der Module. Eines davon ist der M-TRAN III [19, 26]. Dessen Verbindung hat eine Seitenlänge von 65 mm und besteht aus einem aktiven männlichen Teil und einem passiven weiblichen Teil. Doch kann sie auch als zweigeschlechtig ausgeführt werden, wie Murata et al. [27] in einer früheren Arbeit zeigt. Die aktive Seite der Verbindung von M-TRAN III besteht aus einem DC-Motor, Antriebsmechanismus, Nutensteinen und vier Verbindungshaken. Die passive Seite hingegen aus den entsprechenden Hohlräumen (siehe Abbildung 14). Durch das Design der Haken und der Hohlräume ist ein Ausrichtungsfehler von 2 mm in translatorischer Richtung und 5° in rotatorischer Richtung möglich. Eine vollständige Kopplung und Entkopplung kann in weniger als 5 s durchgeführt werden. Die Anzahl der Verbindungshaken sorgt für eine Symmetrie um die Rollachse von 90° [19].

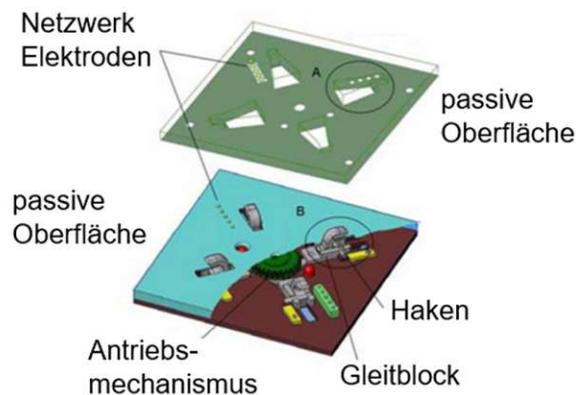


Abbildung 14: M-TRAN III Verbindungsmechanismus (modifiziert übernommen aus [26])

Eine rotatorische Bewegung wird durch den Antriebsmechanismus erzeugt und mithilfe des Gleitblocks in eine translatorische Bewegung umgewandelt. Abbildung 15 zeigt den daraus entstehenden Bewegungsmechanismus der Haken beim Kopplungsvorgang. Die Verbindungshaken besitzen jeweils zwei Zapfen. Einer ist mit dem Gleitblock verbunden und nimmt somit die Rolle des beweglichen Drehpunkts ein und der andere ist mit dem Gehäuse verbunden und deswegen ein fixer Drehpunkt. Dieser führt den Haken entlang des Schlitzes, wodurch bei einer translatorischen Bewegung des beweglichen Drehpunkts der Haken zuerst gedreht wird (Abbildung 15 a) zu b)) und dann verschoben wird (Abbildung 15 b) zu c)) [19].

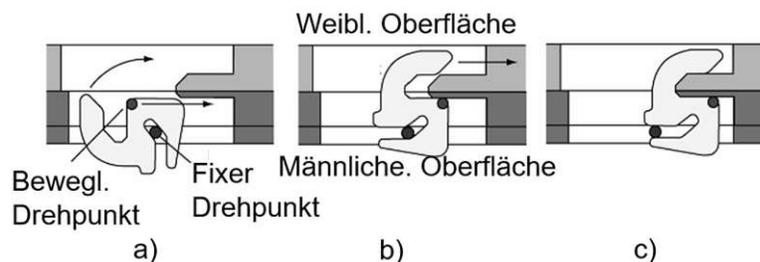


Abbildung 15: Bewegung der Haken der M-TRAN III Verbindung (modifiziert übernommen aus [19])

Der Vorteil dieser speziellen Aufhängung des Hakens und der daraus entstehenden Bewegung ist einerseits, dass sich der Haken vollständig unter der Oberfläche zurückziehen kann und andererseits ermöglicht es einen festen Sitz des Hakens auf der gegenüberliegenden Seite [19].

Die Verbindung des Roombots [25] ist zweigeschlechtlich und besitzt auf jeder Seite der Verbindung jeweils einen Kopplungsmechanismus. Dieser besteht aus einem DC-Motor, den notwendigen Zahnrädern und den Verriegelungsmechanismus mit den Haken sowie den entsprechenden Hohlräumen, bei denen die Haken der gegenüberliegenden Seite eingreifen können (siehe Abbildung 16). Die Basis für dieses Verbindungssystem entwickelten Sproewitz et al. [28] bereits 2008.

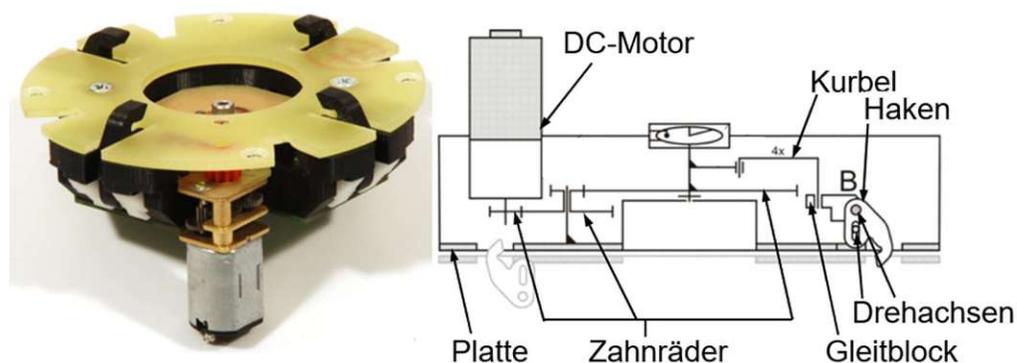


Abbildung 16: Roombot-Verbindungsmechanismus (modifiziert übernommen aus [25])

Die Bewegung der Haken unterscheidet sich von der einer M-TRAN III-Verbindung. Dieser Unterschied ist in Abbildung 13 gut ersichtlich, wobei b) die Haken der M-TRAN III-Verbindung darstellt und c) in etwa die Bewegung der Roombot-Verbindung abbildet. Durch die besondere Anordnung der Zapfen machen die Haken der Roombot-Verbindung eine Art Schaufelbewegung, wodurch die beiden Verbindungshälften zueinander gezogen werden und somit je nach Hakengeometrie ein gewisser Ausrichtungsfehler in X -Richtung (siehe Kapitel 2.4) möglich ist. Dieser Vorgang ist in Abbildung 17 gut zu erkennen.

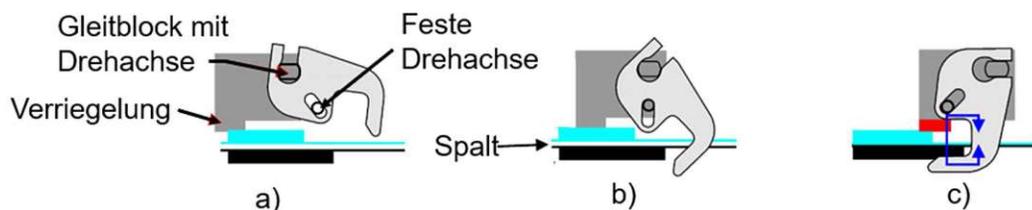


Abbildung 17: Bewegung der Roombot-Haken (modifiziert übernommen aus [28])

Die Roombot-Verbindung hat eine Seitenlänge von 80 mm und toleriert translatorische Ausrichtungsfehler von 1 mm und rotatorische Ausrichtungsfehler von $1,7^\circ$. Außerdem zeigte ein Versuch, dass bei einer Zugbelastung und Scherbelastung von 180 N die Schnittstelle keine Probleme aufweist [28].

Die Verbindung im Sambot besitzt eine aktive männliche Hälfte mit zwei Haken und eine passive weibliche Hälfte mit zwei Rillen [29 – 31]. Die Haken werden mittels Mechanismus, bestehend aus DC-Motor für den Antrieb und Getriebe mit Wurmradern für die Drehzahl- und Drehmomentverteilung, betätigt [31]. Die 80 mm x 80 mm große Verbindung ist nicht rollachsensymmetrisch und kann somit nur in einer Orientierung zusammengeführt werden (siehe Abbildung 18 a)). Die Bewegung des Hakens ist eine einfache Kreisbewegung wie die Abbildung 18 b) zeigt. Durch die speziell geformten Haken sind translatorische Ausrichtungsfehler von 13 mm in X -Richtung, 19,5 mm in Y -Richtung und 4.5 mm in Z -Richtung möglich. Rotatorische Ausrichtungsfehler sind $5^\circ / 5^\circ / 10^\circ$ möglich [30].

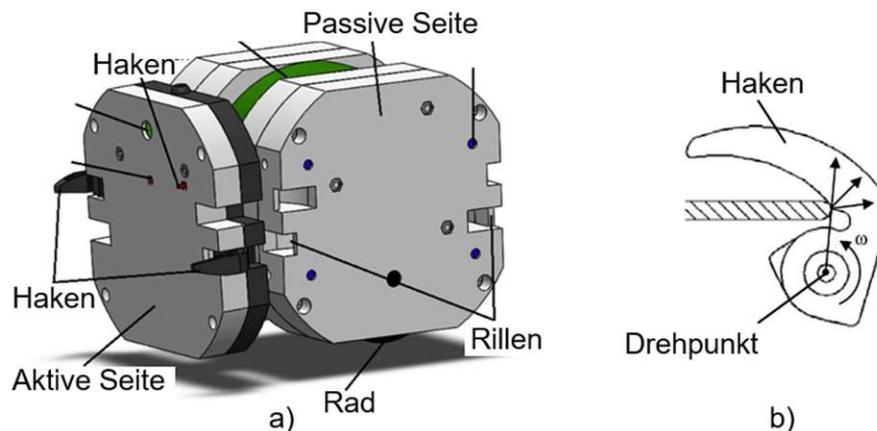


Abbildung 18: Verbindung des Sambots (modifiziert übernommen aus [30, 31])

Eine etwas andere Art der Hakenverbindung stellt Zhang et al. mit dem Trimobot [32] vor. Dessen Schnittstelle besteht zwar auch aus einem aktiven männlichen Teil mit dem Kopplungsmechanismus, sowie einem passiven weiblichen Teil mit den entsprechenden Rillen. Doch im Vergleich zu den anderen Hakenverbindungen ist die Anordnung der vier Haken nicht senkrecht zur Verbindungsoberfläche, sondern parallel dazu (siehe Abbildung 19). Dadurch verliert sie jedoch den Vorteil, dass die Haken im geöffneten Zustand nicht aus dem Modul herausragen.

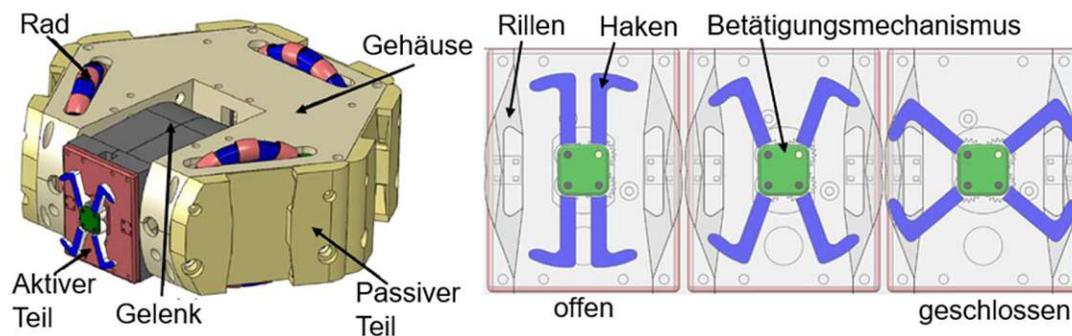


Abbildung 19: 3D-Darstellung des Trimobots (links) und dessen Verbindungsprozess in drei Schritten (rechts) (modifiziert übernommen aus [32])

Der Betätigungsmechanismus besteht aus vier Zahnrädern, wobei eines von einem Schrittmotor angetrieben wird. Trotz der vier Haken ist diese Verbindung nur doppelt achsensymmetrisch, wodurch der Roboter in zwei unterschiedlichen Orientierungen (180°) gekoppelt werden kann. Durch Positionierung der Haken auf der Oberfläche wird der Platzbedarf des Verbindungsmechanismus im Robotermodul gesenkt.

3.1.3 Schloss und Schlüssel (S&S)

Diese Verbindungsart ist ähnlich wie die S&B-Verbindung. Anstatt Stifte, dienen speziell geformte Schlüssel und entsprechende Hohlräume für die mechanische Belastungsübertragung. Beim Kopplungsvorgang werden die Schlüssel in die Hohlräume eingeführt und anschließend verdreht. Dadurch gleitet der Schlüssel in Kanäle, welche im Hohlraum eingebettet sind und erzeugt so eine stabile Verriegelung und somit ist kein zusätzlicher Verriegelungsmechanismus mehr notwendig [7].

Für die Realisierung eines modularen Satelliten wurde die iSSI-Verbindung (intelligent Space System Interface) [21] entwickelt und patentiert. Sie besteht aus einer weiblichen und einer männlichen Seite, wobei beide einen Kopplungsmechanismus aufweisen und somit beide aktiv sind. Wie in der Abbildung 20 zu sehen ist, bestehen sie aus einer außen befindlichen Thermalschnittstelle, einer mechanischen Schnittstelle, einer elektrischen Schnittstelle und einer in der Mitte sitzenden Datenschnittstelle

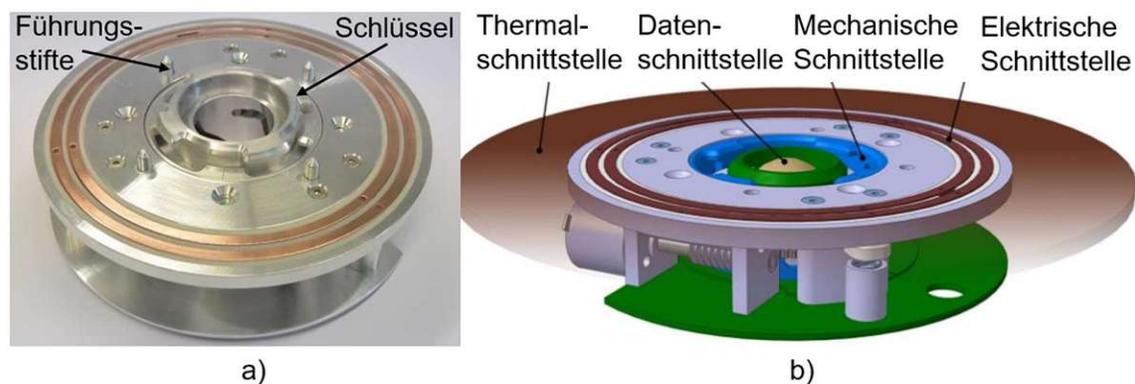


Abbildung 20: iSSI-Schnittstelle: a) männlich b) weiblich (modifiziert übernommen aus [21])

Die männliche Seite (Abbildung 20 a)) besitzt einen vierfach achssymmetrischen Schlüssel und vier Führungsstifte. Beim Kopplungsvorgang werden die beiden Seiten zusammengeführt und anschließend der Schlüssel oder das Schloss verdreht, um die Schnittstelle zu verriegeln. Durch die Reibung wird dabei ein Moment erzeugt, welches die Führungsstifte aufnehmen. Der Vorteil der redundanten Ausführung der Kopplungsmechanismen ist, dass die Kopplung und Entkopplung sowohl der männliche Teil als auch der weibliche Teil durchführen kann, wodurch eine Ausfallsicherung entsteht [21].

Die Verbindung hat einen Durchmesser von 160 mm und ist hauptsächlich aus Aluminium gefertigt, wodurch eine Seite ein Gewicht von 1,6 kg erreicht. Um die Funktion der iSSI in extremen Rahmenbedingungen zu untersuchen, wurde der Mechanismus bei -40 °C und $+70\text{ °C}$ getestet und erwies sich dabei als äußerst robust [21].

Ein Robotersystem namens Transmote [33] wurde für die autonome Reparatur von Heimnetzwerk-Sicherheitssystemen entwickelt und besteht aus einem aktiven männlichen und passiven weiblichen Teil. Wie in Abbildung 21 zu sehen ist, verfügt der männliche Teil über einen konischen Kegel, welcher mit drei am Umfang gleichmäßig verteilten Verriegelungsplatten ausgestattet ist und den Schlüssel der Verbindung darstellt. Er ist drehbar gelagert und mit einem Servomotor angetrieben. Die weibliche Seite hingegen hat einen Hohlraum mit derselben Geometrie.

Beim Kopplungsvorgang wird der Kegel in den Hohlraum gesteckt und anschließend um 90° verdreht, wodurch die beiden Seiten verriegelt werden. Für die Entkopplung dreht sich der Schlüssel um weitere 90° . Sowohl der Kopplungsvorgang als auch der Entkopplungsvorgang kann nur von der aktiven Seite aus durchgeführt werden und somit ist keine Ausfallsicherheit gegeben. Bis zu einer Abweichung von $\pm 0\text{ mm} / 30\text{ mm} / 30\text{ mm}$ in translatorischer Richtung und $\pm \text{n.a.} / 15^\circ / 15^\circ$ in rotatorischer Richtung kann die Schnittstelle erfolgreich verbunden werden [33].

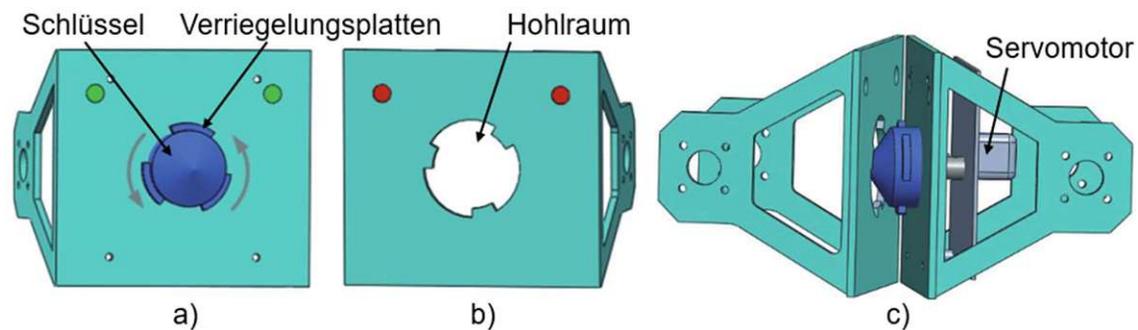


Abbildung 21: Transmote-Verbindung: a) männlich b) weiblich und c) Kopplungsvorgang (modifiziert übernommen aus [33])

3.1.4 Formanpassung

Diese Verbindungsart setzt auf Verbindungshälften, die meist identisch sind und Profile besitzen, welche über eine speziell geformte Geometrie verfügen. Bei dem Kopplungsvorgang greifen die Profile der beiden Verbindungshälften ineinander ein und verhindern dadurch jede Relativbewegung. Die Verbindungssysteme dieser Kategorie werden oft als geschlechtlos ausgeführt. Zum einen wegen der identischen Verbindungshälften und zum anderen, weil eine Trennung der Verbindung von beiden Seiten konstruktiv einfach zu lösen ist [7].

Das Verbindungssystem GHEFT [34, 35] gehört zu dieser Kategorie und besteht aus einem stationären Gehäuse, zwei Servomotoren, einem Schneckenradgetriebe, einer Drehplatte, einer Scheibe mit einer Leitkurve und zwei geschlechtslosen elliptischen Klemmprofilen mit H-förmigen Querschnitt (siehe Abbildung 22). Die Bauweise mit den Abmessungen von 170 mm x 155 mm x 155 mm und der Verwendung von ABS als Material für den 3D-Druck, führt zu einem Gewicht von 2,3 kg pro Verbindungshälfte.

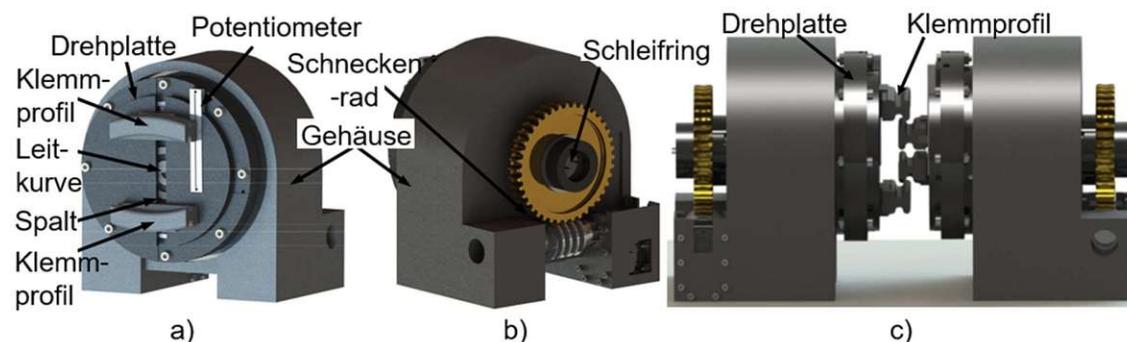


Abbildung 22: GHEFT Verbindungsmechanismus (modifiziert übernommen aus [34])

Für den Kopplungsvorgang werden die Klemmprofile gegeneinander gedrückt, wie in der Abbildung 22 b) zu sehen ist. Die notwendige translatorische Bewegung wird erreicht, indem die Platte mit der Leitkurve, durch einen Servomotor gedreht wird und infolgedessen die Klemmprofile je nach Drehrichtung nach außen oder nach innen wandern. Dadurch wird eine Klemmkraft von 220 N erzeugt.

Die Drehplatte ihrerseits kann ebenfalls rotiert werden. Dafür bringt ein zweiter Servomotor das Schneckenradgetriebe in Bewegung. Durch diesen zweiten Freiheitsgrad ist das Verbindungssystem vollständig symmetrisch um die Rollachse. Sowohl die translatorische Bewegung der Klemmprofile als auch die rotatorische Bewegung der Drehplatte sind nicht rückwärts antreibbar. Dadurch ergibt sich eine energieeffiziente Verbindung, da für die Aufrechterhaltung der Verbindung, keine Energie benötigt wird.

Die Verbindung kann von beiden Seiten unabhängig gelöst werden und kann somit auch beim Ausfall einer Seite getrennt werden [34]. Durch die besondere Form der Klemmprofile toleriert die Verbindung eine getestete translatorischen Abweichung von 5,9 mm / 24,4 mm / 10,9 mm und eine rotatorische Abweichung 44,5° / 10,8° / 10,1°.

Auch die SINGO-Verbindung [36] ist geschlechtslos und ausfallsicher. Sie besteht aus vier winkelförmigen Haken sowie ebenfalls aus einer Drehplatte mit einer spiralförmigen Leitkurve und einen DC-Motor. Das Verbindungssystem hat einen Durchmesser von 64 mm und besteht aus Kunststoff, womit sie ein Gewicht von nur 50 g erreicht. Abbildung 23 zeigt die Vorderseite der SINGO-Verbindung im maximal offenen Zustand a), im maximal geschlossenen Zustand b) sowie eine Seitenansicht der Haken zum besseren Verständnis der Kraftübertragung im gekoppelten Zustand.

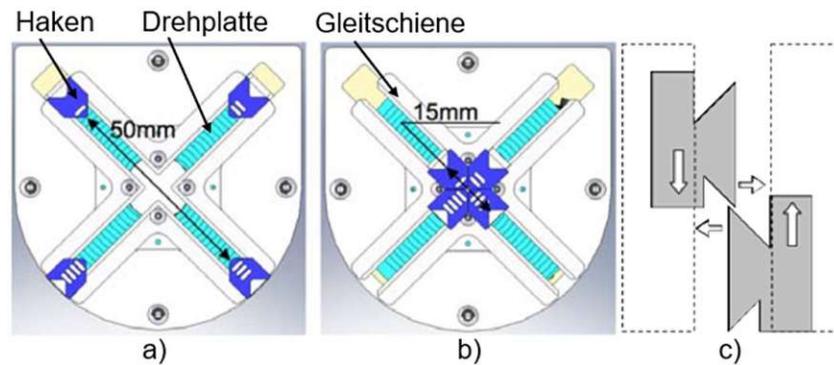


Abbildung 23: SINGO-Verbindung: a) Vorderseite max. Offen und b) max. geschlossen sowie c) Seitenansicht der Haken (modifiziert übernommen aus [36])

Die vier Haken können sich entlang der Gleitschiene in einem Bereich von 15 mm bis 50 mm Abstand parallel zur Verbindungsoberfläche bewegen. Sie sind mit einem winkelförmigen Hinterschnitt (siehe Abbildung 23 c)) versehen. Beim Kopplungsvorgang werden die beiden Verbindungshälften zusammengeführt und die Haken einer Seite nach außen bewegt oder die der anderen Seite nach innen. Dadurch werden die Haken ineinander verkeilt, was eine Verriegelung der offenen Freiheitsgrade zur Folge hat. Die Bewegung der Haken erfolgt mittels Rotation der Drehplatte, wo die Haken in der spiralförmigen Rille geführt sind. Die Drehplatte ist von einem Mikro-DC-Motor angetrieben und ist nicht rückwärts antreibbar. Damit wird der Motor nur für das Öffnen und Schließen der Schnittstelle benötigt.

Für den Öffnungsvorgang muss nur eine Seite der Verbindung die Haken in die entgegengesetzte Richtung bewegen und dadurch ist eine Ausfallsicherheit gegeben. Die Toleranz gegenüber Ausrichtungsfehlern hängt von der Hakenform ab und ist bei dieser Schnittstelle in translatorischer Richtung bei 6 mm / 5 mm / 5 mm sowie in rotatorischer Richtung bei 6° / 22,5° / 5°. Durch die Anzahl der Haken ist das Verbindungssystem vierfach Achsensymmetrisch und kann somit theoretisch in vier verschiedenen Orientierungen gekoppelt werden.

Eine weitere Schnittstelle dieser Kategorie ist das sogenannte RoGenSiD-Verbindungssystem (Rotary-plate, Genderless, Single-sided Docking mechanism) [37], welches für das Robotersystem ModRED [1] entwickelt wurde. Außerdem wird das gleiche Prinzip bei der HiGen-Verbindung von Parrott et al. [11] angewendet. Wie in Abbildung 24 zu sehen ist, besteht die RoGenSiD-Kopplungsschnittstelle aus einer Drehplatte mit vier gleichmäßig angeordneten Verriegelungshaken und einem Schrittmotor, der über ein Schneckenrad für den Antrieb sorgt. Diese Teile sind in einem Gehäuse aus Kunststoff befestigt, welches wiederum am Robotersystem montiert wird. Die Z-förmigen Verriegelungsfinger sind aus Stahl gefertigt und haben eine spezielle Geometrie, damit zwei gleichartige Finger von beiden Verbindungshälften ineinandergreifen können.

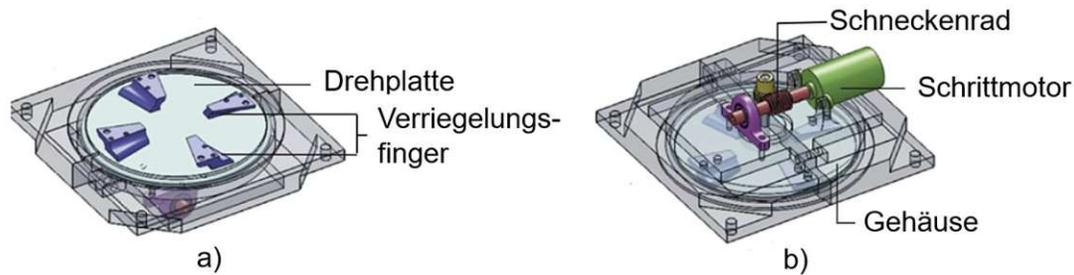


Abbildung 24: RoGenSiD-Verbindungssystem: a) Vorderseite und b) Rückseite (modifiziert übernommen aus [1])

Beim Kopplungsverfahren werden die beiden Hälften zuerst zusammengeführt, wodurch zwei Passstifte, welche sich am Roboter befinden in entsprechende Bohrungen auf der gegenüberliegenden Seite gesteckt werden. Diese Passstifte sind notwendig, damit eine Drehung der Module um die Rollachse sowohl beim Kopplungsvorgang als auch im verriegelten Zustand blockiert wird. Im weiteren Verlauf wird eine der beiden Drehplatten gedreht, bis die Verriegelungsfinger eingehakt sind. Durch das Schneckenradgetriebe ist der Mechanismus nicht rückwärts antreibbar und somit entsteht eine stabile Verriegelung, ohne dass dauerhaft Energie zugeführt werden muss [37].

Das RoGenSid-Verbindungssystem ist vierfach achsensymmetrisch und geschlechtslos. Das heißt, durch die Möglichkeit der einseitigen Trennung eines Moduls ist eine Ausfallsicherheit gegeben. Die konischen Finger und Stifte erlauben eine Toleranz gegenüber Ausrichtungsfehlern von 20 mm / 2 mm / 2 mm in translatorischer Richtung und $2,4^\circ / 2,4^\circ / 2,4^\circ$ in rotatorischer Richtung [37].

3.2 Elektrische Verbindung

Ein MRMM besteht aus mehreren Modulen, wobei jedes Modul eine Teilaufgabe des gesamten Systems übernimmt. Je nach Aufbau, Anwendung und Konfiguration des Roboters kann diese Aufgabe elektrische Energie und Signaldaten erfordern. Wenn nicht jedes Modul über einen separaten Energiespeicher verfügt, ist eine Leistungsübertragung vom Energiespeichermodul zu den Verbrauchermodule, wie etwa Antrieb, Steuerung oder Endeffektor, notwendig. Oft setzt aber die Anwendung (zum Beispiel bei selbstkonfigurierbaren Systemen) voraus, dass die einzelnen Module auch als individuelles System funktionieren müssen und somit auch einen Energiespeicher benötigen. Eine Übertragung von Leistung ist dann nur mehr in besonderen Fällen notwendig.

Für die Funktionalität einer ganzheitlichen Roboterstruktur ist eine Kommunikation zwischen den einzelnen Modulen von großer Bedeutung und wird als interne Kommunikation bezeichnet. Die externe Kommunikation ist die Signal- und Datenübertragung zu externen Systemen, wie etwa einem PC, Tablet oder

Mobiltelefon. Im weiteren Verlauf werden nun bestehende modulare Robotersysteme auf deren elektrische Verbindung untersucht.

Sowohl bei der CoBoLD-Verbindung [24] als auch bei EMI (Electrico Mechanical Interface) [38] werden Federkontaktstifte auf der einen Seite und dazu passende Kontaktplatten auf der anderen Seite für die Leistungsübertragung und die Datenübertragung verwendet. Wobei die neun direkt auf der Leiterplatte montierten Stifte der elektrischen Schnittstelle von CoBoLD für eine Leistung von 200 W (8 A und 25 V) und einer Hochgeschwindigkeitsdatenübertragung wie Ethernet ausgelegt sind. Bei der EMI-Schnittstelle hingegen sind es 36 Stifte. Wie in Abbildung 25 zu sehen ist, sind jeweils 18 Stifte bzw. Kontaktplatten blockweise und redundant angeordnet. Auf einer Hälfte der Schnittstelle sind sie um 180° und auf der anderen Seite um 90° versetzt. Dadurch werden bei einer Verdrehung von 90° , 180° oder 270° trotzdem mindestens 18 Kontakte verbunden und infolgedessen eine Leistungsübertragung bis zu 10 A und ebenfalls eine Hochgeschwindigkeitsdatenübertragung wie Ethernet erreicht.

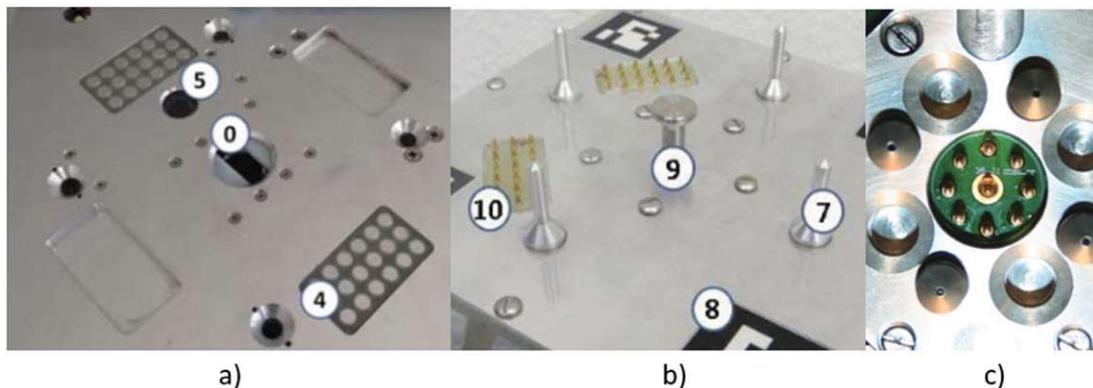


Abbildung 25: elektrische Schnittstelle von a), b) EMI [38] und c) CoBoLD (modifiziert übernommen aus [24])

Die geschlechtsspezifische elektrische Schnittstelle von M-TRAN III [19] ist ähnlich aufgebaut, jedoch besitzt sie nur zehn Kontakte und bei einer Verdrehung von 90° , 180° bzw. 270° sind mindestens fünf immer im Eingriff. Zwei dieser Kontakte sind für den CAN-Bus und eine ist für die Masse vorgesehen. Dann gibt es noch eine Gleichtaktsignalleitung und eine lokale Signalleitung. Darüber hinaus besitzt der Roboter ein drahtloses Modem auf der Grundlage der Bluetooth-Technologie für die Kommunikation zwischen zwei Modulen oder mit Host-PC. Zusätzlich sind zehn Paare von Infrarot-Sendern und -Detektoren für die Kommunikation von naheliegenden Modulen montiert.

Polybot [23, 39] und die UCT-Verbindung [14] verwenden Eigenkonstruktionen für die Übertragung von Leistung sowie Daten in geschlechtsunabhängiger Form. Bei beiden wurde mit einer redundanten Anordnung der Kontakte eine vierfache Verdrehbarkeit um jeweils 90° der Verbindung realisiert. Bei der UCT-Verbindung sind die Kontakte

direkt auf der Leiterplatte angebracht und kreuzförmig angeordnet. Dabei werden Dominanzsignale (DS), Strom und gemeinsame Masse, sowie pulsweitenmodulierte (PWM) Motorsteuerungssignale übertragen. Die verwendeten Kontakte in der Polybot-Verbindung erlauben eine Kommunikation mittels CAN-Bus (Controller Area Network) und zusätzlich können die Module mittels Infrarotschnittstellen kommunizieren.

Ebenfalls geschlechtslose Varianten für die elektrische Verbindung werden bei Molecube [15], GENFA [40], HiGen [11] und RoFiCoM [41] verwendet. Wie in Abbildung 26 und Abbildung 27 zu sehen ist, sind bei allen genannten Verbindungen die elektrischen Kontakte kreisförmig angeordnet. Jede Seite der Molecube-Schnittstelle besitzt 16 Kontaktpaare, wobei dadurch acht redundante Kanäle für die Übertragung von Leistung und Informationen entstehen. Die Kommunikation erfolgt hierbei sowohl intern als auch extern mittels half-duplex RS-232-Bus. Im Vergleich dazu sind bei GENFA die vier Kontakte für Masse, Leistung und zwei für die Kommunikation jeweils vier mit einem Versatz von 90° angeordnet. Die besondere Anordnung bei beiden Schnittstellen ermöglicht eine Verbindung in vier Orientierungen (90° , 180° und 270°).

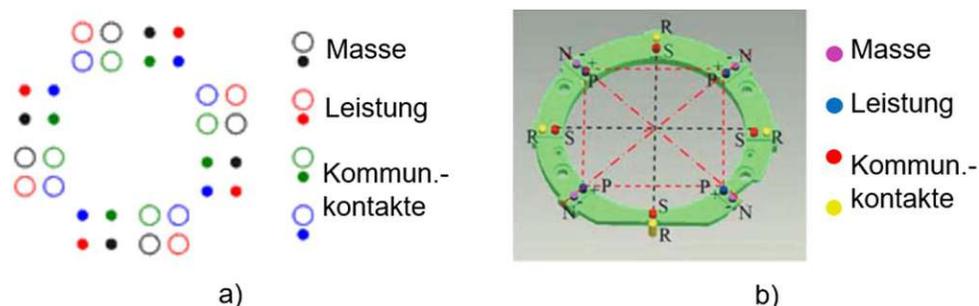


Abbildung 26: Elektrische Schnittstellen modifiziert übernommen von a) Molecube [15] und b) GENFA [40]

Bei den elektrischen Verbindungen von HiGen [11] und RoFiCoM [41] gelingt es mittels redundanter Anordnung mehrerer Federkontaktstifte ebenfalls sowohl eine Geschlechtslosigkeit als auch eine vierfache Verdrehbarkeit zu erreichen. Wie der Abbildung 27 zu entnehmen ist, entstehen durch die 12 Stifte bei der HiGen-Verbindung und den gegenüberliegenden Kontaktplatten, dadurch bei jeder der vier Orientierungen mindestens 6 Kanäle für die Masse, Leistung, Verbindungsabfrage, globale Kommunikation (I²C, CAN-Bus) und lokale Kommunikation. Die Federkontaktstifte sind für eine Stromstärke von 3,5 A ausgelegt.

Bei der RoFiCoM-Verbindung [41] hingegen werden nur acht Federstiftkontakte verwendet, die jeweils für 2 A ausgelegt sind. Auch sie sind redundant und kreisförmig angeordnet, sodass bei einer Verdrehung von 90° , 180° und 270° immer mindestens vier Kontakte verbunden sind. Diese sind für die Leistung, die Masse und zwei für die Kommunikation. Als Kommunikation wird bei dieser Verbindung UART mit einer hohen Baudrate und einem benutzerdefinierten Protokoll verwendet.

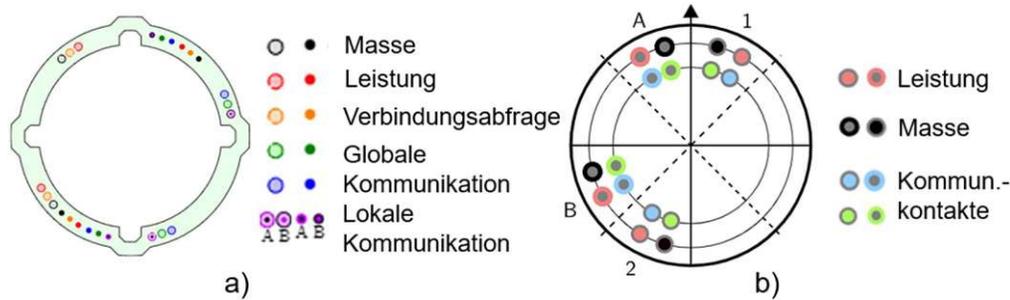


Abbildung 27: Elektrische Schnittstellen modifiziert übernommen von a) HiGen [11] und b) RoFiCoM [41]

3.3 Vergleich und Übersicht der Verbindungssysteme

Wie in der Tabelle 1 zu sehen ist, kommen alle Geschlechtsvarianten vor, wobei die S&B-Verbindungen hauptsächlich zweigeschlechtlich (ZG) und geschlechtsspezifisch (w/m) ausgeführt werden. Der Grund dafür ist, dass die Stifte in beiden Verbindungshälften eingeführt werden und deswegen auch beide Hälften eine Verriegelung benötigen. Für eine Entkopplung ist somit auch eine Betätigung auf beiden Seiten notwendig. Nur die Verbindung GENFA [40] schafft es durch die Platzierung der Stifte auf die bewegliche Verriegelungsplatte eine geschlechtslose (GL) Variante zu entwickeln. Die Haken- und S&S-Verbindungen sind hauptsächlich geschlechtsspezifisch ausgeführt. Wahrscheinlich, weil die Aufhängung der Haken und der Betätigungsmechanismus komplex sind und dieser deswegen nicht auf beiden Verbindungshälften verbaut wird. Der spezielle Aufbau und Betätigungsmechanismus der Formanpassungs-Verbindungen führt dazu, dass geschlechtslose Varianten einfach umsetzbar sind, weswegen hier auch der Großteil diese Geschlechtsvarianten darstellen.

Die meisten Verbindungssysteme haben eine Rollachsensymmetrie von 90° . Nur dem Verbindungssystem GHEFT [34, 35] gelingt es mithilfe einer drehbaren Lagerung der gesamten Verbindungsplatte einen voll symmetrischen Aufbau zu entwickeln. Dies geht jedoch mit einem hohen Platzbedarf einher und somit hat diese Verbindung auch die größten Abmessungen von 170 mm x 155 mm. Im Gegensatz dazu ist CONRO [22] mit 25,4 mm x 25,4 mm das kleinste Verbindungssystem. Diese geringen Abmessungen werden unter anderem erreicht durch die Verwendung eines FGL-Drahtes als Betätigung, anstatt eines Elektromotors, wie es beim Großteil der Verbindungssysteme verwendet wird. Der Grund das FGL-Drähte nur bei kleinen Baugrößen eingesetzt werden, ist die begrenzte Kraft dieses Mechanismus. Elektromotoren schaffen deutlich höhere Drehmomente, was bei größeren Bauteilen oder höheren Ausrichtungstoleranzen erforderlich ist. Die Molecubes [15] kommen ganz ohne Betätigung aus, da sie keine Verriegelung haben, sondern nur gesteckt sind.

Im Allgemeinen kann zusammengefasst werden, dass jeder Verbindungstyp Vorteile und Nachteile aufweist und je nach Anwendung ein Typ mehr oder weniger geeignet ist. Wird ein geschlechtsloser Aufbau gefordert, so ist eine Formanpassungs-Verbindung zu empfehlen. Ist eine zweigeschlechtige Variante ausreichend, so macht eine S&B aufgrund des einfachen und platzsparenden Aufbaus am meisten Sinn. Haken-Verbindungen haben oft einen komplexeren Mechanismus und sind geschlechtsspezifisch ausgeführt. Dafür ist der größte Vorteil dieser Verbindungssysteme, dass bei nicht gekoppelten Modulen die Haken im Modul versenkt sind und keine Stifte, Profile oder Schlüssel aus der Oberfläche ragen. Informationen bezüglich der zulässigen Belastungen der Verbindungssysteme sind leider nur selten verfügbar. Aufgrund der wenigen Angaben lässt sich aber trotzdem erkennen, dass S&B-Verbindungen die höchsten Zugbelastungen ertragen können. So ist bei der CoBoLT-Verbindung [24] eine Zugbelastung von 4 kN und bei der EMI-Verbindung [38] 0,8 kN angegeben.

Typ	Name	Geschlecht (mech. V.)	RAS (mech. V.)	Größe (in mm)	Betätigung
Stift & Bohrung	CONRO [22]	w/m	180°	25,4x25,4	FGL-Draht
	PolyBot Gen 2 [23, 39]	ZG	90°	50x50	FGL-Draht
	UCT [14]	ZG	90°	100x100	DC-Motor
	CoBoLT [24]	ZG	90°	41,2x41,2	DC-Motor
	Molecubes [15]	ZG	90°	66x66	keine Verriegelung, gesteckt
	GENFA [40]	GL	90°	50x40x15	Bürstenmotor
	EMI [38]	w/m	90°	n.a.	n.a.
Haken	M-TRAN III [19, 26]	w/m	90°	65x65	DC-Motor
	Roombot Con. [25, 28]	ZG	90°	80x80	DC-Motor
	Sambot [29 – 31]	w/m	asym.	80x80	DC-Motor
	ReBot [42]	w/m	90°	80x80	DC-Motor
	Trimobot [32]	w/m	180°	27x43	Schrittmotor
Schloss & Schlüssel	iSSI Con. [21]	w/m	90°	Ø160	n.a.
	Transmote [33]	w/m	90°	n.a.	Servomotor
Formanpassung	GHEFT [34, 35]	GL	voll sym.	170x155x155	2 Servomotoren
	SINGO [36]	GL	90°	Ø64	DC-Motor
	RoGenSiD [37]	GL	90°	n.a.	Schrittmotor
	HiGen [11]	GL	90°	Ø71	DC-Motor
	RoFiCoM [41]	GL	90°	Ø50	N20 DC-Motor

Tabelle 1: Übersicht über mechanische Schnittstellen von relevanten Verbindungen

Bei den elektrischen Verbindungen fällt die Unterscheidung zwischen geschlechtslos und zweigeschlechtlich weg, da hier keine Betätigung notwendig ist (siehe Kapitel 2.1). Wie in der Tabelle 2 zu sehen ist, gibt es sowohl einige geschlechtsspezifische als auch geschlechtslose Varianten. Bei Verbindungen, die über kabellose Übertragungssysteme verfügen fällt dieses Merkmal weg. Analog zu den mechanischen Verbindungen sind auch die elektrischen Verbindungen größtenteils vierfach achsensymmetrisch.

Die meisten untersuchten Verbindungen verfügen über eine Schnittstelle für die Datenübertragung, wenngleich diese oft kabellos über Bluetooth und Infrarot durchgeführt wird. Über die Eigenschaft Leistung zu übertragen, verfügen weniger Schnittstellen, da viele Robotersysteme autarke Module besitzen, welche dementsprechend auch mit einem eigenen Energiespeicher ausgestattet sind. Bei jenen Systemen die auch Leistung übertragen können, werden zum Großteil Federkontaktstifte sowohl für die Leistungsübertragung als auch die Datenübertragung verwendet. Diese sind jedoch nicht für hohe Ströme ausgelegt und infolgedessen können damit auch keine hohen Leistungen übertragen werden. Die Kommunikation findet oftmals mittels CAN-Bus oder Ethernet für hohe Übertragungsraten statt. An dieser Stelle muss aber noch erwähnt werden, dass nähere Details zur Kommunikation oder Leistungsübertragung oft nicht angegeben werden.

Name	Geschl. (e. V.)	RAS (e.V.)	Datenübertr.	Leistungsübertr.	Komm.	Steckersystem
CONRO [22]	-	180°	kabellos	Nein	-	Infrarot
PolyBot Gen 2 [23, 39]	GL	90°	Ja	Ja	CAN-Bus	Eigenkonstruktion, IR
UCT [14, 24]	GL	90°	Ja	Ja	n.a.	Eigenkonstruktion
CoBoLT [24]	w/m	90°	Ja	Ja 200 W (8 A/25 V)	Ethernet	9 Federkontaktstifte
Molecubes [15]	GL	90°	Ja	Ja (8 A)	Half Duplex RS-232 Bus	16 Kontaktstifte (8 Kanäle)
GENFA [40]	GL	90°	ja	ja	n.a.	16 Kontakte (4 Kanäle)
EMI [38]	w/m	90°	ja	ja (10 A)	Ethernet	36 Federkontaktstifte (18 Kanäle)
M-TRAN III [19, 26]	w/m	90°	Ja	Nein	CAN-Bus	10 Elektroden (5 Kanäle), BT, IR
Roombot Con. [25, 28]	-	90°	kabellos	Nein	n.a.	Bluetooth
Sambot [29 – 31]	w/m	asym	Ja	Nein	ZigBee CAN-Bus	6 Kontakte
ReBot [42]	w/m	90°	ja	Ja	CAN-Bus, I ² C,	Federkontaktstifte, Bluetooth, IR
Trimobot [32]	-	180°	kabellos	nein	n.a.	keine

iSSI Con. [21]	w/m	90°	ja	Ja	n.a.	Federunterstützte Kupferringe
Transmote [33]	-	90°	kabellos	Nein	ZigBee	Bluetooth
GHEFT [34, 35]	-	voll sym.	Nein	Nein	keine	keine
SINGO [36]	-	90°	kabellos	Nein	n.a.	Infrarot
RoGenSiD [37]	GL	90°	ja	Ja	XBee radio modem	2 Federkontaktstifte
HiGen [11]	GL	90°	ja	Ja	CAN-Bus, I ² C	12 Federkontaktstifte (6 Kanäle)
RoFiCoM [41]	GL	90°	ja	Ja (48 V)	UART (custom protocol)	8 Federkontaktstifte (4 Kanäle)

Tabelle 2: Übersicht elektrischer Schnittstellen von relevanten Verbindungen

Das Resümee dieser Recherche ist, dass keines der untersuchten Verbindungssysteme die Anforderungen, welche für diese Arbeit und dementsprechend auch für das Projekt TURBO erforderlich sind (siehe Tabelle 3), erfüllen. Der wesentliche Unterschied zu den Robotersystemen aus der Recherche und den MRMM, für die in dieser Arbeit ein Verbindungssystem entwickelt werden soll, liegt in den Eigenschaften der Module. Wie oben bereits beschrieben, besitzen die Module des TURBO-Robotersystems jeweils eine Komponente der gesamten Struktur und sollen je nach Bedarf manuell miteinander gekoppelt werden können. Fast alle untersuchten Verbindungssysteme wurden jedoch für selbst-rekonfigurierbare Robotersysteme entwickelt, wodurch jedes Modul als autarkes Robotersystem aufgebaut ist. Diese Systeme sind vor allem darauf ausgelegt, dass die Toleranz gegenüber Ausrichtungsfehlern möglichst groß ist, damit die Wahrscheinlichkeit für erfolgreiche Kopplungsvorgänge steigt. Bei manuell rekonfigurierbaren Systemen ist dieses Merkmal jedoch von geringerer Bedeutung, wenngleich nicht unbedeutend (siehe Kapitel 2.4). Außerdem sind bei autonomen Systemen elektrische Betätigungen notwendig, nicht aber bei manuellen. Des Weiteren ist die Übertragung von Leistung begrenzt, da jedes Modul über eigene Energiespeicher verfügt. Und zu guter Letzt sind die meisten recherchierten Systeme deutlich kleiner und dementsprechend auch nicht stabil genug für die erforderliche Anwendung in der Industrie (Ausnahmen: CoBoLD [24]). Aus diesen Gründen wird in weiterer Folge aufbauend auf den vorgestellten Lösungen ein neuartiges Verbindungssystem entwickelt.

4 Konzepterstellung

Mit den Erkenntnissen aus der Literaturrecherche (siehe Kapitel 3) wird in der ersten Phase des Produktentwicklungsprozesses (siehe Kapitel 1.3) die Konstruktionsaufgabe für die Entwicklung eines Verbindungssystems für einen MRMM klar definiert und eine Anforderungsliste abgeleitet [9].

In der zweiten Phase wird dann ein morphologischer Kasten erstellt, um daraus unterschiedliche Konzepte ableiten zu können [9]. Diese sind am Ende dieses Kapitels genauer beschrieben. Dabei wird vor allem auf die prinzipielle und funktionale Wirkstruktur eingegangen. Basierend auf der Konzeptevaluierung im Kapitel 5 wird nur jenes Konzept detailliert ausgearbeitet, welches den Anforderungen am besten entspricht.

4.1 Anforderungen

Die Anforderungsliste ist das Ergebnis der ersten Produktentwicklungsphase und stellt alle Anforderungen in tabellarischer Form dar. Bei der Formulierung ist es sinnvoll einige Qualitätskriterien einzuhalten, um aufwendige Iterationen im Produktentwicklungsprozess zu reduzieren. So sollen Anforderungen unter anderem eindeutig, realistisch ausführbar und vereinbar mit allen Stakeholdern sein. Des Weiteren müssen sie verifizierbar sein und sowohl vollständig und verständlich beschrieben werden [9].

In Tabelle 3 sind die Anforderungen nach diesen Kriterien angeführt. Dabei werden sie in fünf Funktionsgruppen eingeteilt: Allgemein, Belastungen, Umwelt, Eigenschaften der Schnittstelle und Fertigung. Jede Anforderung wird mithilfe einer laufenden Nummer und einer Bezeichnung unverwechselbar definiert. Eine Priorisierungsspalte mit drei Unterscheidungen (niedrig, mittel, hoch) gibt die Wichtigkeit der jeweiligen Anforderung an. In der rechten Spalte sind die Anforderung dann detailliert beschrieben und falls vorhanden, physikalische Größen angegeben. Auf Basis dessen wird die Verifizierung des Verbindungssystems, welche in Kapitel 7.2 beschrieben wird, durchgeführt.

Die Anforderungsliste wurde neben der Literaturrecherche auch von Alexander Kinzer's Projektarbeit inspiriert, in der er eine ausführliche Anforderungsliste für einen MRMM erstellte (siehe Anhang A). Außerdem ist an dieser Stelle noch zu erwähnen, dass die Anforderungsliste ein dynamisches Dokument darstellt und eine Änderung im Laufe des Produktentwicklungsprozesses möglich ist [9].

	Nr.	Bezeichnung	Prio.	Beschreibung
Allgemein	1	Erweiterung	hoch	Die zu verbindenden Elemente sollen bei einer Rotation von 90°, 180° und 270° trotzdem noch verbunden werden können.
	2	Abmaße	hoch	Die maximale Dimension des Verbindungssystemabschnitts, welches innerhalb des Moduls ist, darf 114 mm x 114 mm x 20 mm (L x B x T) nicht überschreiten.
	3	Materialkosten	mittel	Die Kosten für ein Verbindungselement (beinhaltet beide Seiten) sollen 30 € nicht überschreiten.
Belastungen	5	Beschleunigung	mittel	Beschleunigungen von 1 m/s^2 in positiver und negativer Richtung soll der Verbindung keine Probleme bereiten.
	6	Zuladung	hoch	Eine mögliche Zuladung von 100 kg bei einer Konfiguration mit 3 x 4 Modulen, soll zusätzlich berücksichtigt werden.
	7	Eigengewicht der Module	hoch	Das Eigengewicht der Einzelmodule von 3 kg und der Doppelmodule von 6 kg muss bei der Stabilität berücksichtigt werden.
	8	Elektrische Spannung	mittel	Die elektrische Steckverbindung soll für eine Spannung von max. 48 V konzipiert werden.
	9	Elektrischer Strom	mittel	Die elektrische Steckverbindung soll für eine maximale Stromstärke von 20 A entwickelt werden.
	10	Temperatur	mittel	In einem Temperaturbereich von 0–40 °C soll eine vollständige Funktionalität des Verbindungssystems gegeben sein.
Umwelt	11	Abdichtung ggü. Umwelt	hoch	IP-Schutzart soll berücksichtigt werden und mindestens den Schutz vor dem Zugang von Fingern gewährleisten (IP 20B).
	12	Bau-materialien	mittel	Der Fokus soll auf nachhaltigen Materialien liegen, welche durch Kreislaufwirtschaft wiederverwendet werden können. Sortenreine Materialien sind zu präferieren, um einfaches Recycling zu ermöglichen.
	13	Hilfsstoffe	hoch	Hilfsstoffe, wie Öle, Kühlmittel etc., sind möglichst zu vermeiden, um die Wartbarkeit zu vereinfachen und die Verschmutzungen der Umwelt zu minimieren.
	15	Wieder-verwertung	mittel	Das Produkt soll vollständig demontierbar sein, um Recycling zu gewährleisten.
Eigenschaften der Schnittstelle	16	Mechanische Schnittstelle	hoch	Es soll eine stabile Arretierung (max. 1 mm Spielraum im geschlossenen Zustand) zwischen den Modulen mit einer hohen Steifigkeit (max. 2 mm Verformung) entwickelt werden.
	17	Leistungs-schnittstelle	hoch	Die Leistungsschnittstelle soll die Leistungsversorgung von 960 W (Spitzenleistung bei 48 V und 20 A) des Moduls und aller Folgemodule gewährleisten. Außerdem soll eine sichere Übertragung von Leistung möglich sein. Das bedeutet, dass bei einer maximalen Belastung des Verbindungssystems und der dadurch resultierenden Verformungen, die Leistungsverbindung nicht unterbrochen werden darf.

	18	Informationsschnittstelle	hoch	Die Informationsschnittstelle soll eine sichere Übertragung von Signalen garantieren: Bei einer maximalen Belastung des Verbindungssystems und der entstehenden Verformung, soll die Signalverbindung nicht unterbrochen werden. Es sollen gängige Kommunikationsstandards, wie WLAN, Ethernet oder BUS-Systeme verwendet werden.
	19	Bewegungsfreiheit	hoch	Nach vollendeter Kopplung der Verbindungselemente soll die Anzahl der Freiheitsgrade null werden.
	20	Bedienbarkeit	hoch	Die Rekonfiguration soll manuell erfolgen. Dabei soll eine werkzeuglose Kopplung möglich sein. Die Entkopplung muss nicht werkzeuglos erfolgen aber mit einfachen Werkzeugen durchführbar sein.
Fertigung	21	Lieferzeiten	mittel	Komponenten sollen hohe Verfügbarkeiten und kurze Lieferzeiten haben und idealerweise lagernd bei Großhändlern sein, um die Verbindung innerhalb von zwei Monaten aufbauen zu können.
	22	Fertigungsverfahren	hoch	Es sollen Fertigungsverfahren gewählt werden, um die Fertigung auch an Universitäten oder Schulen möglich zu machen: Fused Deposition Modeling (FDM), Selective Laser Melting (SLM), Selektive Laser Sintering (SLS), Stereolithographie (SLA), Computerized Numerical Control (CNC).

Tabelle 3: Anforderungsliste eines MRMM an das Verbindungssystem auf Basis des Projekts TURBO

4.2 Morphologischer Kasten

Die systematische Kombination von unterschiedlichen Lösungen der jeweiligen Kategorien wurde erstmals von Zwicky [43] beschrieben. Dabei werden unterschiedlichen Kategorien oder Teilfunktionen mehreren Lösungen zugeordnet. Durch das Kombinieren von einzelnen Wirkstrukturen können so eine Vielzahl von Gesamtwirkstrukturen erzeugt werden [9]. Bei der Auswahl der Kombinationen werden aber nur jene Teillösungen verwendet, die auch tatsächlich eine relevante Gesamtlösung in Bezug auf die Anforderungsliste liefern können. Der Vollständigkeit halber und um die Flexibilität des Morphologischen Kastens zu zeigen, wurden auch weniger relevante Teillösungen angeführt.

Tabelle 4 zeigt den Morphologischen Kasten für die Konzeptgenerierung des Verbindungssystems. Wobei die unterschiedlichen Farben die einzelnen Konzepte, welche in den folgenden Kapiteln beschrieben werden, darstellen. Die Kategorie Verbindungsart beinhaltet alle vier in Kapitel 3.1 beschriebenen Verbindungsarten. Jedoch wurden die Hakenverbindungen sowie die S&S-Verbindungen aufgrund ihrer Komplexität und des Platzbedarfs nicht als Teillösungen gewählt. In den beiden Kategorien Kopplung und Entkopplung sind jeweils vier Teillösungen angeführt, wobei aufgrund der Anforderung (Tabelle 3, Nr. 20) die Module werkzeuglos koppeln zu

können, wird nur die Lösung 1 und 2 gewählt. Bei der Symmetrie der mechanischen und elektrischen Verbindung ist die erste Lösung auf die Flächensymmetrie bezogen und Lösung 2 bis 4 auf die Rollachsensymmetrie. Der Zugang für die Betätigung beschreibt die Anzahl der Seiten eines Moduls, von wo der Entkopplungsmechanismus betätigt werden kann. Da die Module des TURBO-Projekts würfel- oder quaderförmig sind, gibt es demnach maximal fünf mögliche Seiten für einen Zugang. Ein Fernzugang kann bei einer elektrischen Betätigung umgesetzt werden. Die Kategorie Vorspannung beinhaltet Teillösungen für die Vorspannung des Verriegelungsmechanismus und ist nur notwendig bei mechanischer Betätigung des Kopplungsmechanismus. Für die Teillösungen in der Kategorie Material werden Kunststoff, Stahl und Aluminium gewählt, da diese relativ kostengünstig und einfach verfügbar sind. Das Verbindungssystem kann intern über den Aufbau der Bauteile abgedichtet werden oder extern über zusätzliche Komponenten, wie etwa diverse Abdeckungen oder Dichteinlagen zwischen den Verbindungshälften. Diese Thematik wird in der Kategorie Abdichtung berücksichtigt. Weiters ist an dieser Stelle zu erwähnen, dass die Teillösungen nicht exklusiv sind und somit auch eine Kombination aus verschiedenen Lösungen möglich ist. Vor allem beim Material wird es sinnvoll sein, hoch beanspruchte Bauteile aus Metall zu fertigen und weniger beanspruchte Teile aus Kunststoff.

Lösungen Kategorien	1	2	3	4
Verbindungsart	Haken	S & B	FA	S&S
Betätigung Kopplung	elektrisch	mechanisch werkzeuglos	proprietäres Werkzeug	sonstiges Werkzeug
Betätigung Entkopplung	elektrisch	mechanisch werkzeuglos	proprietäres Werkzeug	sonstiges Werkzeug
Symmetrie mech. Verbindung	symmetrisch (Fläche)	symmetrisch (180° Rollachse)	symmetrisch (90° Rollachse)	symmetrisch (45° Rollachse)
Zugang für Betätigung	Fernzugang	3 Seiten	4 Seiten	5 Seiten
Vorspannung	nicht vorgespannt	Zugfeder	Druckfeder	Drehfeder
Material	Kunststoff	Stahl	Aluminium	
Abdichtung	externe Abdichtung	interne Abdichtung		
Art der Informationsübertragung	W-Lan	Ethernet	Bus-System	RTE
Symmetrie elektr. Verbindung	symmetrisch (Fläche)	symmetrisch (180° Rollachse)	symmetrisch (90° Rollachse)	symmetrisch (verdrehbar)

■ Konzept M4Z
 ■ Konzept M5Z
 ■ Konzept MEB
 ■ Konzept ELB

Tabelle 4: Morphologischer Kasten

Im weiteren Verlauf werden vier Konzepte, die durch die Kombination von den Teillösungen entstanden sind, genauer beschrieben. Dabei werden jeweils die gewählten Teillösungen angegeben und eine entsprechende Konzeptskizze gezeigt. Darüber hinaus werden die prinzipielle Wirkstruktur sowie die Funktionsstruktur näher beschrieben. Abschließend eines jeden Konzepts werden die Vorteile und Nachteile in tabellarischer Form zusammengefasst.

4.3 Konzept: Mechanisch mit vier Zugängen (M4Z)

Beim Konzept M4Z handelt es sich um eine S&B-Verbindung, die durch die PolyBot-Verbindung [23, 39] inspiriert wurde. Die mechanischen Belastungen werden durch vier um 90° versetzte Stifte übertragen. Durch das Zusammenführen der beiden Hälften dringen die Stifte in die entsprechenden Bohrungen der gegenüberliegenden Befestigungsplatte ein, wodurch die Freiheitsgrade in Y - und Z -Richtung gesperrt werden und auch eine Verdrehung um die X -Achse verhindert wird. Eine zusätzliche Verriegelung durch eine Hakenscheibe auf der Rückseite jeder Befestigungsplatte sorgt für die Blockierung einer Verschiebung in Koordinatenrichtung X .

Kategorien	Lösungen
Verbindungsart	S&B
Betätigung Kopplung	mechanisch werkzeuglos
Betätigung Entkopplung	sonstiges Werkzeug
Symmetrie mech. Verbindung	symmetrisch (Fläche & 90° RA)
Zugang für Betätigung	4 Seiten
Vorspannung	Zugfeder
Material	Kunststoff und Aluminium
Abdichtung	Interne Abdichtung
Informations- übertragung	RTE
Symmetrie elektr. Verbindung	symmetrisch (verdrehbar)

Tabelle 5: Übersicht des Konzepts M4Z

Die Hakenscheibe ist durch vier Zugfedern vorgespannt und rastet in die Nuten der gegenüberliegenden Stifte ein, sobald die Verbindungshälften zusammengeführt werden. Dadurch ergibt sich eine werkzeuglose Betätigung beim Kopplungsvorgang. Um eine Entkopplung zu ermöglichen, wird eine spitzförmige Platte als zusätzliches Werkzeug benötigt. Beim Einführen dieser Öffnungsplatte werden zwei Stifte, welche

jeweils mit der Hakenscheibe einer Seite verbunden sind, verschoben. Infolgedessen dreht sich die Hakenscheibe entgegen der Federkraft und gibt so die Befestigungsstifte frei. Die Öffnungsstifte sind redundant um 90° versetzt angeordnet und deshalb kann die Entkopplung bei diesem Konzept auch auf allen vier Seiten durchgeführt werden. Dadurch können mehrere miteinander gekoppelte Module auch wieder entkoppelt werden. Da jedoch immer eine Seite erreicht werden muss, liegt eine Begrenzung in der Modularität vor und muss bei der Rekonfiguration stets beachtet werden.

Mechanisch belastete Teile, wie die Befestigungsplatte, Hakenscheibe und die Stifte sind aus einer entsprechenden Aluminiumlegierung gefertigt. Der Steckermechanismus hingegen besteht aus einem geeigneten Kunststoff, da er keinen großen Belastungen ausgesetzt ist. Außerdem ist der Steckermechanismus drehbar gelagert, um auch hier eine Rollachsensymmetrie zu erzeugen.

Für die notwendige Leistungs- und Informationsübertragung werden entsprechende Stecker ausgewählt und in den Steckermechanismus integriert. Dabei ist zu beachten, dass die in der Anforderungsliste definierten Maximalwerte der elektrischen Verbindung von 48 V und 25 A realisiert werden können. Außerdem wird bei diesem Konzept auf eine Signalübertragung in Form eines RTEs gebaut und somit muss das Steckersystem auch über dementsprechende Eigenschaften verfügen. Die Abdichtung gegenüber dem Eindringen von Fingern (IP 20B) ist in der Anforderungsliste definiert und erfolgt intern, durch den Aufbau der Befestigungsplatte mit nur kleinen Öffnungen. Weitere externe Abdichtungen, wie etwa Dichtringe oder Kunststoffverkleidungen sind deshalb nicht notwendig. In Tabelle 6 werden nun die Vorteile und Nachteile dieses Konzepts zusammengefasst.

Vorteile	Nachteile
Einfaches Design	Betätigung für die Entkopplung auf der Rückseite nicht möglich
Geringe Kosten	Zugang für mechanische Betätigung bei Entkopplung notwendig
Geringes Gewicht	Begrenzung in der Modularität
Einfach zu Recyceln	
Kopplung ohne Betätigung	
Symmetrischer Aufbau der mechanischen Verbindung	
Geringer Platzbedarf	

Tabelle 6: Vorteile und Nachteile des Konzepts M4Z

4.4 Konzept: Mechanisch mit fünf Zugängen (M5Z)

Das Konzept M5Z ist auch als S&B-Verbindung aufgebaut. Die Belastungsübertragung erfolgt demnach ebenfalls über die Stifte und die Hakenscheibe. Durch die besondere Anordnung der Befestigungsstifte und der Bohrungen können die beiden Verbindungshälften auch bei diesem Konzept in vier verschiedenen Orientierungen mit jeweils 90° Versatz gekoppelt werden.

Der Vorgang für die Kopplung erfolgt ebenfalls durch die Zusammenführung der beiden Hälften, wodurch die Hakenscheibe entgegen der Federkraft gedreht wird und dann in die Nuten der Befestigungsstifte einrasten. Durch das Hinzufügen eines Bowdenzugs, welcher auf der einen Seite mit der Hakenscheibe und am anderen Ende mit einem drehbaren Zylinder fest verbunden ist, kann dieses System zusätzlich von der gegenüberliegenden Seite des Moduls mit einem proprietären Werkzeug, wie etwa einem Schraubenzieher, betätigt werden. Auf den anderen vier Seiten des Moduls sorgt eine Öffnung in der Befestigungsplatte für einen Zugang zum Entkopplungsmechanismus. Wie beim Konzept M4Z muss auch bei diesem Konzept mindesten eine Seite des Moduls zugänglich sein, um den Entkopplungsmechanismus zu betätigen.

Kategorien	Lösungen	
Verbindungsart	S&B	
Betätigung Kopplung	mechanisch werkzeuglos	
Betätigung Entkopplung	proprietäres Werkzeug	
Symmetrie mech. Verbindung	symmetrisch (Fläche & 90° RA)	
Zugang für Betätigung	5 Seiten	
Vorspannung	Zugfedern	
Material	Kunststoff und Stahl	
Abdichtung	Interne Abdichtung	
Informationsübertragung	Ethernet	
Symmetrie elektr. Verbindung	symmetrisch (verdrehbar)	

Tabelle 7: Übersicht des Konzepts M5Z

Als Material wird bei diesem Konzept vorwiegend Stahl verwendet. Der Steckmechanismus ist ähnlich aufgebaut wie im vorherigen Konzept und besteht ebenfalls aus Kunststoff. Da bei diesem Konzept eine Ethernet basierte Signalübertragung verwendet wird, muss die Steckerauswahl auch dementsprechend

durchgeführt werden. Um ebenfalls die geforderte Abdichtung zu erreichen, müssen die Betätigungsöffnungen so ausgeführt sein, dass ein Eindringen mit Fingern nicht möglich ist. In Tabelle 8 werden die Vorteile und Nachteile des Konzepts M5Z zusammengefasst.

Vorteile	Nachteile
Zugang für die Entkopplung auf allen fünf Seiten	Hohe Kosten
Einfach zu Recyceln	Hohe Komplexität
Kopplung ohne Betätigung	Hoher Platzbedarf
Symmetrischer Aufbau der mechanischen Verbindung	Schlechtere Abdichtung
	Begrenzung in der Modularität

Tabelle 8: Vorteile und Nachteile des Konzepts M5Z

4.5 Konzept: Mechanische und elektr. Betätigung (MEB)

Neben den ersten beiden Konzepten ist auch das Konzept MEB eine S&B-Verbindung. Jedoch wird die Betätigung für die Entkopplung elektrisch mit einem kleinen Elektromotor durchgeführt. Dieser bewegt den drehbaren Zylinder so weit, bis die Hakenscheibe die Befestigungsstifte der gegenüberliegenden Verbindungshälfte wieder freigibt. Ein Stirnradgetriebe ist notwendig, um die hohen Drehzahlen zu verringern und ein entsprechendes Drehmoment zu erhalten. Durch die Verwendung eines Bowdenzugs für die Drehung der Hakenscheibe und nicht wie im Konzept ELB (siehe Kapitel 4.6) direkt über den Elektromotor, ist eine mechanische Kopplung ohne Werkzeug durch einfaches Zusammenstecken der beiden Hälften möglich. Die Entkopplung kann zum Beispiel über eine App oder einen PC durchgeführt werden, wodurch der Modularität keine Grenzen gesetzt sind.

Da ein Modul mehrere Verbindungssysteme beinhalten kann, werden auch eine entsprechende Anzahl an Elektromotoren pro Modul benötigt. Das bedeutet jedoch neben den zusätzlichen Kosten und dem Energieaufwand, auch einen hohen Aufwand in der Umsetzung der Ansteuerung aller Motoren. Als Beispiel soll die Konfiguration in Abbildung 1 a) dienen. Hier sind insgesamt 60 Verbindungssysteme gekoppelt und folglich 120 Elektromotoren verbaut. Bei einer Entkopplung eines Moduls müssen also genau die richtigen zwei Elektromotoren angesteuert werden. Darüber hinaus wird eine zusätzliche externe Kommunikation für die Ansteuerung der Motoren über Bluetooth oder WLAN notwendig.

Kategorien	Lösungen	
Verbindungsart	S&B	<p>Labels for top view: Befestigungsplatte, Befestigungsstifte, Steckermechanismus</p> <p>Labels for bottom view: Umlenkrolle, Zugfedern, Hakenscheibe, Drehbarer Zylinder, Bowdenzug, Steckermechanismus</p>
Betätigung Kopplung	mechanisch werkzeuglos	
Betätigung Entkopplung	elektrisch	
Symmetrie mech. Verbindung	symmetrisch (Fläche & 90° RA)	
Zugang für Betätigung	Fernzugang	
Vorspannung	Zugfedern	
Material	Kunststoff und Aluminium	
Abdichtung	Interne Abdichtung	
Informationsübertragung	Bus-System	
Symmetrie elektr. Verbindung	symmetrisch (verdrehbar)	

Tabelle 9: Übersicht des Konzepts MEB

Da weniger Öffnungen in der Befestigungsplatte vorhanden sind, ist die Abdichtung einfacher umzusetzen. Die Kommunikation dieses Konzepts wird mit einem BUS-System durchgeführt und muss bei der Steckerwahl beachtet werden. In Tabelle 10 werden die Vorteile und Nachteile dieses Konzepts nochmal zusammengefasst.

Vorteile	Nachteile
Entkopplung Fernzugang möglich	Hohe Kosten
Einfache Bedienung	Hohe Komplexität der Motorenansteuerung
Kopplung ohne Betätigung	Hoher Platzbedarf
Symmetrischer Aufbau der mechanischen Verbindung	Energieaufwand
Einfacher Aufbau	E-Motor schwer recycelbar
Einfache Abdichtung	Externe Kommunikation notwendig

Tabelle 10: Vorteile und Nachteile des Konzepts MEB

4.6 Konzept: Elektrische Betätigung (ELB)

Das Konzept ELB beruht auf die Verbindungsart der Formanpassung und wurde inspiriert von der RoGenSiD-Verbindung [37] welche in Kapitel 3.1.4 beschrieben wurde. Auf einer drehbar gelagerten Scheibe sind vier Profile um 90° versetzt montiert. Außerdem befinden sich in der Befestigungsplatte vier Positionierstifte. Durch die besondere Anordnung der Stifte und der Profile ist eine vierfache Rollachsensymmetrie gegeben.

Kategorien	Lösungen
Verbindungsart	Formanpassung
Betätigung Kopplung	elektrisch
Betätigung Entkopplung	elektrisch
Symmetrie mech. Verbindung	symmetrisch (Fläche & 90°)
Zugang für Betätigung	Fernzugang
Vorspannung	Keine Vorspannung
Material	Kunststoff und Stahl
Abdichtung	Interne Abdichtung
Informations- übertragung	Ethernet
Symmetrie elektr. Verbindung	symmetrisch (verdrehbar)

Tabelle 11: Übersicht des Konzepts ELB

Beim Kopplungsvorgang werden zuerst diese Stifte in die gegenüberliegenden Bohrungen eingeführt und sorgen damit nicht nur für eine Zentrierung der beiden Verbindungshälften, sondern sie sind auch notwendig, damit eine Verdrehung um die X -Achse verhindert wird. Anschließend wird der Elektromotor betätigt, wodurch die Drehscheibe bewegt wird und die Profile ineinander verhaken. Infolgedessen wird eine Verschiebung in X -Richtung verhindert und somit sind alle übrigen Freiheitsgrade gesperrt.

Die Übertragung der Drehzahl erfolgt über ein Schneckenradgetriebe. Der Vorteil dabei ist, dass das System nicht rückwärts antreibbar ist und eine Öffnung des Mechanismus somit nur möglich ist, indem der Motor in die andere Richtung dreht. Bei diesem Kopplungsmechanismus ist sowohl für die Kopplung als auch für die Entkopplung eine Betätigung durch den Elektromotor notwendig. Dementsprechende Ansteuerungen sind mit hohem Entwicklungsaufwand verbunden. Wie auch beim Konzept MEB kann die Ansteuerung kabellos über eine App oder einen PC

durchgeführt werden, wodurch kein mechanischer Zugang zu den Modulen notwendig ist.

Vorteile	Nachteile
Einfache Bedienung	Hohe Kosten
Kein mechanischer Zugang notwendig	Hohe Komplexität der Motorenansteuerung
Symmetrischer Aufbau der mechanischen Verbindung	Hoher Platzbedarf
Einfacher Aufbau	Energieaufwand
Einfache Abdichtung	Hohes Gewicht
Keine Begrenzung in der Modularität	Betätigung für Kopplung notwendig
	Geringer Platz für elektrische Verbindung
	E-Motor schwer recycelbar

Tabelle 12: Vorteile und Nachteile des Konzepts ELB

5 Konzeptevaluierung

In diesem Kapitel werden mithilfe einer methodischen Vorgehensweise die vier beschriebenen Konzepte evaluiert und darauf aufbauend jenes Konzept ausgewählt, welches den zuvor definierten Anforderungen (siehe Kapitel 4.1) am besten entsprechen. Dafür werden aus der Anforderungsliste Bewertungskriterien abgeleitet, welche sowohl den technischen als auch den ökonomischen Anspruch am besten erfüllen. Diese werden dann mittels paarweisen Vergleichs gewichtet und anschließend kann mit einer Nutzwertanalyse eine rationale Entscheidung getroffen werden, welches Konzept in weiterer Folge im Detail ausgearbeitet werden soll. Dies ist das Ergebnis der Konzeptevaluierung und stellt das Ende der Konzeptphase dar [9].

5.1 Bewertungskriterien und paarweiser Vergleich

Für die Evaluierung der Konzepte werden Bewertungskriterien von der Anforderungsliste abgeleitet. Diese werden im Folgenden näher beschrieben und im Anschluss mittels paarweisen Vergleichs, je nach Bedeutung für das Erfüllen des Ziels, gewichtet.

Modularität: Dieses Kriterium beschreibt die Anzahl der Module, welche verbunden und auch wieder entkoppelt werden können. Bei guter Modularität ist die Anzahl der koppelbaren Module hoch, während sie bei schlechter Modularität stark begrenzt ist. Einen Einfluss darauf haben vor allem die Symmetrie und die Zugänge für die Betätigung.

Bauraum: Jedes Modul übernimmt eine Aufgabe des MRMMs. Um die notwendigen Bauteile für diese Aufgaben integrieren zu können, wird innerhalb des Moduls genügend Bauraum benötigt. Das Verbindungssystem wird mehrmals pro Modul verbaut und hat somit einen großen Einfluss auf den Bauraum. Deshalb soll das Verbindungssystem möglichst kleine Dimensionen aufweisen.

Kosten: Da diese Schnittstelle neben der industriellen Anwendung vor allem auch an Universitäten oder Schulen zum Einsatz kommen soll, sind die Kosten von großer Bedeutung. Wie bereits erwähnt, wird das System pro Modul mehrmals verbaut. Infolgedessen entsteht ein multiplizierender Effekt, wenn eine gesamte Roboterstruktur betrachtet wird. Hier sind neben den Materialkosten auch die Fertigungskosten zu berücksichtigen.

Steifigkeit: Damit der MRMM hinreichend präzise seine Aufgaben bewältigen kann, ist eine hohe Steifigkeit des gesamten Robotersystems notwendig. Durch die große Anzahl der Verbindungssysteme, hat eine Verformung ebendieser einen großen Einfluss auf die Verformung des Robotersystems. Um die Verformungen des

Robotersystems klein zu halten, soll deshalb das Verbindungssystem eine möglichst hohe Steifigkeit aufweisen.

Eigengewicht: Auch bei diesem Kriterium spielt der multiplizierende Effekt eine große Rolle. Zum einen werden die Module manuell gekoppelt und deswegen führt ein hohes Gewicht unweigerlich zu einer schlechten Benutzerfreundlichkeit. Und zum anderen ist die Folge eines zu hohen Gesamtgewichts der Roboterstruktur, dass die Belastung durch Zuladung eingeschränkt wird.

Bedienbarkeit: Neben dem Gewicht hat vor allem der Kopplungs- und Entkopplungsvorgang einen großen Einfluss auf die Bedienbarkeit. Sie ist eine wesentliche Eigenschaft der Module eines MRMMs und hängt zum Großteil vom Verbindungssystem ab. Eine einfache Betätigung und ein zuverlässiger Mechanismus sind die Voraussetzung für eine gute Bedienbarkeit.

Wiederverwertung: Nachhaltigkeit ist ein wichtiger Aspekt in der Produktentwicklung und spielt deswegen auch bei dieser Arbeit eine große Rolle. Einen direkten Einfluss darauf haben die verwendeten Materialien, der Aufbau der Schnittstelle, sowie die verwendeten Hilfsstoffe.

Abdichtung: Für eine sichere und langlebige Nutzung der Schnittstelle ist eine Abdichtung gegenüber der Umwelt hilfreich.

Aufwand: Unter Aufwand wird sowohl der Fertigungsaufwand, der Montageaufwand als auch der Entwicklungsaufwand verstanden. Aufgrund des Einsatzbereichs in Universitäten oder Schulen soll dieser möglichst gering sein und deswegen stellt er auch ein wichtiges Bewertungskriterium für das Verbindungselement dar.

Welche Priorisierung den einzelnen Bewertungskriterien zuzuordnen ist, wird ermittelt indem immer zwei Kriterien paarweise miteinander verglichen werden. Dieser sogenannte paarweise Vergleich stellt eine einfache Methode dar, um verschiedene Lösungsalternativen zu bewerten und wird im Buch von Pahl et al. [9] beschrieben. Tabelle 13 zeigt den paarweisen Vergleich für die genannten Bewertungskriterien. Diese sind in den Zeilen und in den Spalten angeführt und können so direkt miteinander verglichen werden. Die Auswahl der Bewertung wird auf drei Möglichkeiten beschränkt: weniger wichtig (0), gleich wichtig (0,5) oder wichtiger (1). Werden die Zahlen einer Zeile addiert, ergibt sich die absolute Gewichtung. Die relative Gewichtung bezieht sich auf die Gesamtsumme der absoluten Gewichtung. Die Bewertungen wurden innerhalb einer Diskussion mit TURBO-Teammitgliedern durchgeführt, um ein möglichst objektives Ergebnis zu erhalten.

	Modularität	Bauraum	Kosten	Steifigkeit	Eigengewicht	Bedienbarkeit	Wiederverwertung	Abdichtung	Fertigungsaufwand	Abs. Gewichtung	Rel. Gewichtung
Modularität		1	1	0,5	1	0,5	1	1	1	7	20,0%
Bauraum	0		1	0	0,5	0,5	0,5	1	0,5	4	11,4%
Kosten	0	0		0	1	0,5	1	1	0,5	4	11,4%
Steifigkeit	0,5	1	1		1	0,5	0,5	1	1	6	17,1%
Eigengewicht	0	0,5	0	0		0	0,5	1	0	2	5,7%
Bedienbarkeit	0,5	0,5	0,5	0,5	1		1	1	0,5	5	14,3%
Wiederverwertung	0	0,5	0	0,5	0,5	0		0,5	0	2	5,7%
Abdichtung	0	0	0	0	0	0	0,5		0	0,5	1,4%
Aufwand	0	0,5	0,5	0	1	0,5	1	1		4,5	12,9%

Tabelle 13: Paarweise Vergleich für die Gewichtung der Bewertungskriterien

Die Modularität hat mit 20% die höchste Gewichtung. Das liegt daran, dass diese Eigenschaft eine hohe Bedeutung für einen MRMM hat und demnach auch wichtig für das Verbindungssystem ist. Denn, umso größer die Anzahl der Module die verbunden werden können, umso flexibler ist der Roboter in Bezug auf die Anwendungsmöglichkeiten. Die Steifigkeit und die damit einhergehende Verformung sind wesentliche Faktoren für die Präzision eines MRMM. Damit mehrere Module eine stabile Plattform bilden können ist ein steifes Verbindungssystem eine Grundvoraussetzung. Vor allem bei Robotersystemen mit einer größeren Anzahl von Modulen können geringe Steifigkeiten einen negativen Einfluss auf die Funktion des Systems haben. Das spiegelt sich auch in der Gewichtung wider, wo die Steifigkeit mit 17,1% am zweithöchsten bewertet wurde. Aber auch die Bedienbarkeit des Verbindungssystems ist mit 14,3% ein wichtiges Kriterium. Denn bei jedem Rekonfigurationsvorgang müssen, je nach Größe des gewünschten Robotersystems, mehrere Kopplungs- und Entkopplungsvorgänge durchgeführt werden. Aufwand (12,9%), Bauraum und Kosten (jeweils 11,4%) können auch nicht vernachlässigt werden, haben aber eine geringere Priorität als die Modularität, Steifigkeit und Bedienbarkeit. Die Bewertungskriterien Eigengewicht, Wiederverwertung und Abdichtung haben die geringste Gewichtung, da vor allem die Funktion des Verbindungssystems im Vordergrund steht.

5.2 Nutzwertanalyse

Die Nutzwertanalyse [9] ist eine einfache Methode für die Entscheidungsfindung, wenn mehrere Alternativen vorliegen. Anhand von den gewichteten Bewertungskriterien aus

dem Kapitel 5.1 werden alle Konzepte beurteilt. Je nach Zutreffen auf das Konzept wird dem Kriterium ein Wert von 0 – 10 zugeordnet. Wobei 0 für „*nichtzutreffend*“ und 10 für „*sehr zutreffend*“ steht. Anschließend werden diese Werte mit der Gewichtung multipliziert. Die Summe dieser gewichteten Werte ergibt ein Ergebnis für jedes Konzept, womit sie dann verglichen werden können. Das Konzept mit dem höchsten Wert erfüllt die gewichteten Bewertungskriterien am besten. In der Tabelle 14 ist die Nutzwertanalyse übersichtlich dargestellt. Wie die Bewertungen zustande kommen, wird im Folgenden näher beschrieben.

Kriterium	Gew.	Konzept M4Z		Konzept M5Z		Konzept MEB		Konzept ELB	
		Wert	gew. Wert						
Modularität	20,00%	6	1,20	6	1,20	10	2,00	10	2,00
Bauraum	11,43%	10	1,14	3	0,34	6	0,69	6	0,69
Kosten	11,43%	8	0,91	6	0,69	4	0,46	5	0,57
Steifigkeit	17,14%	8	1,37	10	1,71	8	1,37	8	1,37
Eigengewicht	5,71%	9	0,51	4	0,23	6	0,34	3	0,17
Bedienbarkeit	14,29%	6	0,86	7	1,00	10	1,43	9	1,29
Wiederverwertung	5,71%	8	0,46	8	0,46	5	0,29	5	0,29
Abdichtung	1,43%	5	0,07	5	0,07	6	0,09	6	0,09
Aufwand	12,86%	9	1,16	7	0,90	6	0,77	5	0,64
Summe	100,00%	69	7,69	56	6,60	61	7,43	57	7,10

Tabelle 14: Nutzwertanalyse für die Konzeptevaluierung

Die Modularität ist beim Konzept M4Z und M5Z eingeschränkt, da für eine Entkopplung mindestens eine Seite zugänglich sein muss. Demnach kann eine Plattform mit maximal zwei vollständigen Ebenen konfiguriert werden, was zu einer niedrigen Bewertung von 6 bei diesem Kriterium führt. Bei den Konzepten mit der elektrischen Betätigung für die Entkopplung können auch Module ohne freie Zugänglichkeit, mit einer kabellosen Verbindung betätigt werden und sind somit nicht eingeschränkt bezüglich ihrer Modularität. Deswegen haben die beiden Konzepte MEB und ELB hier die maximale Punktezahl.

Der Elektromotor und das Getriebe der beiden elektrischen Konzepte benötigen viel Platz und haben deswegen einen negativen Einfluss auf den Bauraum, was zu einer Bewertung von 6 führt. Nur das Konzept M5Z ist hier mit 3 noch niedriger bewertet. Der Grund dafür ist, dass der Zugang für den Entkopplungsmechanismus mit einem Werkzeug auf allen fünf Seiten des würfelförmigen Moduls entsprechend viel Platz benötigt. Das Konzept M4Z hingegen kommt ohne Motor und Getriebe aus und die Zugänge sind nur auf vier Seiten. Dadurch kann der Entkopplungsmechanismus platzsparender aufgebaut werden und der gesamte Bauraum im Modul für Roboterkomponenten verwendet werden. Deswegen wurde Konzept M4Z bezüglich des Kriteriums für den Bauraum die volle Punkteanzahl gegeben.

Bei den Kosten schneidet wieder das Konzept M4Z am besten ab. Das liegt an den zusätzlichen Bauteilen, die bei den anderen Konzepten benötigt werden. Neben den Elektromotoren sind vor allem Zahnräder teuer in der Herstellung. Doch auch die Bauteile für den Bowdenzug stellen einen zusätzlichen Kostenfaktor dar.

Den größten Einfluss auf die Steifigkeit haben die verwendeten Materialien und die Verbindungsart. Das Konzept M5Z unterscheidet sich von den anderen beiden S&B-Verbindungen durch die Verwendung von Stahl statt Aluminium, was naturgemäß zu höheren Steifigkeiten führt. Dieses Konzept erhält somit die volle Punktezahl. Die Formanpassungsverbindung wird wegen dem Kraftfluss über die Profile schlechter eingeschätzt, was aber durch die Verwendung von Stahl wieder ausgeglichen werden kann.

Das Eigengewicht des Verbindungssystems hängt zum einen von der Anzahl der Bauteile ab und zum anderen von deren Masse. Somit spielt auch hier das Material eine wesentliche Rolle. Das Konzept M4Z ist aus Aluminium gefertigt und schneidet deshalb hier am besten ab. Beim Konzept MEB wird zwar auch mit Aluminium gearbeitet, aber der Elektromotor bedeutet ein zusätzliches Gewicht, was die Punktezahl hier auf 6 hinunter drückt. Das Konzept ELB hat auch einen Elektromotor verbaut und ist aus Stahl gefertigt, weswegen hier die geringste Punkteanzahl bei diesem Kriterium vergeben wird.

Das Konzept MEB erhält die volle Punktezahl bei der Bedienbarkeit, da die Kopplung durch einfaches Zusammenführen ohne zusätzliche Betätigung funktioniert. Dies wäre zwar auch bei den beiden mechanischen Konzepten M4Z und M5Z der Fall, jedoch muss hier die Entkopplung manuell mit einem Werkzeug durchgeführt werden. Bei den elektrischen Konzepten MEB und ELB funktioniert die Entkopplung elektrisch mittels Steuerung über eine App am Smartphone, Tablet oder PC. Dem Konzept ELB wurde aufgrund der notwendigen Betätigung beim Kopplungsvorgang ein Punkt abgezogen.

Bei dem Bewertungskriterium „Wiederverwertung“ haben die Elektromotoren der beiden elektrischen Konzepten MEB und ELB einen schlechten Einfluss, weshalb diese hier eine niedrigere Punktezahl erhalten. Anders sieht es bei der Abdichtung aus. Durch die notwendigen Zugänge für die manuelle Betätigung des Entkopplungsvorgangs bei den mechanischen Konzepten, schneiden diese hier schlechter ab. In Summe bekommt aber bei diesem Kriterium kein Konzept mehr als 6 Punkte, da lediglich die Mindestanforderung (Verhinderung vom Zugang mit Fingern) von allen Konzepten erfüllt wird.

Beim Aufwand fließt sowohl der Fertigungs- als auch der Entwicklungsaufwand gleichermaßen ein. Die Profile des Konzepts ELB haben einen hohen Fertigungsaufwand und darüber hinaus wird bei diesem Konzept eine Ansteuerung über eine App benötigt, was einen zusätzlichen Entwicklungsaufwand darstellt.

Deswegen wird dieses Konzept hier am schlechtesten bewertet. Das Konzept M4Z wird hingegen am besten bewertet. Zum einen aufgrund der geringen Bauteilanzahl und zum anderen wegen der Einfachheit der Bauteile.

Wie in der Tabelle 14 zu sehen ist, schneidet das Konzept M4Z mit einem summierten und gewichteten Wert von 7,69 am besten ab. Dieses Konzept konnte durch einen simplen Aufbau punkten. Das elektrische Konzept MEB zeichnet sich durch die gute Bedienbarkeit und Modularität aus und ist mit einem Wert von 7,43 an zweiter Stelle. Das Konzept ELB folgt an dritter Stelle und das zweite mechanische Konzept hat durch den komplexen Entkopplungsmechanismus am wenigsten Punkte erhalten. Infolgedessen wird im weiteren Verlauf dieser Arbeit das Konzept M4Z im Detail ausgearbeitet.

6 Design und Analyse

Nachdem das Konzept ermittelt wurde, welches den Anforderungen am besten entspricht, kann in diesem Kapitel mit der weiteren Ausarbeitung fortgefahren werden. Die Vorgehensweise kann der Abbildung 28 entnommen werden. Zuerst wurde das Konzept soweit ausgearbeitet, dass die Geometrie der Bauteile eine erste FE-Analyse ermöglichen. Wie in Kapitel 6.2 beschrieben ist, wurde von all jenen Bauteilen eine Festigkeitsanalyse durchgeführt, bei denen eine Belastung durch äußere Krafteinwirkung oder durch die Federvorspannung einwirkt. Sobald die Spannungen in einem zulässigen Rahmen waren, konnte mit der Detailausarbeitung fortgefahren werden. Entsprachen sie jedoch nicht den zulässigen Festigkeitsanforderungen, mussten die Bauteile überarbeitet werden und anschließend erneut eine FE-Analyse durchgeführt werden. Um das Ergebnis der Detailausarbeitung auch hinsichtlich der Festigkeit zu analysieren wurde am Ende erneut eine FE-Analyse durchgeführt.

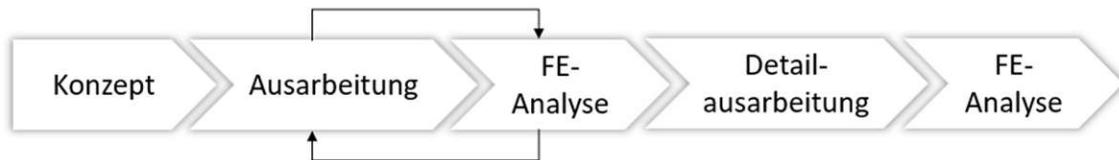


Abbildung 28: Vorgehensweise vom Konzept bis zur Detailausarbeitung

Auf die Zwischenergebnisse der groben Bauteilausarbeitung wurde aus Gründen der Übersichtlichkeit in dieser Arbeit verzichtet. Stattdessen wird im Folgenden direkt das Ergebnis der Detailausarbeitung vorgestellt. Dabei wird sowohl auf das Material, die Funktions- und Wirkstruktur als auch auf den Kopplungs- und Entkopplungsmechanismus eingegangen. Außerdem wird der Mechanismus für die elektronische Verbindung erklärt und die einzelnen Stecker beschrieben. Im Anschluss daran werden die Ergebnisse der FE-Analyse von den am stärksten belasteten Bauteilen der Detailausarbeitung gezeigt und beschrieben.

6.1 Detailausarbeitung des Konzepts M4Z

Im folgenden Abschnitt wird zuerst das gesamte Verbindungssystem gezeigt und auf die wichtigsten Funktionsteile näher eingegangen. Im weiteren Verlauf wird dann das Steckersystem beschrieben und dessen Funktionsweise erklärt. Abschließend werden die Mechanismen für die Kopplung und Entkopplung erläutert. Die 3D-Konstruktion erfolgte mit der CAD-Software Catia in der Version V5-6R2020.

6.1.1 Verbindungssystem

Das entwickelte Verbindungssystem für einen MRMM ist dreiteilig und besteht aus einem symmetrischen mechanischen Teil und aus einer männlichen, sowie einer

weiblichen Steckersystemhälfte. Wie in der Abbildung 29 und Abbildung 30 zu sehen ist, sitzen die Steckersysteme jeweils in einem mechanischen Teil und beinhalten die Komponenten für die elektrische Verbindung. In Kapitel 6.1.2 wird diese Baugruppe genauer beschrieben.

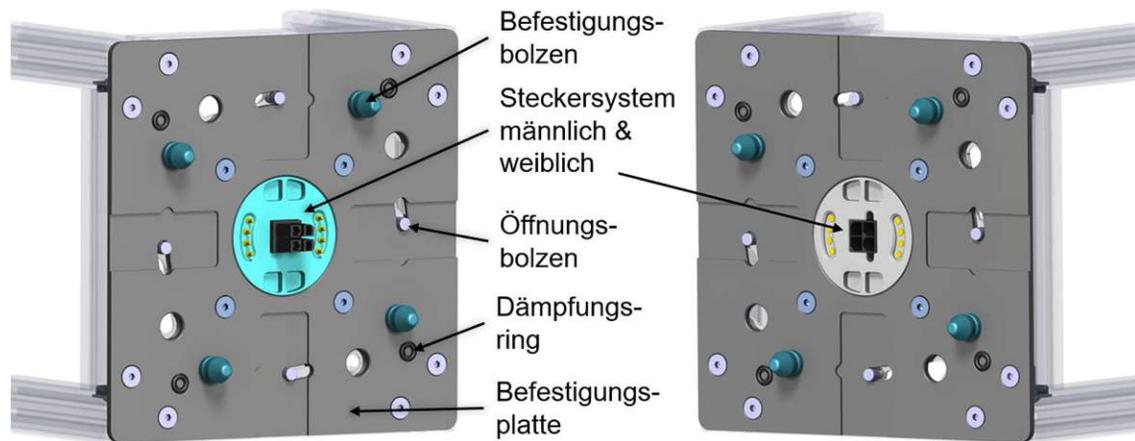


Abbildung 29: Vorderseite der Systemhälften (links: männlich und rechts: weiblich)

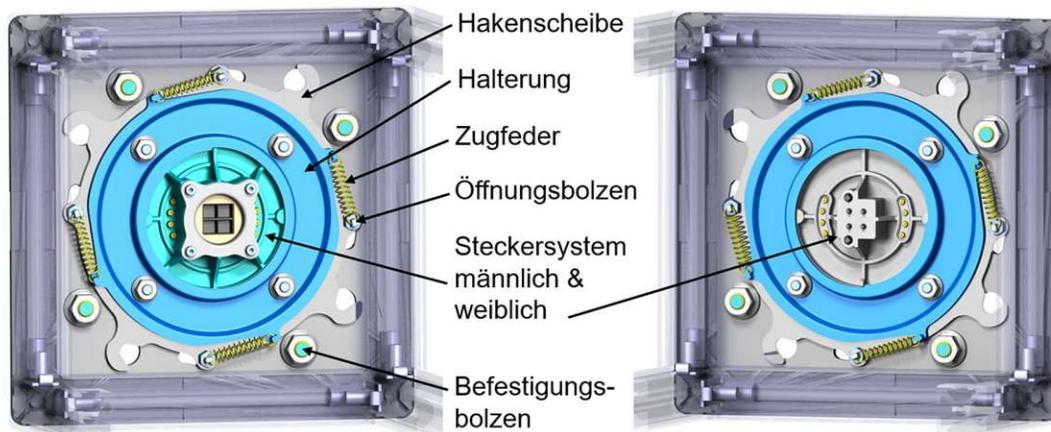


Abbildung 30: Rückseite der Systemhälften (links: männlich und rechts: weiblich)

Die Befestigungsplatte hat mehrere Bohrungen und Nuten und bildet die Basis des Verbindungssystems. In ihr sind einerseits alle Bauteile befestigt und andererseits ist sie mit dem Rahmen der Module verschraubt. Die Befestigungsplatte dient also nicht nur als Träger, sondern sie leitet auch die aufkommenden Kräfte in den Modulrahmen weiter. Die mechanischen Anforderungen an das Material sind eine hinreichend hohe Dehngrenze und eine gute Zerspanbarkeit für eine entsprechende Bearbeitung der Bauteile.

In Tabelle 15 sind Aluminiumlegierungen, die eine gute Zerspanbarkeit [44] und eine Dehngrenze über 100 N/mm^2 aufweisen, angeführt. Wobei sich die Tabelle auf die mechanischen Eigenschaften von Aluminiumlegierungen in Form von Bändern, Blechen und Platten bezieht (DIN EN 485-2 [45]) und die Streckgrenze je nach

Werkstoffzustand und Nenndicke variiert. Für die mechanischen Eigenschaften von gezogenen Stangen und Rohren gibt es die Norm DIN EN 754-2 [46] und jene von stranggepressten Stangen, Rohren und Profilen sind in der DIN EN 755-2 [47] angeführt. Außerdem beinhaltet die Tabelle 15 nur jene Werkstoffe, die sowohl als Platten, als auch in Form von Stangen verfügbar sind. Zinklegierungen (7000er-Reihe) wurden nicht betrachtet, da deren Eigenschaften für diese Anwendung unverhältnismäßig gut sind und somit entsprechend hohe Kosten verursachen würden. Ausgewählt wurde die Aluminiumlegierung EN AW-5083, weil sie die Anforderungen sowohl hinsichtlich der Festigkeit (Tabelle 3, Nr. 5 – 7) als auch der Verfügbarkeit bei Lieferanten (Tabelle 3, Nr. 21) ausreichend gut erfüllt.

EN-Bezeichnung	Name	Dehngrenze in MPa
EN AW-2014A	Al Cu4SiMg(A)	110 – 460
EN AW-2017A	Al Cu4MgSi(A)	145 – 260
EN AW-2024	Al Cu4Mg1	140 – 460
EN AW-5083	Al Mg4,5Mn0,7	115 – 300

Tabelle 15: Übersicht über relevante Aluminiumlegierungen [45]

Jeweils vier idente Befestigungsbolzen, ebenfalls aus dem Werkstoff EN AW-5083 gefertigt, sind mit der Befestigungsplatte fest verschraubt. Sie stellen die Verbindung zum gekoppelten Modul her und sind konisch ausgeführt. Dadurch wird beim Zusammenführen der Verbindungshälften, die Hakenscheibe der gegenüberliegenden Seite verdreht und anschließend in eine am Umfang des Bolzens verlaufende Nut eingerastet. Darüber hinaus hat die konische Form den Vorteil, dass ein Ausrichtungsfehler toleriert wird und so der Kopplungsvorgang erleichtert wird.

Die Hakenscheibe ist in der Abbildung 30 gut zu sehen. Auch sie besteht aus der Aluminiumlegierung EN AW-5083 und ist ein wesentlicher Bauteil für den Kopplungsvorgang. Die 2 mm dicke Scheibe hat vier am Umfang gleichmäßig verteilte Haken, deren Öffnungsdurchmesser geringfügig kleiner ist als der Bohrungsdurchmesser in der Befestigungsplatte aber etwas größer als der Nutdurchmesser der Befestigungsbolzen. Dadurch können die Befestigungsbolzen darin einhaken. Die Hakenscheibe ist über einer am Öffnungsbolzen befestigten Zugfeder mit der rahmenfesten Halterung vorgespannt und frei drehbar in der Halterung gelagert, welche ebenfalls aus der Aluminiumlegierung EN AW-5083 besteht.

Die Abbildung 31 zeigt das Verhalten der Zugfedern bei der Öffnung der Hakenscheibe. Durch die vier Zugfedern und deren Federrate von $0,49 \text{ N/mm}$ wird ein Vorspannungsmoment von $0,9 \text{ Nm}$ (in geschlossener Stellung) bis $1,4 \text{ Nm}$ (in geöffneter Stellung) erzeugt. Wie im Diagramm (Abbildung 31 b)) nur schwer zu erkennen ist, verhält sich der Verlauf jedoch nicht linear. Der Grund dafür liegt in dem

abnehmenden Normalabstand (r_F) bei einer Verdrehung der Hakenscheibe und dadurch Vergrößerung der Federlänge. Die Änderung des Normalabstands ist in der Abbildung 31 a)) gut zu erkennen, wobei die strichlierte Hakenscheibe die geöffnete Stellung darstellt.

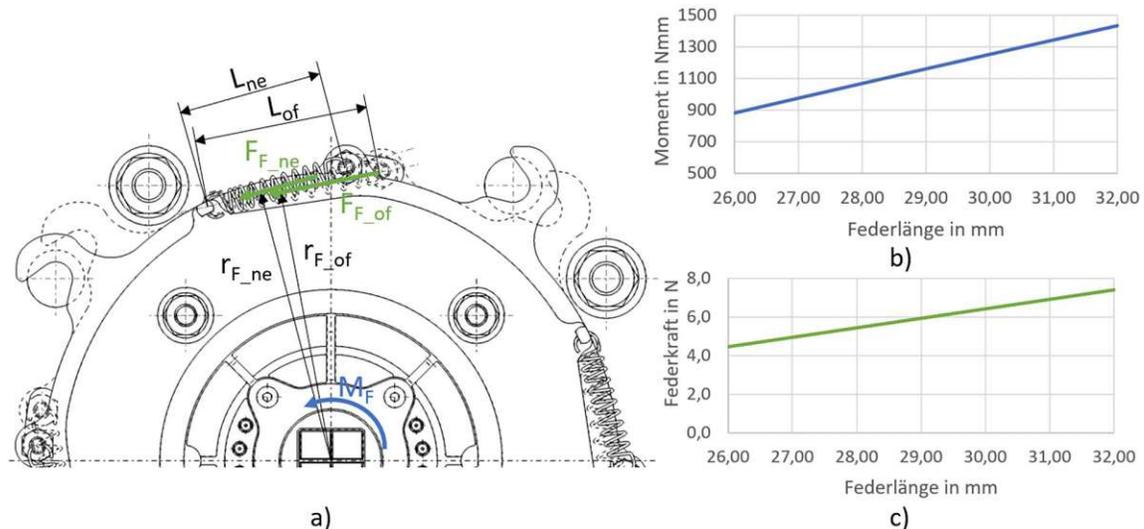


Abbildung 31: Skizze für Zugfederberechnung (a) und Verlauf des Vorspannungsmoments (b) sowie der Federkraft (c)

- L_{ne} ... Länge der Feder in neutraler Stellung der Hakenscheibe
- L_{of} ... Länge der Zugfeder in offener Stellung der Hakenscheibe
- r_F ... Normalabstand der Zugfeder in neutraler bis offener Stellung der Hakenscheibe
- F_F ... Zugfederkraft
- M_F ... Vorspannungsmoment aufgrund der vier Zugfedern

Die Öffnungsbolzen sind direkt mit der Hakenscheibe verbunden und auch aus der Aluminiumlegierung EN AW-5083. Sie ragen durch die Befestigungsplatte nach außen und stellen zentrale Komponenten für den Entkopplungsmechanismus dar, welcher in Kapitel 6.1.3 genauer beschrieben wird. In der Abbildung 29 sind auch die Dämpfungsringe zu sehen. Die handelsüblichen O-Ringe aus Nitril Kautschuk (NBR) sind an vier Positionen in ringförmigen Nuten in die Befestigungsplatte eingelegt. Durch sie soll eine Geräusentwicklung aufgrund von Vibrationen der Befestigungsplatten bei Bewegungen des MRMM verhindert werden.

6.1.2 Steckersystem

Das Steckersystem bildet die Verbindung für die Übertragung von Informationen und Energie. Es gibt ein männliches (Abbildung 32 links) und ein weibliches (Abbildung 32 rechts) Steckersystem. Die beiden sind untereinander substituierbar und sitzen jeweils drehbar um die Rollachse zwischen Befestigungsplatte und der Halterung des mechanischen Teils des Verbindungssystems. Ein Anschlag am Steckergehäuse und

der Halterung, verhindert eine Drehung von mehr als 270°, wodurch eine Beschädigung der angeschlossenen Kabel vermieden werden soll. Die federnden Druckstücke rasten alle 90° ein, womit dieselben vier Orientierungen wie bei der mechanischen Verbindung realisierbar sind. Die beiden Steckergehäuse fungieren als Träger für die elektrischen Steckerelemente und bestehen genauso wie der Deckel und die Steckerfassung aus einem druckbaren Kunststoff mit der Bezeichnung PETG (Polyethylenterephthalat mit Glykol modifiziert). Dieses Material besitzt eine Streckspannung von 52 MPa und ist somit bestens für diese Anwendung geeignet [48].

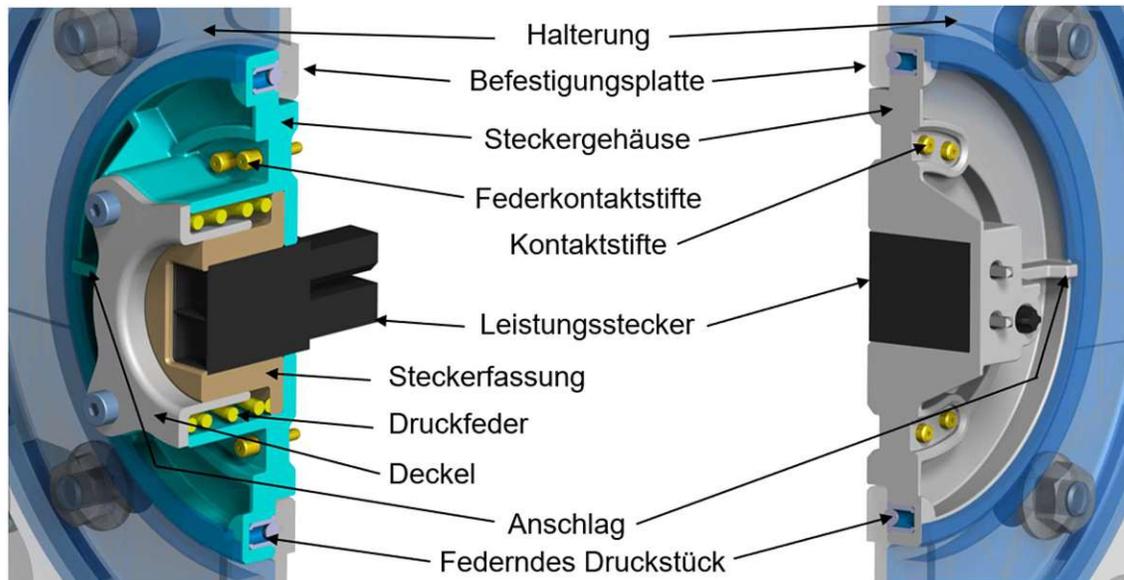


Abbildung 32: Schnittansicht der Steckersysteme (links: männlich und rechts: weiblich)

Im männlichen Steckersystem ist neben den acht Federkontaktstiften für die Informationsübertragung die männliche Ausführung eines Leistungssteckers verbaut. Dieser besitzt in Summe vier Pins und ist für Ströme von über 20 A dimensioniert. Die Anzahl und Ausführung der Federkontaktstifte ermöglicht eine Kommunikation mittels RTE (Real Time Ethernet), wie zum Beispiel EtherCat. Der Leistungsstecker ist fest mit der Steckerfassung verbunden und wird ähnlich wie bei den Federkontaktstiften mittels Druckfeder nach außen gedrückt. Mit einer Federkraft in der neutralen Position von fast 25 N wird der Stecker stets in die Buchse der anderen Verbindungshälfte gedrückt, um so eine mögliche Verbindungsunterbrechung zu verhindern. Die Vorspannungskraft der Druckfeder muss hinreichend groß sein, um die Reibungskraft beim Zusammenführen der Steckerverbindungen zu überwinden und entsprechend niedrig, damit die benötigte Kopplungskraft nicht zu groß wird (Siehe Kapitel 6.1.3). Der Kraftverlauf der Druckfeder, welcher in Abbildung 33 dargestellt ist, ergibt sich durch eine Federrate von $3,73 \text{ N/mm}$ und den entsprechenden Federlängen.

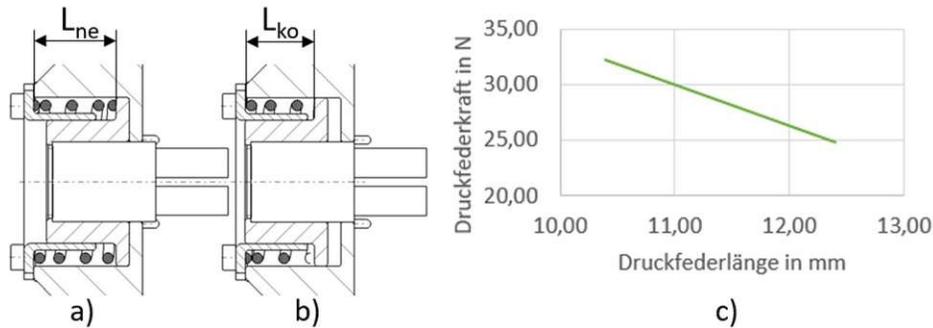


Abbildung 33: Darstellung der Druckfeder in a) neutraler Position $L_{ne} = 12,4$ mm, b) gekoppelter Position $L_{ko} = 10,4$ mm und c) der Kraftverlauf

Im weiblichen Steckersystem befinden sich acht Kontaktstifte aus Messing, die als Gegenstücke für die Federkontaktstifte dienen. Außerdem ist die weibliche Hälfte des Leistungssteckers verbaut, welche genauso wie die Kontaktstifte, fest mit dem Steckergehäuse verbunden ist. Damit auch zwei weibliche Verbindungshälften mechanisch miteinander gekoppelt werden können, ragen keine Bauteile des weiblichen Steckersystem über die Befestigungsplatte. Dies ist ein wesentliches Merkmal und ermöglicht eine deutlich flexiblere Gestaltung der Konfigurationen.

6.1.3 Kopplungsmechanismus und Konfigurationsmöglichkeiten

In diesem Abschnitt wird genauer auf den Kopplungs- und Entkopplungsmechanismus eingegangen sowie auf die Konfigurationsmöglichkeiten aber auch auf die Grenzen, die dieses Verbindungssystem mit sich bringt.

Beim Kopplungsvorgang wird kein zusätzliches Werkzeug benötigt. Durch den federvorgespannten männlichen Leistungsstecker befindet sich dieser in einer etwas erhobenen Position. Dadurch wird beim Zusammenführen der Verbindungshälften zuerst die Leistungsverbindung ineinander geführt und anschließend werden die Befestigungsbolzen in die dafür vorgesehenen Bohrungen gesteckt. Die gering überstehenden Haken der Hakenscheibe werden durch die konisch ausgeführten Bolzen zur Seite gedreht und bei weiterem Zusammendrücken der Verbindungshälften rastet die Hakenscheibe durch die Vorspannung der Zugfedern in die Nuten der Befestigungsbolzen ein. Für eine vollständige Kopplung muss also nicht nur die Vorspannung der Druckfeder überwunden werden, sondern auch die der Zugfedern. Da die Druckfeder des Leistungssteckers aber erst weiter eingedrückt wird, wenn die Hakenscheibe bereits vollständig geöffnet ist, ergibt sich die maximale Kopplungskraft nicht aus der Summe der beiden Kräfte, sondern aus dem Maximum der beiden Kraftverläufe. Diese sind in der Abbildung 34 dargestellt und demnach ergibt sich eine maximal benötigte Kopplungskraft von 32,3 N aufgrund der Druckfeder.

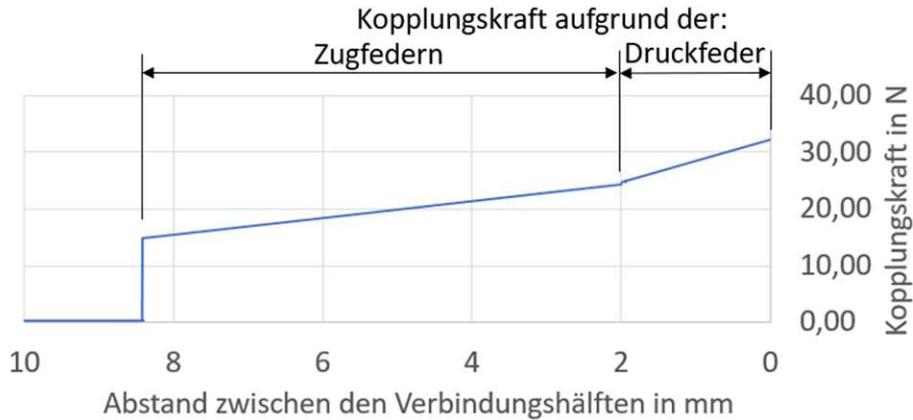
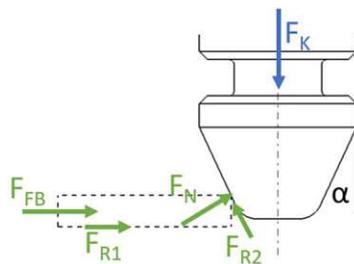


Abbildung 34: Verlauf der Kopplungskraft beim Kopplungsvorgang

Die Berechnung der Kopplungskraft aufgrund der Zugfedern erfolgt iterativ mit einem Reibkoeffizienten von 0,4 nach VDI 2230 [49] für eine reine Aluminiumpaarung und ist in der Abbildung 35 skizziert. Weiters wurde ein linearer Momentenverlauf der Hakenscheibenvorspannung angenommen, da in Kapitel 6.1.1 gezeigt wurde, dass der nichtlineare Anteil am Gesamtmoment zu vernachlässigen ist. Außerdem wurde eine vereinfachte Hakenform mit nur einem Berührungspunkt am Befestigungsbolzen angenommen.



$$F_{R1} = F_K \cdot \mu$$

$$F_{R2} = (F_{FB} + F_{R1}) \cdot \cos(\alpha) \cdot \mu$$

$$F_K = F_N \cdot \sin(\alpha) + F_{R2} \cdot \cos(\alpha)$$

Abbildung 35: Berechnung der Kopplungskraft aufgrund der Zugfedern

F_{R1} ... Reibungskraft zwischen Hakenscheibe und Befestigungsplatte

F_{R2} ... Reibungskraft zwischen Hakenscheibe und Befestigungsbolzen

F_K ... Kopplungskraft

F_N ... Normalkraft am Berührungspunkt

F_{FB} ... Vorspannkraft der Hakenscheibe aufgrund der Zugfedern

μ ... Reibungszahl

α ... Schrägungswinkel des konischen Befestigungsbolzens

S&B Verbindungen haben die Eigenschaft, dass beim Kopplungsvorgang eine oder beide Verbindungshälften eine geradlinige Bewegung in X -Koordinatenrichtung ausführen müssen, um die Stifte in die Bohrungen einzuführen. Dadurch entsteht die Notwendigkeit einer speziellen Vorgehensweise, sobald Module in mehr als einer Dimension verbunden werden sollen. Wie in Abbildung 36 zu sehen ist, werden zuerst die Reihen gebildet (Schritt 1), damit werden dann Flächen erzeugt (Schritt 2) und

diese können wiederum miteinander gekoppelt werden, um so mehrere Ebenen zu generieren (Schritt 3).

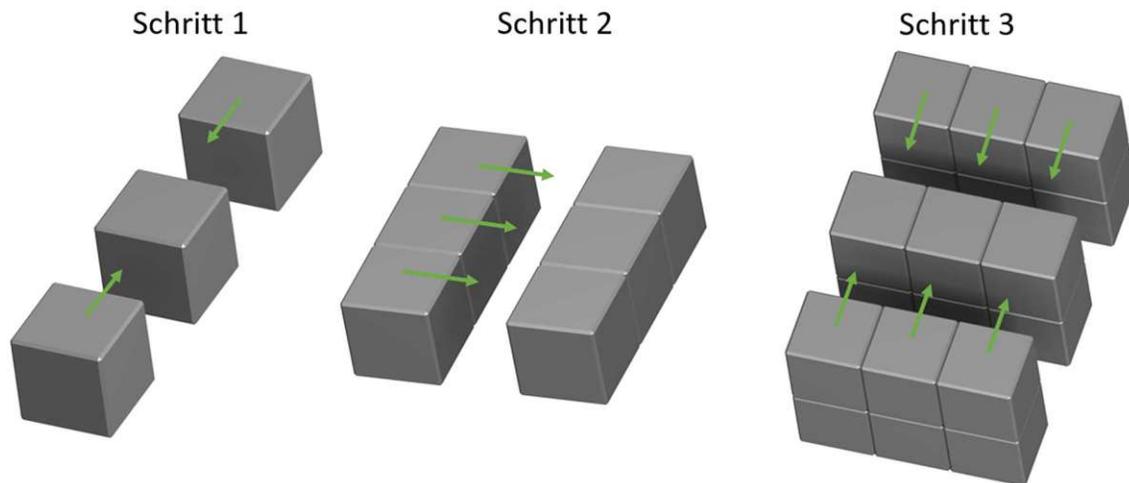


Abbildung 36: Vorgehensweise beim Zusammenbau von mehreren Modulen

Werden mehr als zwei Ebenen mit mindestens drei mal drei Modulen gekoppelt, dann dürfen die weiteren Ebenen nur mehr so viele Module aufweisen, dass keine Module versperrt werden. Andernfalls wäre eine Entkopplung nicht mehr möglich, da die Zugänge des Moduls oder der Module in der Mitte verdeckt wären. Beispiele für mögliche Konfigurationen sind in Abbildung 37 angeführt, wobei die rot eingefärbten Module frei gelassen werden müssen, um eine Entkopplung nicht zu verhindern. Da für die meisten Anwendungen maximal zwei Ebenen und auf der dritten Ebene eventuell noch ein Manipulationsarm benötigt werden, sind die Konfigurationsmöglichkeiten aber ausreichend.

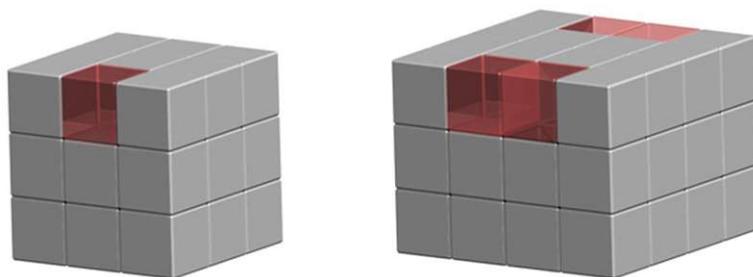


Abbildung 37: Beispiele für Konfigurationsmöglichkeiten

Der Entkopplungsmechanismus erfordert ein einfaches Werkzeug in Form einer Öffnungsplatte, wie in Abbildung 38 in Gelb dargestellt ist. Diese Öffnungsplatte wird in die dafür vorgesehene Öffnung auf einer der vier Seiten der beiden berührenden Verbindungshälften eingeschoben. Dadurch wandert die Spitze der Platte zwischen die beiden Öffnungsbolzen. Wobei jeweils ein Öffnungsbolzen mit der Hakenscheibe einer Verbindungshälfte fest verschraubt ist. Wird die Öffnungsplatte weiter eingeführt, drehen sich die Hakenscheiben so weit, bis sie die Befestigungsbolzen wieder

freigeben und die Verbindungshälften voneinander abgezogen werden können. Die spezielle Geometrie der Öffnungsplatte ermöglicht eine Arretierung ebendieser bei der offenen Stellung der Hakenscheibe. Dadurch ist keine weitere Krafteinwirkung auf die Öffnungsplatte nötig, um die Hakenscheibe offen zu halten. Infolgedessen ergibt sich der Vorteil, dass mehrere Verbindungssysteme gleichzeitig entkoppelt werden können. In der Abbildung 38 auf der linken Seite ist außerdem zu sehen, dass die Öffnungsplatte genau in die Nut der Befestigungsplatte passt und so die Module daneben entkoppelt werden können.

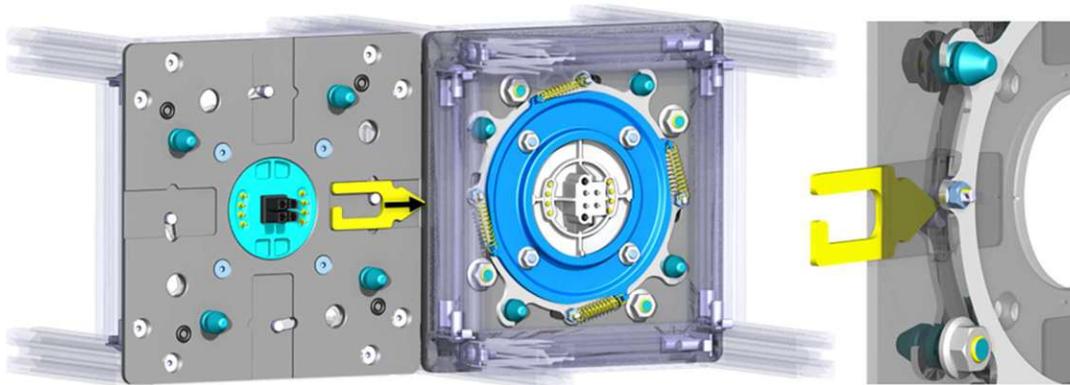


Abbildung 38: Darstellung des Entkopplungsvorgangs

6.2 Festigkeitsanalyse

Für eine bessere Beurteilung der Stabilität des Verbindungssystems, werden während des Produktentwicklungsprozesses Festigkeitsanalysen von den am höchsten beanspruchten Bauteilen durchgeführt. Wobei in der Befestigungsplatte und der Hakenscheibe die höchsten Spannungen auftreten und diese deswegen auch genauer beschrieben werden. Die Befestigungsbolzen, der Deckel, sowie das weibliche Steckergehäuse weisen geringe Spannungen auf und infolgedessen werden diese in einem Kapitel zusammengefasst und die Ergebnisse überblicksmäßig erläutert.

Mit der Finite-Elemente-Methode (FEM) können über die Steifigkeit der Struktur und den äußeren Kräften die aufkommenden Verformungen berechnet und in weiterer Folge die auftretenden Dehnungen, Spannungen und Reaktionskräfte abgeleitet werden. Da bei dieser Arbeit für die Konstruktion die CAD-Software CATIA V5 verwendet wurde, bietet sich das interne FEM-Programmmodul Generative Part Structural Analysis (GPS) an [50].

Zuerst müssen die Bauteile für die Festigkeitsberechnung vorbereitet und eine Berechnungsgeometrie aus der Konstruktionsgeometrie generiert werden. Konstruktive Geometriedetails, die für das Festigkeitsverhalten nur einen geringen Einfluss haben, werden entfernt. Damit wird eine einfachere Netzgenerierung ermöglicht und so die erforderliche Berechnungszeit gesenkt. Aus diesem Grund

werden außerdem nicht relevante Anbau- und Einbauteile ausgeblendet und die Bauteile einzeln berechnet. Weiters werden die Materialeigenschaften bestimmt und im GSA die Randbedingungen definiert [50]. Basierend auf den Belastungen des MRMM, die in der Anforderungsliste definiert wurden (siehe Kapitel 4.1), werden die äußeren Belastungen auf die Einzelteile berechnet und in das FEM-Modell eingefügt.

6.2.1 Befestigungsplatte

Für die Festigkeitsanalyse der Bauteile wird eine Standardkonfiguration definiert, mit der basierend auf den Anforderungen, die Belastungen eines einzelnen Verbindungssystems und in weiterer Folge auf die Befestigungsplatte berechnet werden können. Dabei ist zu erwähnen, dass es sich bei der Berechnung der Belastungen um eine überschlagsmäßige Berechnung handelt, welche lediglich für die Dimensionierung eines ersten Prototypen dient. Die Standardkonfiguration ist eine drei mal vier Anordnung von acht Einzelmodulen und zwei Doppelmodulen, wie in Abbildung 39 a) zu sehen ist. Die Doppelmodule besitzen jeweils eine Antriebseinheit mit einem am äußeren Ende befestigten Rad. In den anderen beiden Ecken befinden sich Module mit frei drehbaren Rädern, welche in der Mitte der Module sitzen.

Aus der Anforderungsliste geht hervor, dass eine Last von 100 kg vom MRMM getragen werden soll. Eine gleichmäßige Aufteilung der Last auf die mittleren sechs Module wird angenommen. Das Eigengewicht der Module wird mit 3 kg angenommen und muss somit auch in der Festigkeitsanalyse berücksichtigt werden. Damit können mittels einfachen Kräftegleichgewichts die Aufstandskräfte an den Rädern ermittelt werden und in weiterer Folge das Biegemoment an der Stelle der maximalen Durchbiegung, welche sich aufgrund des symmetrischen Aufbaus in der Mitte befindet. Abbildung 39 a) zeigt eine Skizze mit den Gewichtskräften (F_G), der Flächenlast (q) sowie den resultierenden Aufstandskräften (F_A). Außerdem ist in b) das berechnete Biegemoment (M_b), welches für die Ermittlung der wirkenden Zugkraft benötigt wird, eingezeichnet.

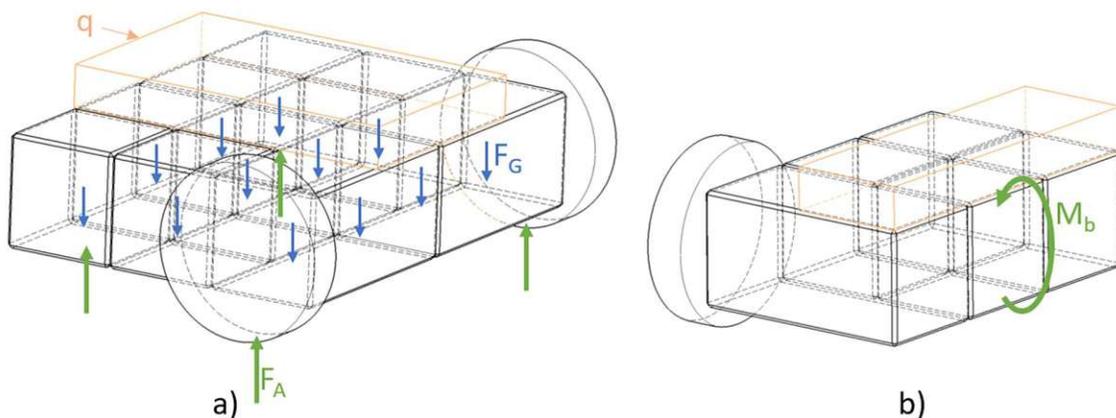


Abbildung 39: Skizzen für die Berechnung der a) Aufstandskräfte und b) Biegemoment

Aufgrund des Biegemoments wirken auf die Befestigungsbolzen in der unteren Ebene Zugkräfte, welche durch die Befestigungsplatte und die Hakenscheibe aufgenommen werden müssen. Sie wird mit der Annahme einer einfachen Flanschcupplung nach [51] berechnet. Eine passende Skizze ist in der Abbildung 40 zu sehen. Darüber hinaus erfahren die Module durch die Beschleunigung von maximal 1 m/s^2 eine zusätzliche Belastung in Zugrichtung. Mit der vorhandenen Spannung σ_3 ergibt sich in Summe eine maximale Zugkraft in Richtung der Koordinatenachse X von jeweils $F_3 = 131,2 \text{ N}$ an den zwei am stärksten beanspruchten Befestigungsbolzen mit dem Abstand a_3 .

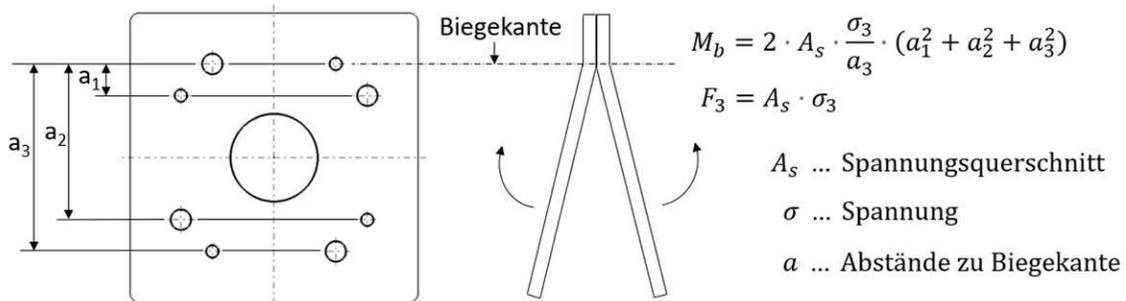


Abbildung 40: Skizze mit Formel für die Berechnung der Zugkraft aufgrund des Biegemoments [51]

Für die Berechnung der Querkräfte wird ein Kräftegleichgewicht an einem einzelnen Modul aufgestellt. Dabei wird jenes Modul gewählt, an dem eine Flächenlast wirkt. Mit dem Eigengewicht des Moduls ergeben sich so die Querkräfte pro Befestigungsbolzen von $12,1 \text{ N}$. Die Randbedingungen ergeben sich aus den Verschraubungen der Befestigungsplatte im Rahmen des Moduls und werden im Berechnungsmodell als feste Einspannungen definiert. Von Welsch [52] werden Netzelementgrößen im Bereich der Homogenisierungsgrenze von $0,5$ bis 1 mm empfohlen. Deshalb wird eine globale Netzgröße von 1 mm gewählt und gleichzeitig lokale Netzgrößen von $0,5 \text{ mm}$ in Bereichen von hohen Spannungen, sowie in Krafterleitungsbereichen und Einspannungsstellen eingestellt.

In der Abbildung 41 ist der Verlauf der von-Mises-Vergleichsspannungen dargestellt. Zu sehen sind Spannungserhöhungen im Bereich der Bohrungen, wo die Platte am Rahmen befestigt ist. Hier befindet sich auch der Maximalwert, welcher genau am Übergang von der kegeligen Fläche zur Stirnfläche liegt (siehe Abbildung 41 b)). Nach genauerer Untersuchung dieses Bereichs ist ein steiler Abfall der Spannungen zu erkennen. Wie in Abbildung 41 c) zu sehen ist, fällt der Wert innerhalb von zwei Netzelementen von 224 MPa auf etwa 100 MPa ab, was auf eine Singularität hindeutet. Generell wird von Welsch [52] beschrieben, dass es aus bruchmechanischen Überlegungen nicht sinnvoll sei, die maximalen Spannungswerte der FE-Analyse für einen spannungsmechanischen Festigkeitsnachweis zu verwenden. Stattdessen werden jene Spannungswerte in einem Abstand vom 1 bis 5-fachen der Elementgröße zum maximalen Spannungswert empfohlen. Dies gilt jedoch nur unter der Voraussetzung, dass die Netzfeinheit an die Homogenisierungsgrenze

angepasst wurde. Um einen aussagekräftigen Spannungswert für den Festigkeitsnachweis zu erhalten, werden deshalb zehn Spannungen von Knotenpunkten in einem 1 bis 5-fachen Elementabstand zum Maximalwert gewählt und davon der Mittelwert berechnet. Infolgedessen ergibt sich eine Spannung von 73 MPa und bezogen auf die Streckgrenze der Aluminiumlegierung mit der Materialkennzeichnung EN AW-5083 (Siehe Tabelle 15) eine Sicherheit von 1,51.

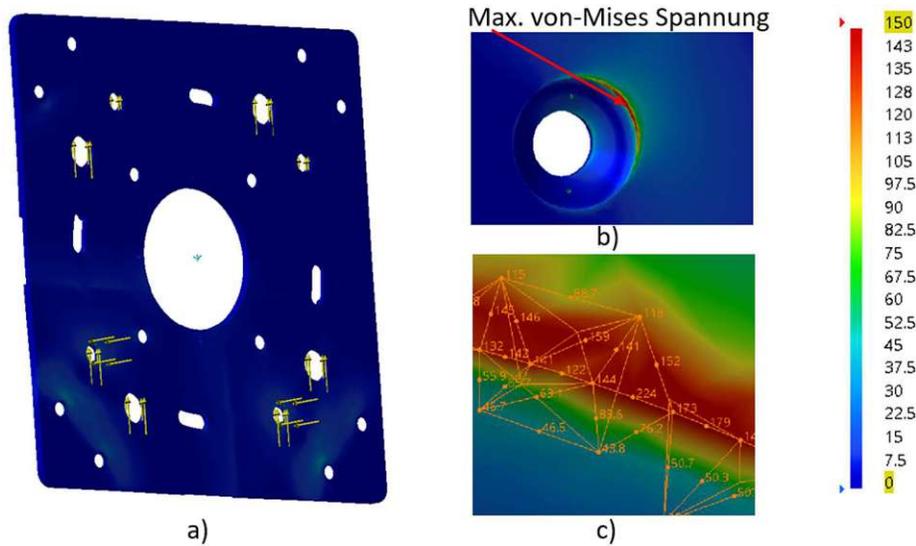


Abbildung 41: Verlauf der von-Mises Spannungen a) der Befestigungsplatte b) im Bereich der max. Spannung und c) genauere Untersuchung der max. Spannung

Die maximale Verformungsamplitude befindet sich wie erwartet im Bereich der mittleren Bohrung und ist mit einer Größe von 0,1 mm im zulässigen Rahmen.

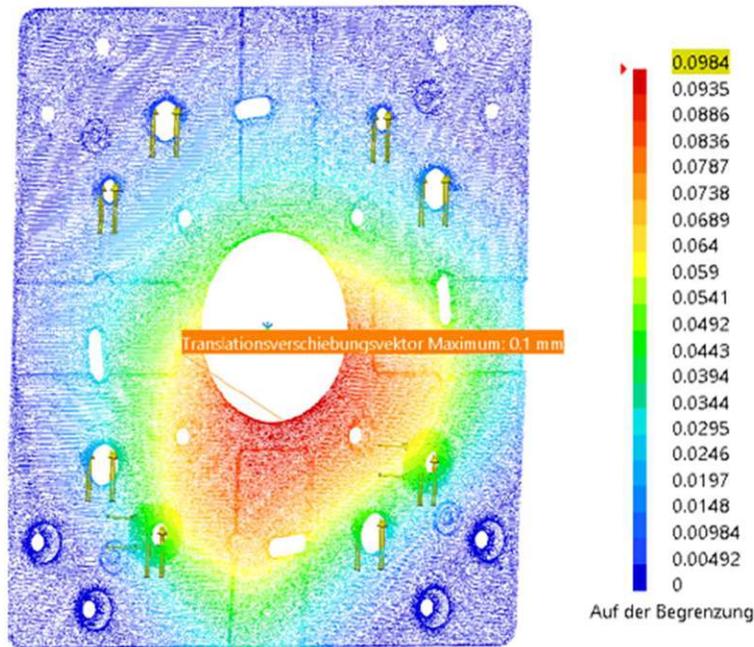


Abbildung 42: Verformungen an der Befestigungsplatte

6.2.2 Hakenscheibe

Die Hakenscheibe ist ebenfalls mit der oben beschriebenen Zugkraft über die Befestigungsbolzen belastet und besteht aus der Aluminiumlegierung mit der Materialkennzeichnung EN AW-5083. Dabei ist der Krafteinleitungsbereich jene Fläche, wo der Befestigungsbolzen die Hakenscheibe in die Bohrung der Befestigungsplatte zieht. Als Randbedingungen hingegen wurde die Fläche, wo die Hakenscheibe auf der Befestigungsplatte aufliegt, gewählt und als feste Einspannung definiert. Die Netzfeinheit wurde ähnlich bestimmt wie in Kapitel 6.2.1, nur wurden die lokalen Netzelemente ausschließlich bei den Krafteinleitungsbereichen und mit einer Größe von 0,1 mm auch deutlich feiner definiert.

Der Verlauf der von-Mises-Vergleichsspannungen ist in der Abbildung 43 zu sehen. Wie schon bei der Befestigungsplatte, entstehen auch hier an den Kanten Singularitäten, welche die berechneten maximalen Spannungswerte unbrauchbar machen. Deswegen wird ebenso der Durchschnitt von 10 Werten mit einem Abstand vom 1 bis 5-fachen der Elementgröße berechnet. Auf diese Weise ergibt sich eine Spannung von 61 MPa und in weiterer Folge eine Sicherheit von 1,8.

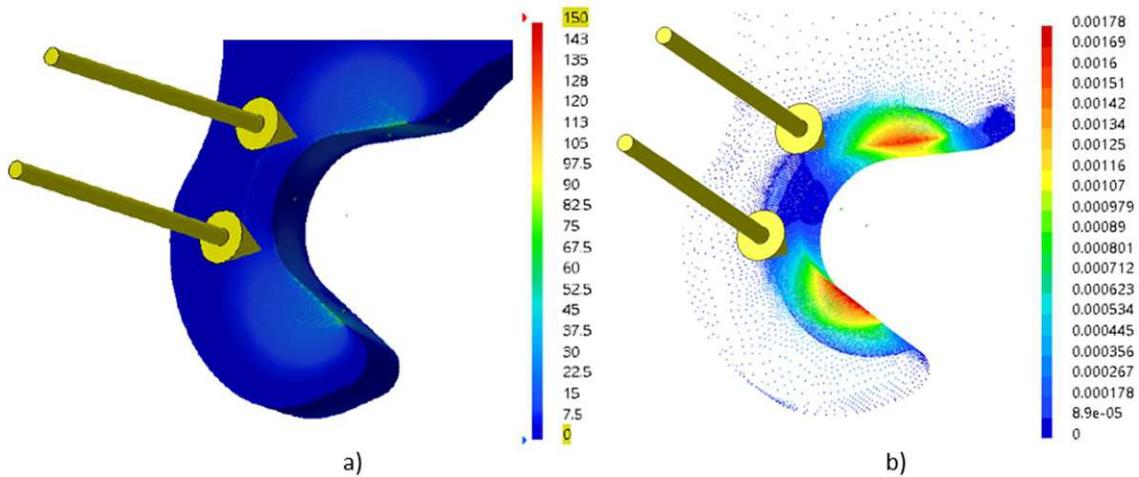


Abbildung 43: Spannungsverlauf der Hakenscheibe

Der Verlauf der Translationen eines Hakens ist in der Abbildung 43 b) dargestellt. Da nur ein sehr kleiner Bereich verformt wird, sind auch die Verschiebungen mit maximal 0,002 mm vernachlässigbar.

6.2.3 Gering beanspruchte Bauteile

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der Festigkeitsanalysen des Befestigungsbolzens, des Deckels und des weiblichen Steckergehäuses dargestellt. Wie bereits erwähnt, verursachen die aufkommenden Belastungen bei den genannten Teilen nur geringe Spannungen, weswegen hier nur eine kurze Beschreibung folgt.

Die Befestigungsbolzen sind mit der Zugkraft belastet, wie in Kapitel 6.2.1 beschrieben. In Abbildung 44 sind die daraus resultierenden Spannungsverläufe und Verformungen dargestellt. Die maximale Spannung beträgt 30,7 MPa und befindet sich wie erwartet am Übergang der belasteten Fläche zur zylindrischen Fläche der Nut. Die maximale Verschiebung befindet sich auf der Spitze des Bolzens und dessen Betrag liegt unter 0,002 mm und ist somit vernachlässigbar.

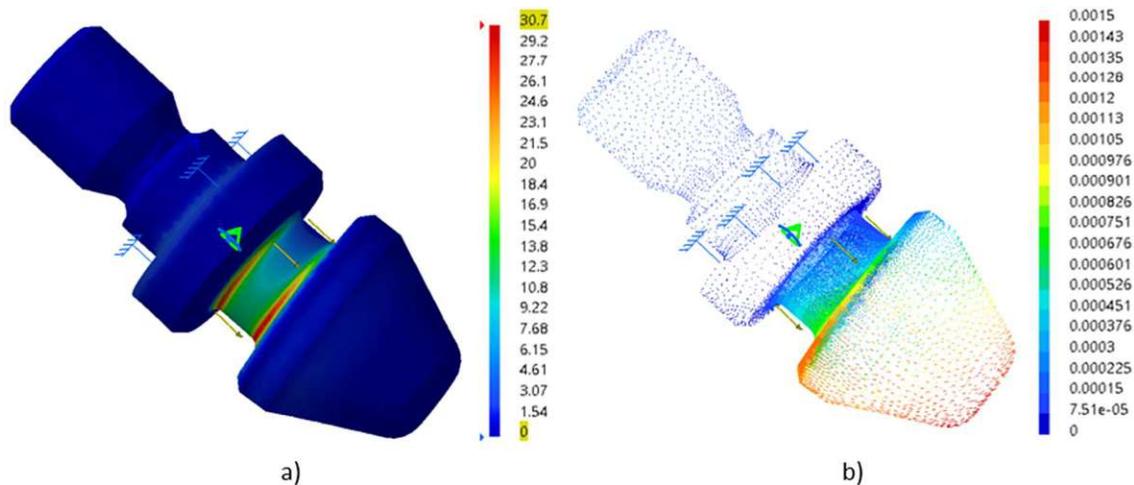


Abbildung 44: Verläufe der a) von-Mises Vergleichsspannungen und b) Verschiebungen des Befestigungsbolzens

Der Deckel ist im Steckersystem verbaut und fixiert die Druckfeder im Steckergehäuse. Dabei wird der Deckel durch die Kraft der Feder belastet und dementsprechend verformt. Für die Analyse wurde die maximale Druckfederkraft von 32,7 N (siehe Abbildung 33) verwendet und auf die halbe Ringfläche im Bereich des Deckel-Feder-Kontakts aufgetragen. Wie in der Abbildung 45 zu sehen ist, ergeben sich daraus leicht erhöhte Spannungen im Bereich der Krafteinleitung und der Bohrungen. Die maximale Spannung befindet sich genau am Übergang der Fläche, welche für die Randbedingung als feste Einspannung definiert wurde. Dabei resultiert dasselbe Szenario wie bei der Befestigungsplatte und der Hakenscheibe, weswegen auch hier der Spannungswert für den Festigkeitsnachweis mittels Durchschnitts von zehn Knotenwerten in der direkten Umgebung ermittelt wird. Und infolgedessen ergibt sich eine maximale von-Mises Spannung von 12,5 MPa. Wie in Kapitel 6.1.2 beschrieben ist, wird für dieses Teil der Kunststoff PETG verwendet, welcher eine Streckspannung von 52 MPa aufweist [48]. Dadurch ergibt sich eine Sicherheit von über 4. Der Verlauf der Verformungen ist in Abbildung 45 b) zu sehen und ist mit einem maximalen Wert von 0,12 mm als akzeptabel einzuordnen. Denn die Bauteile im Steckersystem haben keinen Einfluss auf die Steifigkeit der gesamten Roboterstruktur.

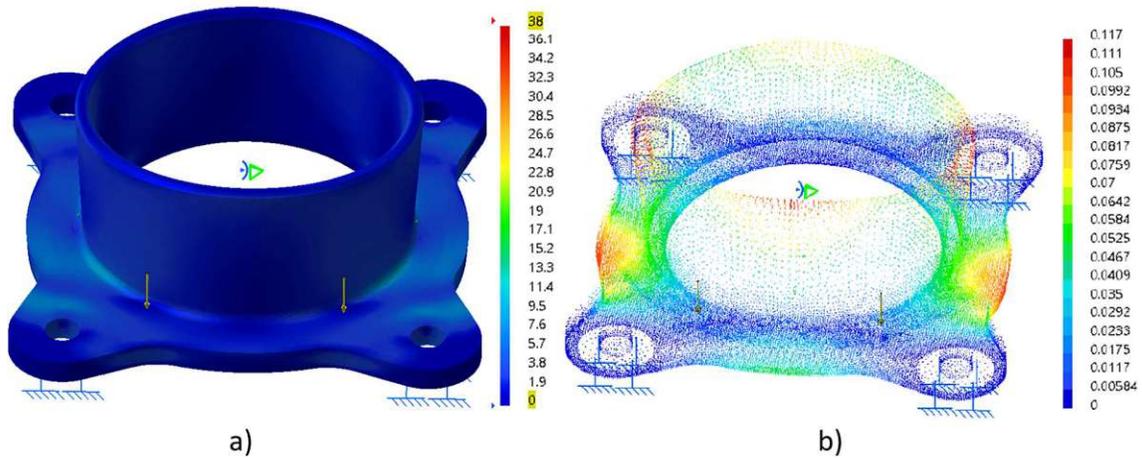


Abbildung 45: Verläufe der a) von-Mises Vergleichsspannungen und b) Verschiebungen des Deckels

Das weibliche Steckergehäuse wird über die beiden Leistungsstecker ebenfalls mit der Kraft der Druckfeder (siehe Kapitel 6.1.2) belastet. Das Gehäuse stützt sich dabei am äußeren Rand in der Aluminiumhalterung ab. Der Spannungs- und Verformungsverlauf ist in der Abbildung 46 zu sehen. Erhöhte Spannungen ergeben sich demnach vor allem im Bereich des Krafteingriffs und der festen Einspannung. Die maximale Spannung ergibt sich zu 9,6 MPa und ist somit, aufgrund des verwendeten Kunststoffs mit der Bezeichnung PETG, wie erwartet kein festigkeitstechnisch kritischer Bauteil. Die Verschiebungen halten sich auch in Grenzen und liegen im Bereich bis maximal 0,04 mm.

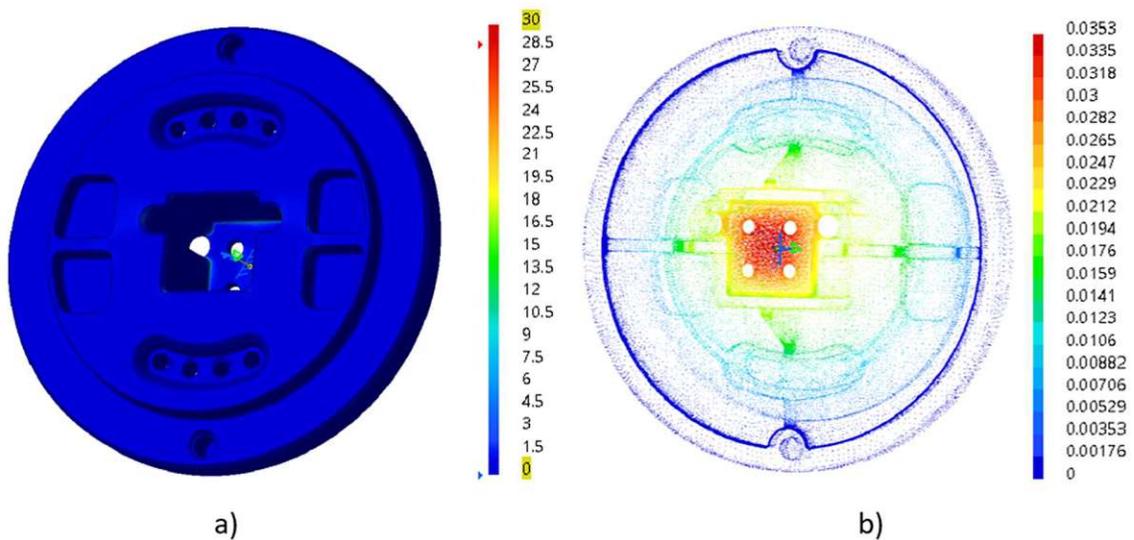


Abbildung 46: Verläufe der a) von-Mises Vergleichsspannungen und b) Verschiebungen des weiblichen Steckergehäuses

7 Prototyp

Ein Prototyp bezeichnet sämtliche Varianten von Produktkonzepten und -modellen, die zur Demonstration der Funktionalität und/oder des Designs eines in der Entwicklung befindlichen Produkts genutzt werden können. Diesbezüglich können sowohl physische Modelle des Lösungskonzepts, als auch virtuelle Modelle in Betracht gezogen werden. Wobei für physische Modelle auch ein bereits existierendes Produkt, bei dem eine Teillösung bereits integriert wurde, genutzt werden kann. Der große Vorteil von physischen Prototypen ist die Möglichkeit der realitätsnahen Evaluation. Virtuelle Prototypen hingegen können mithilfe von erweiterter Realität (Augmented Reality) erfahrbar gemacht werden, um somit auch eine bessere Veranschaulichung des Produkts mit mehreren Sinnen zu ermöglichen. Die Fertigung von Modellen und Prototypen stellt einen bedeutenden Abschnitt im Produktentwicklungsprozess dar und dient vor allem zur Informationsgewinnung und -absicherung. Dabei können nicht nur die gefertigten Prototypen analysiert, sondern auch die Eignung der verwendeten Fertigungsverfahren untersucht werden. Wichtig zu erwähnen ist auch, dass dieser Schritt nicht nur am Ende durchgeführt werden kann, sondern je nach Sinnhaftigkeit und Wirtschaftlichkeit jederzeit während des Produktentwicklungsprozesses [9].

Wie in der Abbildung 47 dargestellt ist, findet die Fertigung des Prototyps bei dieser Arbeit nach der Vollendung der Detailausarbeitung statt und dient vor allem zur Verifizierung und Validierung des entwickelten Produkts, von den in Kapitel 4.1 definierten Anforderungen. Dabei werden für die Verifizierung unterschiedliche Messungen durchgeführt und für die Validierung mehrere Kopplungs- und Entkopplungsvorgänge ausgeführt, sowie der Drehmechanismus des Steckersystems getestet. Die Ergebnisse werden anschließend in diesem Kapitel übersichtlich dargestellt.



Abbildung 47: Vorgehensweise von der Detailausarbeitung zur Validierung

Als Standort, sowohl für die Fertigung als auch für die Montage und die entsprechenden Versuche für die Verifizierung und Validierung, bietet sich die Pilotfabrik Industrie 4.0 an. Dies ist eine Einrichtung der TU Wien, die sich mit der diskreten, variantenreichen Serienfertigung bis hin zur Fertigung in kleinsten Stückzahlen beschäftigt [53] und ist dementsprechend auch mit diversen Werkzeugmaschinen ausgestattet.

7.1 Fertigung und Montage

Das entwickelte Verbindungssystem besteht nicht nur aus Standardteilen, die bei Händlern verfügbar sind, sondern auch aus Teilen, die mit unterschiedlichen Verfahren gefertigt werden müssen. Die Fertigung der Befestigungsplatte, der Hakenscheibe und der Halterung (siehe Abbildung 48) wurde mittels CNC-Fräsmaschine durchgeführt. Wie in Kapitel 6.1.1 bereits beschrieben wurde, kam dafür die Aluminiumlegierung EN AW-5083 zum Einsatz. Aus fertigungstechnischer Sicht wäre für die Hakenscheibe und für einige Fertigungsschritte der Befestigungsplatte die Bearbeitung mithilfe eines abtragenden Verfahrens wie Laser- oder Wasserstrahlschneiden besser geeignet. Je nach Höhe der Stückzahl kann auch eine Fertigung mittels Stanzmaschine in Betracht gezogen werden. Der Grund für die reine Fertigung mit einer spanenden Werkzeugmaschine, war die Verfügbarkeit in der Pilotfabrik.



Abbildung 48: Gefertigte Befestigungsplatte, Hakenscheibe und Halterung

Mit einer CNC-Drehmaschine wurden die Befestigungsbolzen, die Öffnungsbolzen, sowie die Kontaktstifte gefertigt (siehe Abbildung 49). Auch wenn in Kapitel 6.1.1 beschrieben wurde, dass auch für die Bolzen die Aluminiumlegierung EN AW-5083 verwendet werden soll, wurden aufgrund von zeit- und kostenbezogenen Aspekten Aluminiumrundstäbe aus dem Materiallager der Pilotfabrik verwendet. Um welche Aluminiumlegierung es sich dabei handelt, konnte nicht geklärt werden. Da aber in Kapitel 6.2.3 gezeigt wurde, dass es sich bei diesen Teilen hinsichtlich der Festigkeit um keine kritischen Bauteile handelt, hat dieses Material auch keinen signifikanten Einfluss auf die Stabilität des gesamten Verbindungssystems. Dies zeigt auch die Verifizierung, welche im Kapitel 7.2 beschrieben wird.



Abbildung 49: Gefertigte Befestigungsbolzen, Öffnungsbolzen und Kontaktstift

Die Bauteile des Steckersystems, welche in der Abbildung 50 zu sehen sind und im Kapitel 6.1.2 beschrieben wurden, bestehen aus dem Kunststoff PETG beziehungsweise die Kontaktstifte des weiblichen Teils aus Messing. Die Kunststoffteile wurden mit einem gängigen additiven Herstellungsverfahren namens Fused Deposition Modeling (FDM) gefertigt. Dabei werden die thermoplastischen Kunststoffrohstoffe (Filamente) durch eine beheizte Düse geführt und die Temperatur des Materials auf den Schmelzpunkt angehoben. Der Düsenkopf bewegt sich entsprechend der Werkzeugbahn, wodurch das Material kontrolliert, in gewünschter Form und schichtweise aufgetragen wird [54].



Abbildung 50: Prototypen des männlichen (links) und weiblichen (rechts) Steckersystems

Für die Montage der Bauteile wird zum Großteil handelsübliches Werkzeug benötigt. Der Einbau der Gewindeeinsätze wird mithilfe eines Aufsatzes für den LötKolben durchgeführt. Damit werden die Gewindeeinsätze erhitzt und in die dafür vorgesehenen Bohrungen im männlichen Steckergehäuse eingeschmolzen. Bei einer präzisen Fertigung der Bohrungen für die Kontaktstifte, Federkontaktstifte, gefederten Druckstücke und der Taschen für die Leistungsstecker, können die Bauteile eingepresst werden und somit kann auf eine Verwendung von Klebstoff verzichtet werden.

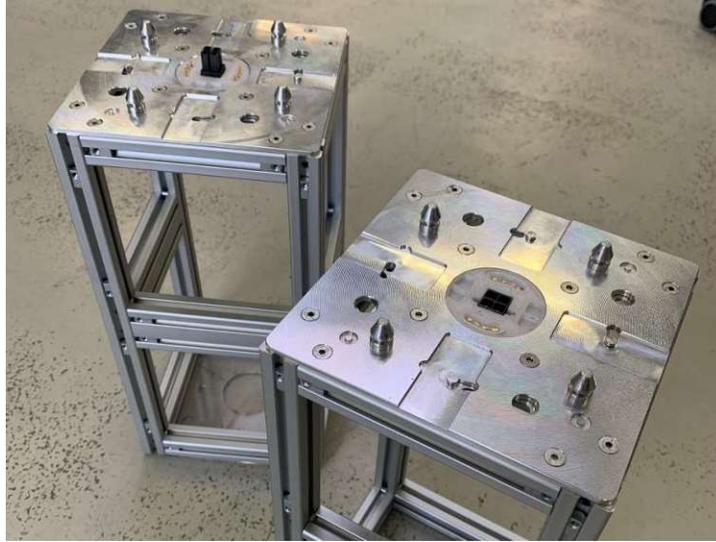


Abbildung 51: Prototyp des Verbindungssystems auf TURBO-Modulen montiert

7.2 Verifizierung und Validierung

In Kapitel 4.1 wurden die Anforderungen für das Verbindungssystem eines MRMM definiert und in der Anforderungsliste (Tabelle 3) zusammengefasst. Inwiefern das entwickelte Produkt diesen Anforderungen entspricht, wird mithilfe eines physischen Prototyps getestet. Dafür wird das Verbindungssystem mittels unterschiedlichen Tests und Messungen verifiziert und anschließend durch sogenannte Feldversuche validiert. Die Ergebnisse werden in diesem Kapitel beschrieben.

- **Verifizierung**

In der Funktionsgruppe „Allgemein“ konnten, bis auf die Kosten, alle Anforderungen erfüllt werden. Aufgrund des drehbaren Steckersystems, das bei 90°, 180° und 270° Verdrehung durch die gefederten Druckstücke einrastet und der vierfach-redundanten Anordnung der Befestigungsbolzen auf beiden Verbindungshälften, wird die geforderte Rollachsensymmetrie erfüllt. Mit einer Größe innerhalb des Moduls von 113 mm x 113 mm x 17 mm der männlichen Hälfte und 113 mm x 113 mm x 16 mm der weiblichen Hälfte, ist das Verbindungssystem kleiner als die Anforderungen es vorgeben. Tabelle 16 zeigt die Kosten für das Material des produzierten Verbindungssystems. Dabei sind alle Bauteile angeführt, die für die Montage benötigt werden. Mit Gesamtkosten von 168,44 € konnte diese Anforderung nicht erfüllt werden. Wobei die Pogo-Pins 29,8 % und die Aluminiumlegierung 36 % der Gesamtkosten ausmachen und demnach mit Abstand den größten Einfluss darauf haben. Jedoch muss hier betont werden, dass es sich bei diesem Verbindungssystem um einen Prototyp handelt und dementsprechend auch die Teile aufgrund der geringen Stückzahl teurer sind. Entsprechende Empfehlungen werden in Kapitel 9 beschrieben.

Bezeichnung	Norm/Teilenummer	Stück	Kosten in €
Flanschmutter M6	DIN 6923	8	1,49
Hennlich - Zugfedern	05/2/1	2	9,36
Mutter M3	ISO 4032	8	0,56
Molex Leistungsstecker (männlich)	1716920204	1	0,77
Molex Leistungsstecker (weiblich)	768290004	1	2,13
Molex Crimp Kontakte	768230343	4	1,17
Molex Crimp Kontakthalterung	1054150002	2	0,26
Feinmetall Pogo-Pins	F67211B0004G150	8	50,15
Gewindeinsatz M2	0832 102 0004	4	2,02
E&G Gefedertes Druckstück	GN 614-3-KU	4	11,14
Innensechskant-Schraube M2 x 4	ISO 4762	4	2,12
Druckfeder	-	0,1	1,63
Flanschmutter M4	Din 6923	8	0,74
Senkkopfschraube M4 x 10	DIN 7991	8	0,67
Senkkopfschraube M4 x 8	DIN 7991	16	1,28
O-Ringe	-	8	0,36
Aluplatten 5 x 200 x 300	EN AW-5083	2	44,86
Aluplatten 8 x 200 x 100	EN AW-5083	1	15,73
Alustangen	-	-	10,00 ¹
Messing	-	-	5,00 ¹
Kunststoff	PETG	-	7,00 ¹
		Summe	168,44

Tabelle 16: Materialkosten für den Prototypen des Verbindungssystems

Die mechanischen Belastungen wurden in Form einer Festigkeitsanalyse in Kapitel 6.2 überprüft. Dabei wurden sowohl die Beschleunigung, die Modulmassen und die Zuladung einer Plattformkonfiguration mit 4 x 3 Modulen berücksichtigt. Um die Stabilität zusätzlich zu verifizieren, wurde ein Biegeversuch durchgeführt. Der Versuchsaufbau kann der Abbildung 52 a) entnommen werden. Es wurden zwei Doppelmodule des TURBO-Projekts mit dem Verbindungssystem gekoppelt und am äußeren Rand gelagert. Danach wurde der mittlere Bereich schrittweise mit Gewichten belastet und die daraus resultierende Durchbiegung gemessen. Der Verlauf der Durchbiegung bei steigender Belastung ist in der Abbildung 52 b) zu sehen. Bei einer Belastung von 44,2 kg ergibt sich demnach eine Durchbiegung von 1,24 mm. Beim Verbindungssystem konnten nach diesem Belastungstest keine Anzeichen von Ermüdungserscheinungen, wie Verformung oder Bruch, festgestellt werden.

¹ Dieses Material war vorrätig, darum handelt sich bei diesem Wert nur um eine Schätzung.

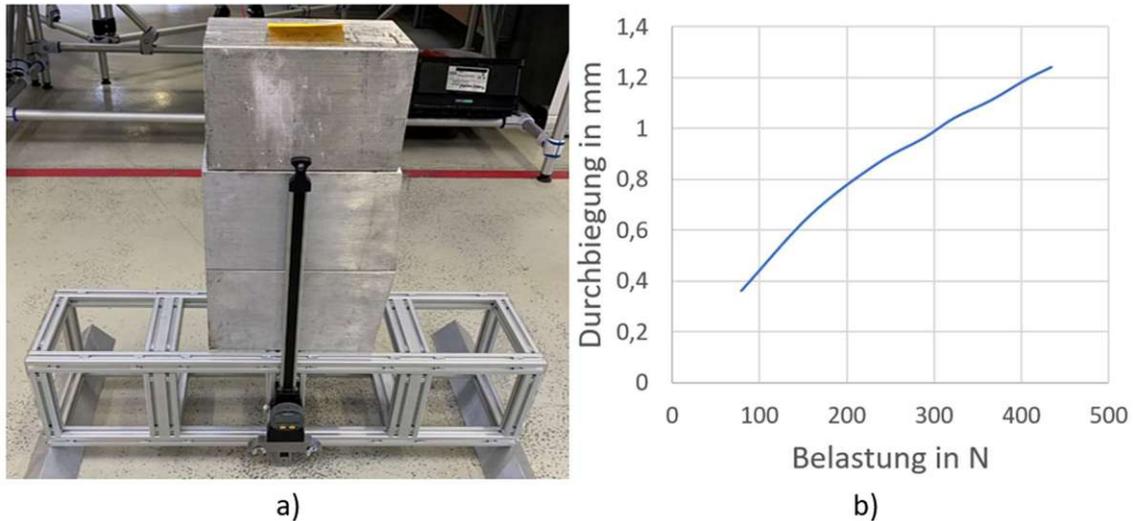


Abbildung 52: a) Versuchsaufbau für den Biegeversuch und b) Verlauf der Durchbiegung

Der Leistungsstecker und die Federkontaktstifte sind so ausgelegt, dass sie die elektrischen Belastungen tragen können. Für die Leistungsübertragung wurde eine Molex „MEGA-FIT wire to board“-Verbindung mit einem Kabelquerschnitt von 4 mm^2 verwendet. Gemäß Produktspezifikation [55] beträgt die maximale Stromstärke dieser Konfiguration 22 A und erfüllt damit die Anforderungen hinsichtlich der Leistungsübertragung. Und auch die Federkontaktstifte sind mit einer maximalen Stromstärke von 5 A [56] pro Stift ausreichend für die Verwendung eines EtherCat Netzwerksystems dimensioniert.

Die Bohrungen auf der Befestigungsplatte für die Befestigungsbolzen haben einen Durchmesser von 10 mm, wodurch ein Zugriff mit Fingern nicht gänzlich verhindert werden kann. Eine Universalabdeckplatte aus PETG, welche auf die Verbindungshälfte gesteckt wird, könnte dieses Problem lösen. Alle Bauteile des Prototyps können nach der Montage auch wieder vollständig demontiert werden. Damit ist eine Wiederverwendung und einfaches Recycling gewährleistet. Außerdem wird sowohl bei der Montage als auch bei der Verwendung auf Hilfsstoffe, wie Öl oder Klebstoff verzichtet.

Das Verbindungssystem schränkt die Bewegungsfreiheit der gekoppelten Module vollständig ein, ohne dass ein erkennbares Spiel vorhanden ist (siehe Abbildung 53). Durch die Federvorspannung des männlichen Leistungssteckers mit einem Federweg von 2 mm, sowie durch die Federvorspannung der Federkontaktstifte mit einem Federweg von maximal 2,8 mm [56], wird sichergestellt, dass die Leistungs- und Informationsverbindung auch bei der maximalen Durchbiegung stets aufrechterhalten wird. Um die Anforderung bezüglich Bedienbarkeit noch genauer zu verifizieren, wurde die benötigte Kraft für den Kopplungsvorgang gemessen. Dabei wurde der Kopplungsvorgang mehrmals auf einer Waage durchgeführt, wodurch ein Bereich von 100 - 140 N für die Kopplungskraft ermittelt wurde. Während dieser Versuche wurde

auf jeder Seite nur eine Zugfeder eingespannt. Dadurch konnte nicht nur eine ausreichende Vorspannung erreicht werden, sondern der Kopplungsvorgang wurde auch deutlich einfacher. Der Grund für die hohe Abweichung der berechneten Kopplungskraft zur gemessenen, wird mit der Hakenform und den Fertigungstoleranzen angenommen. Der Öffnungswinkel der Haken beträgt 40° , wodurch die zwei Berührungspunkte des Befestigungsbolzens fast gegenüber liegen und infolgedessen die entstehende Rückstellkraft entsprechend klein ausfällt.

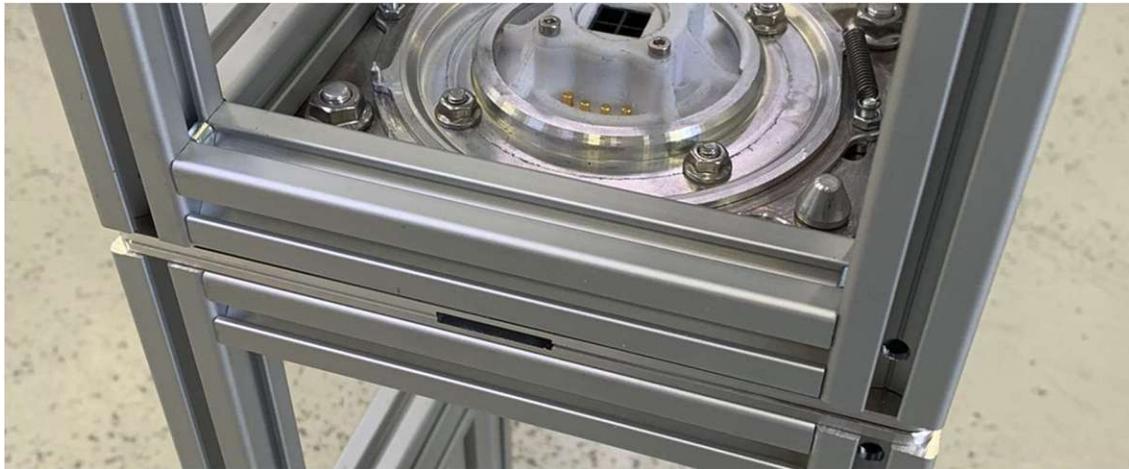


Abbildung 53: Gekoppeltes Verbindungssystem

Bezüglich Fertigung wurde im Kapitel 7.1 eine ausführliche Beschreibung gegeben. Es wurden nur spanabtragende Verfahren, sowie FDM-Druck für die Kunststoffteile verwendet. Die zugekauften Teile (siehe Tabelle 16) waren alle innerhalb eines Monats am Montageort verfügbar. Die Verbindungshälften haben in etwa die gleiche Masse von jeweils 244 g, wodurch insgesamt ein Eigengewicht von 488 g pro Verbindungsmodul erreicht wird.

- **Validierung**

Für die Validierung wurden mehrere Kopplungs- und Entkopplungsvorgänge durchgeführt. Dabei wurden alle Orientierungen jeweils fünf Mal getestet und die Beobachtungen notiert. Um die intuitive Verwendbarkeit des Verbindungssystems zu validieren, wurde eine weitere Person als unabhängiger Anwender ausgewählt.

Bei den ersten paar Durchgängen wurde eine Markierung an beiden Steckersystemen angebracht, damit die passende Orientierung sofort erkannt werden kann. Der Drehmechanismus funktioniert problemlos. Durch die gefederten Druckstücke rastet das Steckersystem hörbar ein, aber nur so fest, dass trotzdem eine Verdrehung ohne erhöhtem Kraftaufwand möglich bleibt. Die Kopplungsvorgänge konnten grundsätzlich alle ohne Schwierigkeiten durchgeführt werden. Aufgrund der erhobenen Position des Leistungssteckers, muss dieser zuerst eingeführt werden, womit eine gewaltvolle Kopplung mit falscher Orientierung verhindert werden kann. Die richtige Position ist

schnell zu finden, da sich der Anwender an den Befestigungsbolzen orientieren kann. Greifen dann die konischen Befestigungsbolzen, kann mit der erforderlichen Kopplungskraft das Verbindungssystem zusammengedrückt werden. Auch wenn sich die aufzubringende Kopplungskraft, wie oben schon beschrieben, als etwas volatil herausstellt, kann der Kopplungsvorgang bei allen Versuchen abgeschlossen werden. Jedoch ist bei 75 % der Versuche, die Hakenscheibe der weiblichen Hälfte nicht vollständig eingerastet. Grund dafür sind die sehr engen Nuten in den Befestigungsbolzen. Bei der Hakenscheibe der männlichen Seite konnte dieses Problem nicht festgestellt werden.

Weiters konnte nach dem vierzehnten Kopplungsvorgang eine Schiefstellung des Öffnungsbolzens festgestellt werden. Demzufolge ist der Öffnungsbolzen zu klein dimensioniert für die angreifende Federkraft. Empfehlungen diesbezüglich können dem Kapitel 9 entnommen werden. Eine weitere Beobachtung war die Verformung der Haken beim Kopplungsvorgang. Nach genauerer Untersuchung konnten jedoch nach Ende der Versuchsreihe keine bleibenden Verformungen identifiziert werden. Aber auch wenn die Verformungen im elastischen Bereich waren, sollte dies auch zukünftig weiter beobachtet werden. Denn eine plastische Verformung der Verbindungshaken würde eine Fehlfunktion zur Folge haben und hat somit einen großen Einfluss auf die Lebensdauer des Verbindungssystems.

Der Entkopplungsmechanismus war im wesentlichen auch zufriedenstellend. Die Öffnungsplatte aus PETG lässt sich gut einführen und die Hakenscheibe löst die Verbindung daraufhin schnell. Anschließend müssen die Verbindungshälften nur noch voneinander abgezogen werden. Hier stellte sich jedoch heraus, dass die Öffnungsplatte mit einer Hand festgehalten werden muss, da sie sonst wegzuspringen droht. Was grundsätzlich kein Problem darstellt, aber bei mehreren Modulen doch als unpraktisch empfunden werden kann.

8 Zusammenfassung

Im Zuge dieser Arbeit wurde ein Verbindungssystem für die Kopplung der einzelnen Module eines MRMM entwickelt und der Prototyp im Rahmen des TURBO-Projekts verifiziert und validiert. Dabei wurden drei Forschungsfragen bearbeitet, welche in Kapitel 1.2 definiert wurden. Im Folgenden werden diese nochmal zusammenfassend beantwortet.

1. Was ist der Stand der Technik in Bezug auf die Verbindungssysteme für die Kopplung der einzelnen Module von MRMM und durch welche Merkmale unterscheiden sich die einzelnen Systeme?

Diese Frage wurde im Rahmen der Literaturrecherche beantwortet. Wie in Kapitel 2 beschrieben wurde, unterscheiden sich die Verbindungssysteme von MRMM durch mehrere Merkmale. Die wichtigsten davon sind Geschlecht, Betätigung, Rollachsensymmetrie, Größe, Stabilität, Kommunikation und Energie. Mithilfe dieser Merkmale wurde der Stand der Technik beschrieben und anschließend miteinander verglichen. Bei den mechanischen Mechanismen wurden mehrere Lösungen für S&B-Verbindungen, Hakenverbindungen, S&S-Verbindungen und Formanpassungs-Verbindungen beschrieben. Auch wenn schon viele verschiedene Systeme entwickelt wurden, entsprach keines den Anforderungen für diese Arbeit. Deswegen wurde im nächsten Schritt ein neuartiges Verbindungssystem entwickelt und damit die zweite Forschungsfrage beantwortet.

2. Wie kann eine Verbindung für die Übertragung von Energie, Informationen und mechanischen Belastungen, unter Berücksichtigung der notwendigen Steifigkeit, Positioniergenauigkeit und Nutzerfreundlichkeit zwischen den Modulen eines MRMM realisiert werden?

Der Produktentwicklungsprozess orientierte sich an der VDI-Richtlinie 2221 und entsprach demnach einer methodischen Vorgehensweise. Zuerst wurden in der ersten Phase die Anforderungen klar definiert (Tabelle 3). Darauf aufbauend wurde in der Konzeptphase ein morphologischer Kasten erstellt und mehrere Konzepte generiert. Diese unterscheiden sich durch Merkmale wie der Verbindungsart, der Betätigung und der Anzahl der Zugänge für die Entkopplung. Das am besten den Anforderungen entsprechende Konzept wurde mithilfe einer Nutzwertanalyse und gewichteten Kriterien bewertet und anschließend detailliert mit CATIA V5 ausgearbeitet. Das Verbindungssystem besteht aus einer Befestigungsplatte, welche als Träger für die Befestigungsbolzen, die Hakenscheibe und das Steckersystem mit Steckern für die Informations- und Leistungsübertragung dient. Die Befestigungsbolzen werden in die Bohrungen der gegenüberliegenden Seite gesteckt, wo eine federvorgespannte Hakenscheibe in die Nuten der Befestigungsbolzen einrastet und so werkzeuglos eine stabile Verbindung hergestellt werden kann. Gleichzeitig wird eine elektrische

Verbindung mit den Steckersystemen hergestellt. Für die Entkopplung wird eine kleine Platte seitlich, zwischen die beiden Verbindungshälften geschoben, wodurch die Hakenscheiben beider Hälften wieder verdreht werden und infolgedessen die Befestigungsbolzen freigegeben werden. Die Verbindungshälften können dann wieder voneinander getrennt werden.

3. Mit welchen Fertigungsverfahren kann das Verbindungssystem für einen MRMM gefertigt werden und wie kann der Prototyp anschließend hinsichtlich der definierten Anforderungen verifiziert und validiert werden?

In der letzten Phase wird die dritte Forschungsfrage beantwortet. Für die Verifizierung und die Validierung des virtuell entwickelten Verbindungssystems wurde ein physischer Prototyp gefertigt. Dabei wurden jene Teile, welche aus einer Aluminiumlegierung bestehen, mithilfe von spanabtragenden Verfahren bearbeitet. Die Kunststoffteile aus PETG hingegen wurden mit einem FDM-Druckverfahren hergestellt. Für die Montage der Teile wird nur handelsübliches Werkzeug benötigt. Die Verifizierung und die Validierung des Prototyps fand im Rahmen des TURBO-Projekts statt. Die beiden Hälften des Verbindungssystems wurden jeweils auf ein Doppelmodul montiert und dann unterschiedlichen Tests unterzogen. Zum einen wurde die Stabilität mithilfe eines Biegeversuchs beurteilt. Dabei wurde das Verbindungssystem mit 44,2 kg Last beansprucht und gleichzeitig eine Durchbiegung von 1,24 mm gemessen. Weiters wurde die benötigte Kopplungskraft gemessen, welche sich im Bereich von 100 – 140 N befindet. Nach erfolgreicher Kopplung konnte kein Spiel zwischen den Befestigungsplatten erkannt werden. Durch wiederholte Durchführung des Kopplungs- und Entkopplungsvorgangs, konnten die Bedienbarkeit und die Zuverlässigkeit validiert werden. Ein unabhängiger Anwender wurde ausgewählt, um die intuitive Handhabung des Verbindungssystems zu untersuchen.

9 Diskussion und Ausblick

Dieses Kapitel bildet den Abschluss dieser Arbeit und enthält eine ausführliche Diskussion der Entwicklungsergebnisse des Verbindungssystems. Dabei werden diverse Probleme, die während des Produktentwicklungsprozesses oder der Fertigung aufgetreten sind, beschrieben. Darüber hinaus wird das Design auf Basis der Verifizierung und der Validierung kritisch hinterfragt und Empfehlungen für zukünftige Forschungsprojekte abgegeben.

Steckersystem: Die spezifische Auslegung der Steckverbindung kann erst durchgeführt werden, wenn die Wahl der Roboter-Komponenten getroffen wurde und somit auch ein Netzwerksystem ausgewählt wurde. Denn, wie in Kapitel 2.7 beschrieben wurde, sind oft Komponenten auf bestimmte Netzwerksysteme abgestimmt. Zum Zeitpunkt der Arbeit stand noch kein Netzwerksystem fest, da die Auswahl noch von anderen Arbeiten des Projekts TURBO abhängt. Deswegen wurde das Design des Steckersystems so konzipiert, dass eine einfache Substituierung ebendieser möglich ist. In zukünftigen Arbeiten muss deshalb kontrolliert werden, ob das Steckersystem mit dem verwendeten Netzwerksystem kompatibel ist oder Änderungen vorgenommen werden müssen. Da es sich bei den Steckergehäuse um einfache Kunststoffteile handelt, die mittels FDM-Verfahren gedruckt wurden, steht einer schnellen Fertigung aber nichts im Weg.

Toleranzen: Wie sich bei den gedruckten Teilen gezeigt hatte, waren die Ungenauigkeiten deutlich höher als erwartet. In der Literatur findet man für die Genauigkeitswerte von FDM-Verfahren sehr unterschiedliche Werte [57]. Wie bei den meisten Fertigungsverfahren hängt dies sehr stark vom jeweiligen Gerät ab. Die Folge waren Nacharbeiten, damit die Leistungsstecker, die (Feder-)Kontaktstifte und die gefederten Druckstücke verbaut werden konnten. Um hier den Arbeitsaufwand zu verringern, wird empfohlen, entweder auf ein genaueres Druckverfahren zu wechseln oder die Bohrungen beziehungsweise die Taschen für die Leistungsstecker zu vergrößern und dann, falls notwendig die Teile einzukleben. Milovanović et al. [58] vergleicht die Verfahren FDM und SLA (Stereolithografie) in Bezug auf deren Genauigkeit und zeigt einen deutlichen Vorteil des SLA-Verfahrens.

Generell lassen sich auch Schwierigkeiten bei der Fertigung von kleinen Bauteilen, wie den Öffnungsbolzen oder den Kontaktstiften feststellen. Die notwendigen Toleranzen für die Montage und die gewünschte Präzision wurden oft nicht eingehalten und deswegen mussten einige Teile nachbearbeitet werden. Der Grund dafür liegt vermutlich an der Dimension der Drehmaschine, die für größere Teile ausgelegt ist.

Hakenscheibe: Wie in der Validierung bereits beschrieben wurde, kann bei mehrfacher Durchführung des Kopplungsvorgangs eine Verformung des Hakens auftreten. Aufgrund der Form des Hakens, führt die Hakenscheibe beim Einführen des

Befestigungsbolzens nicht nur eine rotatorische Bewegung um die Rollachse aus, sondern gleichzeitig führen die Haken auch eine kleine translatorische Bewegung in X -Richtung aus. Kommt es dabei zu einer plastischen Verformung, könnte es dazu führen, dass die Haken beim Kopplungsvorgang nicht mehr in die Nut des Befestigungsbolzens einrasten. Die Geometrie des Hakens wurde so gestaltet, dass eine möglichst große Fläche bei einer Belastung mit dem Befestigungsbolzen in Berührung ist, um damit eine große Festigkeit zu erreichen. Bei zukünftigen Arbeiten wird aber empfohlen, den Öffnungswinkel des Hakens zu erhöhen. Dadurch sinkt zwar die statische Festigkeit aber die translatorische Bewegung und folglich auch die Verformung des Hakens kann vermindert werden.

O-Ringe: Wie die Verifizierung im Kapitel 7.2 zeigt, ist das Spiel zwischen den Verbindungshälften minimal. Das führt dazu, dass der ursprüngliche Nutzen der O-Ringe obsolet wird (siehe Kapitel 6.1.1). Deswegen kann in dieser Arbeit keine klare Aussage über diese Bauteile hinsichtlich deren Verwendung und Einfluss auf das Verbindungssystem getätigt werden. Werden die Toleranzen der Bauteile jedoch erhöht, um das Ausmaß der möglichen Nacharbeiten zu reduzieren, kann das Spiel aber wieder deutlich zunehmen. Außerdem wird bei den Nuten der Befestigungsbolzen ein größeres Spiel empfohlen, um bei allen Kopplungsvorgängen ein vollständiges Einrasten der Hakenscheibe sicher zu stellen (siehe Kapitel 7.2). Und infolgedessen, wird die Verwendung der O-Ringe trotzdem empfohlen.

Kopplungs- und Entkopplungsmechanismus: Bei den Kopplungsversuchen stellte sich heraus, dass eine Zugfeder pro Verbindungshälfte ausreichend ist, um einen stabilen Kopplungsvorgang zu gewährleisten. Es wird hier empfohlen, Federn mit einer deutlich geringeren Federrate zu wählen und dann trotzdem vier Federn einzubauen. Denn die Belastung der verwendeten Feder auf den Öffnungsbolzen führte teilweise zu einer Schiefstellung ebendieser. Eine weitere Lösung wären Öffnungsbolzen aus Stahl, da sie mit einem höheren Drehmoment verschraubt werden können. Der Mechanismus für die Öffnung des Verbindungssystems funktioniert grundsätzlich gut, auch wenn statt einer Öffnungsplatte aus Aluminium, eine aus PETG verwendet wurde. Bei einer erhöhten Belastung verbiegt sich diese, wodurch eine Übertragung der Öffnungskraft auf die Öffnungsbolzen nur mehr begrenzt möglich ist.

Kosten: Tabelle 16 zeigt die Kosten des Verbindungssystems und wie in Kapitel 7.2 bereits beschrieben wurde, handelt es sich um einen Prototypen und deswegen sind diese Kosten nicht repräsentativ für das fertige Produkt mit höherer Stückzahl. Trotzdem geben sie einen guten Einblick, welche Teile die höchsten Kosten verursachen. Dabei zeigt sich, dass die Kosten der Aluminiumlegierung (36 %) und die der Federstiftkontakte (30 %) einen großen Teil der gesamten Materialkosten ausmachen und deswegen sollte bei zukünftigen Arbeiten hier angesetzt werden, um die Kosten zu senken.

Literaturverzeichnis

- [1] J. Baca, S. G. M. Hossain, P. Dasgupta, C. A. Nelson, und A. Dutta, „ModRED: Hardware design and reconfiguration planning for a high dexterity modular self-reconfigurable robot for extra-terrestrial exploration“, *Rob Auton Syst*, Bd. 62, Nr. 7, S. 1002–1015, 2014, doi: 10.1016/j.robot.2013.08.008.
- [2] M. A. Post, X. T. Yan, und P. Letier, „Modularity for the future in space robotics: A review“, *Acta Astronautica*, Bd. 189. Elsevier Ltd, S. 530–547, 2021, doi: 10.1016/j.actaastro.2021.09.007.
- [3] IFR International Federation of Robotics, „World Robotics Report“, 2022, [ONLINE] Verfügbar unter: <https://ifr.org/news/wr-report-all-time-high-with-half-a-million-robots-installed> (Zugriff am 19. März 2023).
- [4] A. Lyder, R. F. Mendoza Garcia, und K. Stoy, „Genderless Connection Mechanism for Modular Robots Introducing Torque Transmission Between Modules“, *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Odense, 2010.
- [5] A. Angerer, M. Pfulner, M. Brandstötter, und M. Hofbauer, „Modulare serielle Roboter“, *Elektrotechnik und Informationstechnik*, Bd. 130, Nr. 2, S. 48–53, 2013, doi: 10.1007/s00502-013-0130-8.
- [6] P. Zorn, „Systemintegration und Gesamtentwurf eines modular aufgebauten mobilen Roboters“, [Diplomarbeit], Wien, 2022.
- [7] W. Saab, P. Racioppo, und P. Ben-Tzvi, „A review of coupling mechanism designs for modular reconfigurable robots“, *Robotica*, Bd. 37, Nr. 2, S. 378–403, 2019, doi: 10.1017/S0263574718001066.
- [8] Verein Deutscher Ingenieure, „VDI 2221: Entwicklung technischer Produkte und Systeme“, [Richtlinie], Berlin, 2019.
- [9] G. Pahl, W. Beitz, B. Bender, K. Gericke, J. Feldhusen, K.-H. Grote, M. Kreimeyer, W. Seidenscharz, M. Rehfeld, K. Paetzold, D. Göhlich, T.-A. Fay, S. Wartzack, D. Krause, T. Vietor, D. Inkermann, M. Hanna, T. Richter, N. Wortmann, S. Matthiesen, E. Kirchner, A. Neudorfer, J. Heusel, T. Bronnhuber, O. Helms, J. Krzywinski, C. Wölfel, F. Klocke, K. Dilger, R. Müller, T. Ehlers, R. Lachmayer, J. Oehmen, S. Vajna, M. Schabacker, G. Lashin, F. Kauf, T. C. McAlone, D. C. A. Pigozzo, A. Hövel, M. Schacht, P. Erk, G. Lashin und R. Stark, „Pahl/Beitz Konstruktionslehre: Methoden und Anwendung erfolgreicher Produktentwicklung“, 9. Auflage, Springer Vieweg, Berlin, 2020, doi: <https://doi.org/10.1007/978-3-662-57303-7>.

- [10] A. Álvarez und T. Ritchey, „Applications of General Morphological Analysis From Engineering Design to Policy Analysis“, *Acta Morphologica Generalis AMG*, Bd. 4, Nr. 1, 2015.
- [11] C. Parrott, T. J. Dodd, und R. Groß, „HiGen: A High-Speed Genderless Mechanical Connection Mechanism with Single-Sided Disconnect for Self-Reconfigurable Modular Robots“, *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 2014.
- [12] A. Brunete, A. Ranganath, S. Segovia, J. P. de Frutos, M. Hernando, und E. Gamba, „Current trends in reconfigurable modular robots design“, *International Journal of Advanced Robotic Systems*, Bd. 14, Nr. 3. SAGE Publications Inc., Madrid, 2017, doi: 10.1177/1729881417710457.
- [13] N. Brener, F. Ben Amar, und P. Bidaud, „Characterization of Lattice Modular Systems by Discrete Displacement Groups“, 2010.
- [14] P. Muthui und R. A. Verrinder, „Development of a docking mechanism for self-reconfigurable modular robots“, Kapstadt, 2014.
- [15] V. Zykov, A. Chan, und H. Lipson, „Molecubes: An Open-Source Modular Robotics Kit“, San Diego, 2007.
- [16] S. Yi, Z. Temel, und K. Sycara, „PuzzleBots: Physical Coupling of Robot Swarms“, *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Bd. 2021-May. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., Xi'an, S. 8742–8748, 2021, doi: 10.1109/ICRA48506.2021.9561610.
- [17] Beckhoff Automation GmbH, „Antriebssysteme für hochdynamische Positionieraufgaben“, [ONLINE] Verfügbar unter: <https://www.beckhoff.com/de-at/produkte/motion/> (Zugriff am 22. März 2023).
- [18] R. Langmann, *Vernetzte Systeme für die Automatisierung 4.0*. München: Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, 2021.
- [19] H. Kurokawa, K. Tomita, A. Kamimura, S. Kokaji, T. Hasuo, und S. Murata, „Distributed self-reconfiguration of M-TRAN III modular robotic system“, *International Journal of Robotics Research*, Bd. 27, Nr. 3–4, S. 373–386, 2008, doi: 10.1177/0278364907085560.
- [20] T. Fukuda und S. Nakagawa, „Dynamically reconfigurable robotic system“, *IEEE International Confers and Automation*, Tokyo, S. 1581–1586, 1988, doi: 10.1109/ROBOT.1988.12291.

- [21] M. Kortmann, S. Rühl, J. Weise, J. Kreisel, T. A. Schervan, und H. Schmidt, „Building Block-based ‚iBOSS‘ Approach: Fully Modular Systems with Standard Interface to Enhance Future Satellites“, Jerusalem, 2015.
- [22] A. Castano, A. Behar, und P. M. Will, „The Conro modules for reconfigurable robots“, *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, Bd. 7, Nr. 4, S. 403–409, 2002, doi: 10.1109/TMECH.2002.806233.
- [23] M. Yim, Y. Zhang, K. Roufas, D. Duff, und C. Eldershaw, „Connecting and disconnecting for chain self-reconfiguration with polybot“, *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, Bd. 7, Nr. 4, S. 442–451, 2002, doi: 10.1109/TMECH.2002.806221.
- [24] J. Liedke und H. Wörn, „CoBoLD - A bonding mechanism for modular self-reconfigurable mobile robots“, *IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics*. Karlsruhe, S. 2025–2030, 2011, doi: 10.1109/ROBIO.2011.6181589.
- [25] A. Sproewitz, R. Moeckel, M. Vespignani, S. Bonardi, und A. J. Ijspeert, „Roombots: A hardware perspective on 3D self-reconfiguration and locomotion with a homogeneous modular robot“, *Rob Auton Syst*, Bd. 62, Nr. 7, S. 1016–1033, 2014, doi: 10.1016/j.robot.2013.08.011.
- [26] S. Murata, K. Kakomura, und H. Kurokawa, „Docking experiments of a modular robot by visual feedback“, *IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems*, S. 625–630, 2006, doi: 10.1109/IROS.2006.282545.
- [27] Y. Terada und S. Murata, „Automatic assembly system for a large-scale modular structure - Hardware design of module and assembler robot“, *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, Bd. 3. S. 2349–2355, 2004, doi: 10.1109/iros.2004.1389760.
- [28] A. Sproewitz, M. Asadpour, Y. Bourquin, und A. J. Ijspeert, „An active connection mechanism for modular self-reconfigurable robotic systems based on physical latching“, *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, S. 3508–3513, 2008, doi: 10.1109/ROBOT.2008.4543747.
- [29] H. Wei, Y. Cai, H. Li, D. Li, und T. Wang, „Sambot: A self-assembly modular robot for swarm robot“, *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, S. 66–71, 2010, doi: 10.1109/ROBOT.2010.5509214.
- [30] W. Tan, H. Wei, und B. Yang, „SambotII: A new self-assembly modular robot platform based on Sambot“, *Applied Sciences (Switzerland)*, Bd. 8, Nr. 10, 2018, doi: 10.3390/app8101719.

- [31] H. Wei, Y. Chen, J. Tan, und T. Wang, „Sambot: A self-assembly modular robot system“, *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, Bd. 16, Nr. 4, S. 745–757, 2011, doi: 10.1109/TMECH.2010.2085009.
- [32] Y. Zhang, G. Song, S. Liu, G. Qiao, J. Zhang, und H. Sun, „A Modular Self-Reconfigurable Robot with Enhanced Locomotion Performances: Design, Modeling, Simulations, and Experiments“, *Journal of Intelligent and Robotic Systems: Theory and Applications*, Bd. 81, Nr. 3–4, S. 377–393, 2016, doi: 10.1007/s10846-015-0228-9.
- [33] G. Qiao, G. Song, J. Zhang, H. Sun, W. Wang, und A. Song, „Design of transmote: A modular self-reconfigurable robot with versatile transformation capabilities“, *IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics*. Guangzhou, S. 1331–1336, 2012, doi: 10.1109/ROBIO.2012.6491153.
- [34] W. Saab und P. Ben-Tzvi, „Development of a novel coupling mechanism for modular self-reconfigurable mobile robots“, 2015, doi: <https://doi.org/10.1115/DETC2015-46659>.
- [35] W. Saab und P. Ben-Tzvi, „A genderless coupling mechanism with six-degrees-of-freedom misalignment capability for modular self-reconfigurable robots“, *J Mech Robot*, Bd. 8, Nr. 6, 2016, doi: 10.1115/1.4034014.
- [36] W. M. Shen, R. Kovac, und M. Rubenstein, „Singo: A single-end-operative and genderless connector for self-reconfiguration, self-assembly and self-healing“, *IEEE International Conference on Robotics and Automation*. S. 4253–4258, 2009, doi: 10.1109/ROBOT.2009.5152408.
- [37] S. G. M. Hossain, C. A. Nelson, und P. Dasgupta, „RoGenSiD: A Rotary Plate Genderless Single-Sided Docking Mechanism for Modular Self-Reconfigurable Robots“, *SME International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference*, 2013.
- [38] W. Wenzel, F. Cordes, und F. Kirchner, „A robust electro-mechanical interface for cooperating heterogeneous multi-robot teams“, *IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems*, S. 1732–1737, 2015, doi: 10.1109/IROS.2015.7353601.
- [39] M. Yim, D. G. Duff, und K. D. Roufas, „PolyBot: a modular reconfigurable robot“, *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Bd. 1. S. 514–520, 2000, doi: 10.1109/robot.2000.844106.
- [40] G. Fu, A. Menciassi, und P. Dario, „Development of a genderless and fail-safe connection system for autonomous modular robots“, *IEEE International*

- Conference on Robotics and Biomimetics*, S. 877–882, 2011, doi: 10.1109/ROBIO.2011.6181398.
- [41] J. Mrázek und B. Jirí, „RoFICoM - First Open-Hardware Connector for Metamorphic Robots“, *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, 2019.
- [42] J. Liu, C. W. Yuan, C. L. Liu, Z. Q. Qian, B. Zhang, und W. J. Zhang, „ReBot: A Novel Under-Actuated Resilient Robot“, *25th International Conference on Mechatronics and Machine Vision in Practice (M2VIP)*, 2018.
- [43] F. Zwicky, „The Morphological Approach to Discovery, Invention, Research and Construction“, Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1967, S. 273–297.
- [44] W. Hesse, „Aluminium-Werkstoff-Datenblätter“, 7. Auflage, Deutsches Institut für Normung e.V., 2016.
- [45] Deutsche Institut für Normung, „DIN 485-2: Aluminium und Aluminiumlegierungen – Bänder, Bleche und Platten – Teil 2: Mechanische Eigenschaften“, Berlin, 2016.
- [46] Deutsche Institut für Normung, „DIN 754-2: Aluminium und Aluminiumlegierungen – Gezogene Stangen und Rohre – Teil 2: Mechanische Eigenschaften“, [Norm], Berlin, 2017.
- [47] Deutsche Institut für Normung, „DIN 755-2: Aluminium und Aluminiumlegierungen – Stranggepresste Stangen, Rohre und Profile – Teil 2: Mechanische Eigenschaften“, [Norm], Berlin, 2016.
- [48] SIMONA, „Technisches Handbuch SIMONA ® Kunststoffe“, 2016, [ONLINE] Verfügbar unter: https://www.simona.de/fileadmin/user_upload/Medien/Mediocenter/Technische_Informationen/technisches.Handbuch_SIMONA_Kunststoffe.pdf (Zugriff am 23. März 2023).
- [49] Verein Deutscher Ingenieure, „VDI 2030: Systematische Berechnung hochbeanspruchter Schraubenverbindungen Zylindrische Einschraubenverbindungen“, [Richtlinie], 2015.
- [50] B. Klein, „FEM: Grundlagen und Anwendungen der Finite-Element-Methode im Maschinen- und Fahrzeugbau“, Springer Fachmedien, Wiesbaden, 2015, doi: 10.1007/978-3-658-06054-1.
- [51] M. Weigand, „Maschinenelemente“, 4. Auflage, Technische Universität Wien, 2012.

- [52] M. Welsch, „Bewertung von Spannungsspitzen und Singularitäten in FEM-Rechnungen“, Hamburg, 2015, doi: 10.13140/RG.2.1.1755.2728.
- [53] Pilotfabrik TU Wien, „Pilotfabrik Industrie 4.0“, [ONLINE] Verfügbar unter: <https://www.pilotfabrik.at/uber-uns/> (Zugriff am 28. März 2023).
- [54] O. Abdulhameed, A. Al-Ahmari, W. Ameen, und S. H. Mian, „Additive manufacturing: Challenges, trends, and applications“, *Advances in Mechanical Engineering*, Bd. 11, Nr. 2, 2019, doi: 10.1177/1687814018822880.
- [55] Molex, „Produktspezifikation MEGA-FIT Wire to Board CONNECTOR SYSTEM“, [ONLINE] Verfügbar unter: https://www.molex.com/pdm_docs/ps/1720631000-PS-000.pdf (Zugriff am 31. März 2023).
- [56] Feinmetall Contact Technologies, „Kontaktstift F67211B0004G150“, [ONLINE] Verfügbar unter: <https://www.feinmetall.de/produktfinder/detail/1001087/> (Zugriff am 31. März 2023).
- [57] T. Lieneke, V. Denzer, G. A. O. Adam, und D. Zimmer, „Dimensional Tolerances for Additive Manufacturing: Experimental Investigation for Fused Deposition Modeling“, Bd. 43. Elsevier B.V., S. 286–291, 2016, doi: 10.1016/j.procir.2016.02.361.
- [58] A. Milovanović, M. Milošević, G. Mladenović, B. Likozar, K. Čolić, und N. Mitrović, „Experimental Dimensional Accuracy Analysis of Reformer Prototype Model Produced by FDM and SLA 3D Printing Technology“, Springer Nature Switzerland AG, S. 84–95, 2019, doi: https://doi.org/10.1007/978-3-319-99620-2_7.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Beispiele für MRMM (modifiziert übernommen): a) TURBO [6] b) Thor Robot [4].....	2
Abbildung 2: Hauptphasen des Produktentwicklungsprozesses (modifiziert übernommen aus [9])	4
Abbildung 3: Modell des Produktentwicklungsprozesses (modifiziert übernommen aus [9])	5
Abbildung 4: Einfache Darstellung der Geschlechter von Verbindungssystemen (modifiziert übernommen aus [7]).....	7
Abbildung 5: Darstellung der Rollachsensymmetrie (modifiziert übernommen aus [13])	8
Abbildung 6: Festlegung der möglichen Abweichungstoleranzen (modifiziert übernommen aus [7])	9
Abbildung 7: Einteilung von Verbindungssystemen von MRMM (modifiziert übernommen aus [7])	12
Abbildung 8: Einfache Darstellung eines S&B-Verbindungssystems.....	13
Abbildung 9: CONRO Verbindungsmechanismus: a) entkoppelt und b) gekoppelt (modifiziert übernommen aus [22]).....	14
Abbildung 10: Verbindungsmechanismus des PolyBot Gen 2 (modifiziert übernommen aus [23]).....	15
Abbildung 11: UCT-Verbindungsmechanismus (modifiziert übernommen aus [14])..	16
Abbildung 12: CoBoLD Verbindungsmechanismus (modifiziert übernommen aus [24])	16
Abbildung 13: Unterschiedliche Hakenbewegungen: a) reine Kreisbewegung b, c) Kombination aus rotatorischer und translatorischer Bewegung (modifiziert übernommen aus [25])	17
Abbildung 14: M-TRAN III Verbindungsmechanismus (modifiziert übernommen aus [26])	18
Abbildung 15: Bewegung der Haken der M-TRAN III Verbindung (modifiziert übernommen aus [19])	18
Abbildung 16: Roombot-Verbindungsmechanismus (modifiziert übernommen aus [25])	19
Abbildung 17: Bewegung der Roombot-Haken (modifiziert übernommen aus [28]) ..	19
Abbildung 18: Verbindung des Sambots (modifiziert übernommen aus [30, 31])	20
Abbildung 19: 3D-Darstellung des Trimobots (links) und dessen Verbindungsprozess in drei Schritten (rechts) (modifiziert übernommen aus [32])	20
Abbildung 20: iSSI-Schnittstelle: a) männlich b) weiblich (modifiziert übernommen aus [21])	21
Abbildung 21: Transmote-Verbindung: a) männlich b) weiblich und c) Kopplungsvorgang (modifiziert übernommen aus [33])	22

Abbildung 22: GHEFT Verbindungsmechanismus (modifiziert übernommen aus [34])	23
Abbildung 23: SINGO-Verbindung: a) Vorderseite max. Offen und b) max. geschlossen sowie c) Seitenansicht der Haken (modifiziert übernommen aus [36])	24
Abbildung 24: RoGenSiD-Verbindungssystem: a) Vorderseite und b) Rückseite (modifiziert übernommen aus [1])	25
Abbildung 25: elektrische Schnittstelle von a), b) EMI [38] und c) CoBoLD (modifiziert übernommen aus [24])	26
Abbildung 26: Elektrische Schnittstellen modifiziert übernommen von a) Molecube [15] und b) GENFA [40]	27
Abbildung 27: Elektrische Schnittstellen modifiziert übernommen von a) HiGen [11] und b) RoFiCoM [41]	28
Abbildung 28: Vorgehensweise vom Konzept bis zur Detailausarbeitung	49
Abbildung 29: Vorderseite der Systemhälften (links: männlich und rechts: weiblich)	50
Abbildung 30: Rückseite der Systemhälften (links: männlich und rechts: weiblich) ...	50
Abbildung 31: Skizze für Zugfederberechnung (a) und Verlauf des Vorspannungsmoments (b) sowie der Federkraft (c).....	52
Abbildung 32: Schnittansicht der Steckersysteme (links: männlich und rechts: weiblich)	53
Abbildung 33: Darstellung der Druckfeder in a) neutraler Position $L_{ne} = 12,4$ mm, b) gekoppelter Position $L_{ko} = 10,4$ mm und c) der Kraftverlauf	54
Abbildung 34: Verlauf der Kopplungskraft beim Kopplungsvorgang	55
Abbildung 35: Berechnung der Kopplungskraft aufgrund der Zugfedern	55
Abbildung 36: Vorgehensweise beim Zusammenbau von mehreren Modulen	56
Abbildung 37: Beispiele für Konfigurationsmöglichkeiten	56
Abbildung 38: Darstellung des Entkopplungsvorgangs	57
Abbildung 39: Skizzen für die Berechnung der a) Aufstandskräfte und b) Biegemoment	58
Abbildung 40: Skizze mit Formel für die Berechnung der Zugkraft aufgrund des Biegemoments [51].....	59
Abbildung 41: Verlauf der von-Mises Spannungen a) der Befestigungsplatte b) im Bereich der max. Spannung und c) genauere Untersuchung der max. Spannung....	60
Abbildung 42: Verformungen an der Befestigungsplatte	60
Abbildung 43: Spannungsverlauf der Hakenscheibe	61
Abbildung 44: Verläufe der a) von-Mises Vergleichsspannungen und b) Verschiebungen des Befestigungsbolzens.....	62
Abbildung 45: Verläufe der a) von-Mises Vergleichsspannungen und b) Verschiebungen des Deckels	63
Abbildung 46: Verläufe der a) von-Mises Vergleichsspannungen und b) Verschiebungen des weiblichen Steckergehäuses.....	63
Abbildung 47: Vorgehensweise von der Detailausarbeitung zur Validierung.....	64

Abbildung 48: Gefertigte Befestigungsplatte, Hakenscheibe und Halterung	65
Abbildung 49: Gefertigte Befestigungsbolzen, Öffnungsbolzen und Kontaktstift	66
Abbildung 50: Prototypen des männlichen (links) und weiblichen (rechts) Steckersystems	66
Abbildung 51: Prototyp des Verbindungssystems auf TURBO-Modulen montiert	67
Abbildung 52: a) Versuchsaufbau für den Biegeversuch und b) Verlauf der Durchbiegung	69
Abbildung 53: Gekoppeltes Verbindungssystem	70

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Übersicht über mechanische Schnittstellen von relevanten Verbindungen	29
Tabelle 2: Übersicht elektrischer Schnittstellen von relevanten Verbindungen.....	31
Tabelle 3: Anforderungsliste eines MRMM an das Verbindungssystem auf Basis des Projekts TURBO	34
Tabelle 4: Morphologischer Kasten	35
Tabelle 5: Übersicht des Konzepts M4Z.....	36
Tabelle 6: Vorteile und Nachteile des Konzepts M4Z.....	37
Tabelle 7: Übersicht des Konzepts M5Z.....	38
Tabelle 8: Vorteile und Nachteile des Konzepts M5Z.....	39
Tabelle 9: Übersicht des Konzepts MEB	40
Tabelle 10: Vorteile und Nachteile des Konzepts MEB	40
Tabelle 11: Übersicht des Konzepts ELB	41
Tabelle 12: Vorteile und Nachteile des Konzepts ELB	42
Tabelle 13: Paarweise Vergleich für die Gewichtung der Bewertungskriterien.....	45
Tabelle 14: Nutzwertanalyse für die Konzeptevaluierung.....	46
Tabelle 15: Übersicht über relevante Aluminiumlegierungen [45].....	51
Tabelle 16: Materialkosten für den Prototypen des Verbindungssystems	68

Anhang A: Anforderungsliste Projekt TURBO

Nr.	Beschreibung/ Name der Anforderung	Bezeichnung (Variable)	Zahlenwert (mit Toleranz)			Einh.	Gewicht	Ursprung / Erläuterung
			min.	exakt	max.			
1 Geometrie								
1	Außenmaße (Arm nicht ausgefahren)	LxHxB	200x200x200		1000x1000x1000	mm	mittel → 2	Min: damit TURBO für möglichst viele Use Cases und die Lehre geeignet ist. Max: um nicht klobig zu werden und um Kosten zu sparen.
2	Armreichweite	R	100.00		1.000.00	mm	mittel → 2	Min: Ausreichend groß für Beispiel Use Cases in Lehre. Max: Passend für großes Spektrum an wirtschaftlichen Anwendungen.
3	Stückzahl Gesamtsystem	Stück	2.00		Beliebig	1	mittel → 2	Min: Für Lehre werden zumindest ein paar TURBOs notwendig sein, 2 Stück um Modularität zu testen. Max: Da TURBO industrierelevant sein soll, muss es möglich sein, hohe Stückzahlen zu produzieren.
4	Anordnung extern	AVG Module	1.00		9.00	1	hoch ↑ 3	Die Anzahl der zusammenschaltbaren Systeme ist so zu wählen, dass größere Roboter für entsprechenden Aufgaben, z.B.: Transport, zusammengesetzt werden können.
5	Anordnung intern	Ebene Module	4.00		-	1	hoch ↑ 3	Beispiele für Module innerhalb eines AGVs: Fahrwerk, Elektronik (Steuerung), Energieversorgung (Akku), Sensorik (z.B. Laserscanner), Montageebene (für Roboterarm, Paletten, etc.) Mehrfaches Vorkommen möglich.
6	Anschluss extern	Schnittstellen	4.00		-	1	hoch ↑ 3	Fahrzeugschnittstellen an 4 Seiten um mehrere Module zusammenzuschließen. Elektrische Ladebuchse als Anschluss nach außen notwendig.
7	Anschluss intern	Kopplungen	-		-	1	hoch ↑ 3	Armkopplung, Sensorkopplung, Ebenenkopplung nach oben und unten. Für Arme und Sensoren ausreichend viele Schnittstellen vorsehen. Schnittstellen verwechslungssicher gestalten.
8	Ausbau	Abdichtung ggü. Umwelt					mittel → 2	IP Schutzart berücksichtigen für Arbeit im Freien, in staubbelasteter Umgebung und für Sicherheit beim Arbeiten.
9	Erweiterung						hoch ↑ 3	Es soll möglich sein, alle Grundmodule gegen andere austauschen zu können. Eine breite Auswahl an Armen, Sensoren und Fahrwerken soll zur Verfügung stehen.
2 Kinematik								
1 Bewegungsart								
1.1	Fahrssystem	Freiheitsgrade		3.00		1	mittel → 2	Freiheitsgrade pro AGV: 3 (x, y, α) Antriebe sind modulabhängig z.B.: Bereifung, Omidirektional, Ketten.
1.2	Roboterarm Einzelmodul	Freiheitsgrade	0.00		1.00	1	mittel → 2	Beispiele für Module: Greifer (Greifen, Sprühen, Schweißen, 3D-Drucken), Verlängerungen (0 Freiheitsgrade), Rotatorisch (Axial, Schwenken), Translatorisch (vgl. Teleskopstange, Autokran), Sensoren (Vision System, RFID, etc.)
2 Bewegungsrichtung								
2.1	Fahrssystem	A1	2.00		3.00	1	mittel → 2	Min: Ebene Bewegung + Drehung
2.2	Roboterarm	A2	3.00		7.00	1	hoch ↑ 3	Min: 3 Achsen genügen für manche Anwendungen. Max: 7 Achsen werden in vielen Anwendungen beobachtet.
3 Geschwindigkeit								
3.1	Fahrssystem	v1	0.00	0.35	1.50	m/s	mittel → 2	Min: Schrittgeschwindigkeit ist für eine universelle Nutzung sinnvoll. Max: die Maximalgeschwindigkeit wird durch das Bremsvermögen begrenzt. (Sicherheitskriterium)
3.2	Roboterarm	v2	0.00	0.25	0.75	m/s	mittel → 2	Min: für Mensch-Roboter-Kollaboration passende Geschwindigkeit kann oft reichen. Max: für beispielsweise Pick-and-Place Aufgaben sind hohe Geschwindigkeiten gewünscht um wirtschaftlich zu sein.
4 Genauigkeit								
4.1	Fahrssystem	y1	+/- 0,1		+/- 100	mm	mittel → 2	Min: Abhängig von Genauigkeiten der Sensorik und Regelung. Anfahrt zu einem Objekt soll gut funktionieren, z.B.: Selbstständiges zusammenschalten mit anderem Fahrzeug. Max: Über dGPS oder ähnliche Systeme soll die Position für Navigation im Freien erfassbar und nutzbar sein. Die Genauigkeit des Fahrsystems kann möglicherweise durch den Arm kompensiert werden.
4.2	Roboterarm	y2	+/- 0,1		+/- 10	mm	mittel → 2	
5 Beschleunigung								
5.1	Fahrzeug	a1			1.00	m/s^2	hoch ↑ 3	Min: Abhängig vom Fahrwerk für den entsprechenden Use Case. Max: Verzögerung beim Bremsen ist wichtiger als mögliche Beschleunigung. Aus Sicherheitsgründen kann das Fahrzeug idealerweise rutschend (mit blockierenden Reifen) zum Stehen kommen.
5.2	Roboterarm	a2			1.00	m/s^2	hoch ↑ 3	Notwendig für schnelles Arbeiten wie Pick-and-Place, Bremsen bei Kollision wichtig

Anhang A: Anforderungsliste Projekt TURBO

3 Kräfte und Massen							
1	Kraftgröße						
1.1	Greifkraft	Fg	70.00		140.00	N	mittel → 2 Hoch genug zu wählen, damit ein Objekt beim Heben nicht herausrutschen kann. Damit besteht eine Abhängigkeit zur Hebekraft.
1.2	Hebekraft	Fh	Traglast 3kg		-	N	mittel → 2 Stark abhängig davon welche Use Cases man erfüllen will und welche anderen Anforderungen die maximale Hebekraft beeinflussen, z.B.: Masse, Kosten.
1.3	Antriebskraft	Fa	-		-	N	mittel → 2 Ausreichend zu wählen im Hindernisse im Gelände und Steigungen überwinden zu können. Dies wirkt sich auf die Leistungsanforderungen der Elektronik aus.
2	Verformung Statisch	x(stat)	-			mm	niedrig ↓ 1 Um Genauigkeit des Roboterarms zu garantieren muss der Arm eine gewisse Steifigkeit aufweisen. Es ist notwendig ausreichende Sicherheit für die Festigkeit zu haben. Es ist speziell auf die Schnittstellen zu achten.
3	Federeigenschaften	k				kN/m	niedrig ↓ 1 Fahrwerksfederung ist wichtig für unebenen Untergrund.
4	Dämpfungseigenschaften	D					niedrig ↓ 1 Fahrwerksdämpfung wichtig für entsprechenden Untergrund sowie auch für einige Sensoren. z.B.: Umgebungserkennung ohne Erschütterungen einfacher.
5	Verformung Dynamisch	x(dyn)				mm	mittel → 2 Federweg des Fahrwerk ist beispielsweise für Nutzbarkeit von Sensoren und Transport von Objekten passend zu wählen. Verschiebungen innerhalb des Systems aufgrund von Kräften darf nicht zu Problemen führen.
6	Stabilität						mittel → 2 Gesamtsystem ist stabil genug auszulegen, um auch mit mehreren verbundenen Elementen im Gelände fahren zu können und alle auftretenden Kräfte übertragen zu können.
7	Eigengewicht	m(E)	-	20.00	50.00	kg	niedrig ↓ 1 Min: Bezüglich Verbrauchsoptimierung ist es gut auf Leichtbau zu setzen. Oft geht geringe Masse und Größe auch mit Kosteneinsparung einher. Max: Maximalgewicht soll nicht zu groß werden, damit TURBO noch von Menschen transportiert werden kann.
8	Tragfähigkeit	m(T)	100.00	-	-	kg	niedrig ↓ 1 Stark abhängig von Use Case, vor allem das Fahrwerk muss hier berücksichtigt werden.
4 Energie							
1	Elektrische Leistung	P				W	mittel → 2 Min: Antriebsleistung, um gut durch das Gelände zu kommen. Max: maximale Systemleistung muss definiert werden um Kabel, Sicherungen etc. entsprechend zu wählen.
2	Energiespeicherkapazität	C				Wh	mittel → 2 Min: Ausreichend, um zwischen Ladezyklen Use Cases verrichten zu können. Max: Ausreichend für lange Fahrzeiten um Arbeitsort zu erreichen oder Zwischenladung im freien arbeiten zu können. Dazu die Verschalten mehrerer Akkus möglich halten.
3	Elektrische Spannung	U	12.00		<60	V	hoch ↑ 3 Min: Systemspannung für einige Antriebssysteme Max: Maximalwert in jedem Zustand, um ohne besondere Sicherheitsmaßnahmen daran arbeiten zu dürfen. Achtung: Nominalspannung einer Batterie ist weit niedriger als maximal mögliche Spannung. Akkorik entsprechend der Batterieauslegung richtig wählen.
4	Elektrischer Strom	I				A	hoch ↑ 3 Max: maximaler Strom muss definiert werden um Kabel, Sicherungen etc. entsprechend zu wählen.
5	Temperatur (Betriebstemperatur)	T	0.00		40.00	°C	mittel → 2 Min: Minustemperaturen stellen viele Herausforderungen dar, daher ist die Nutzung über 0°C angedacht. Max: Überhitzung im Sommer im Freien soll verhindert werden.
6	Effizienz und Wirkungsgrad						hoch ↑ 3 Verbrauchsoptimierung durch Leichtbau beim Roboter und spezieller Steuerungstechnik.
5 Stoff							
1	Baumaterialien	-	-	-	-	-	hoch ↑ 3 Fokus auf nachhaltige Materialien. 3D-Druck mit passenden Materialien nutzen. Sortenreine Materialien wegen Recycling wählen.
2	Hilfsstoffe (ÖL, Kühlmittel...)	-	-	-	-	-	hoch ↑ 3 Möglichst vermeiden, um Wartbarkeit zu vereinfachen. Verschmutzung der Umwelt minimieren.
6 Signal							
1	Ein- und Ausgangssignale						hoch ↑ 3 Kommunikation zu anderen Maschinen: WLAN/Bluetooth, ...
2	Anzeigeart						mittel → 2 Kommunikation zu Menschen: Signalton, Signallicht, Bildschirm, ...
3	Betriebs- und Überwachungsgeräte						hoch ↑ 3 Sensorische Erfassung der Umwelt: Abstand, Kollision, ...
4	Schnittstellen						Muss mit sich selbst Koppelbar sein (vgl. SBahn), Wartungsfrei,
4.1	Mechanisch						hoch ↑ 3 Stabile Arretierung zwischen den Modulen, Werkzeuglos, hohe Steifigkeit (für Positioniergenauigkeit etc.)
4.2	Elektrisch						hoch ↑ 3 Leistungsversorgung des Moduls und aller Folgemodule, minimale Impedanz
4.3	Information						hoch ↑ 3 Gängige Kommunikationsstandards, Ethernet-Basiert (TCP/IP), Managed Switch innerhalb des Moduls, Netzwerkarchitektur unabhängig von der Anzahl der Module, saubere Netzwerktrennung

Anhang A: Anforderungsliste Projekt TURBO

7 Sicherheit										
1	Unmittelbare Sicherheitssysteme						hoch	↑	3	Not-Aus-System, Kollisions- und Personenerkennung, Bremssystem, Warneinrichtung
2	Schutzsysteme						hoch	↑	3	Elektrische Sicherungen, Berührungsschutz bei Elektronik und Fahrwerk,
3	Betriebs- / Arbeits- / Umweltsicherheit						hoch	↑	3	EMV- und CE-Normen beachten
8 Ergonomie										
1	Bedienbarkeit						hoch	↑	3	Selbstständige Rekonfiguration des Systems durch intelligente Module Module identifizieren sich selbst (e.g. I4.0 Komponente), Kinematik dahinter wird automatisch aufgebaut. Werkzeuglose De- & Montage. Automatischer und manueller Modus bei Nutzung.
2	Übersichtlichkeit						hoch	↑	3	Beschriftungen, gute Zugänglichkeit für Wartung und Umbau, gut erkennbares Warn- und Sicherheitssystem.
3	Formgestaltung						hoch	↑	3	Modularer Aufbau in Ebenen. Einfach herstellbare Formen. Keine scharfen Kanten. Geschützte bewegliche Teile (Fahrwerk).
9 Gebrauch										
1	Geräuscharm	Lautstärke	45.00		60.00	dBa	niedrig	↓	1	Angenehm für Personen in der Nähe, auch in ruhigen Räumen.
2	Wartbarkeit						mittel	→	2	Verschleiß und Korrosion beachten, gute Zugänglichkeit von Elektronik und Akku.
3	Anwendungsgebiet						hoch	↑	3	TURBO soll für möglichst breites Spektrum an Use Cases zur Verfügung stehen.
4	Anwendungsort						mittel	→	2	Gebäude, Straße, Feld, Wiese, etc.
5	Zuverlässigkeit						hoch	↑	3	Da die Nutzung für Kunden möglichst einfach gemacht werden soll, ist hohe Zuverlässigkeit notwendig. Entsprechende Tests könnten dies untersuchen.
6	Benutzbarkeit						hoch	↑	3	TURBO muss für Kunden mit Anleitung und Dokumentation betreibbar sein.
7	Änderbarkeit / Modularität						hoch	↑	3	Werkzeuglos steckbare Module (Bajonetverschluss etc.) -> Symmetrische Schnittstelle (vgl. S-Bahn) Mehrere Module zu Roboter kombinierbar: Roboterbaukasten – so dass unterschiedliche Anwendungen machbar sind. Kleines Minimalmodell (1FTS, 1 Arm), mehrere zusammen für größere Aufgaben Software darauf angepasst: In Modul integrierte Steuerung. Beim Ausfall vom System -> Lösung ohne dieses suchen (1 Arm kaputt). Kinematisches Modell verbindet Module, Programm erstellt für Anforderungen selbst seine Bauvarianten
8	Mensch-Machine-Interface						hoch	↑	3	TURBO muss eine möglichst einfache und intuitiv nutzbare Bedienoberfläche zur Programmierung, Steuerung und Kommunikation besitzen
10 Recycling										
1	Wiederverwendung						hoch	↑	3	Mit langlebigen Bauteilen ist Wiederverwendbarkeit von Modulen in unterschiedlichen Konfigurationen möglich. Komponenten reparaturfähig und austauschbar zu gestalten kann viele Ressourcen sparen.
2	Wiederverwertung						hoch	↑	3	Sortenreines Recycling durch vollständige Demontage und Materialien-Trennung.
3	Entsorgung						hoch	↑	3	Möglichst Materialien und Bauteile verwenden, welche durch Kreislaufwirtschaft wiederverwendet werden können. So wenig thermische Verwertung und Deponie-Endlagerung wie möglich.
11 Kosten										
1	Herstellungskosten gesamt	KH	0.00		5.000-10.000	€	hoch	↑	3	Exakt: Orientiert an kleinem Minimalmodell für den Lehrbetrieb: 1 Fahrsystem + Arm Max Wert gewählt um andere Produkte finanziell zu unterbieten, durch Eigenentwicklung und kompakte Form ermöglicht.
12 Termin										
1	Ende der Entwicklung					Jahre	niedrig	↓	1	
2	Lieferzeiten von Komponenten				12.00	Wochen	mittel	→	2	Komponenten sollen hohe Verfügbarkeit und kurze Lieferzeiten haben. Idealerweise lagernd bei Großhändlern.
3	Durchlaufzeit eines TURBO		9.00		18.00	Wochen	mittel	→	2	Ein neuer TURBO soll im Rahmen von Lehrveranstaltungen oder von Studententeams in einem Studiensemester herstellbar sein.
4	Meilenstein 1									Diplomarbeiten abgeschlossen und fertiger Entwurf.
5	Meilenstein 2									Detailaufgaben sind definiert und Entwicklung kann in kleineren Schritten ausgearbeitet werden. Vorbereitungen für Robotik Studiengang sind abgeschlossen.
							hoch		33	
							mittel		24	
							niedrig		7	