



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
WIEN

Diplomarbeit

Systemintegration und Gesamtentwurf eines modular aufgebauten mobilen Roboters

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines

„Diplom-Ingenieurs“ unter der Leitung von

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

Institut für Konstruktionswissenschaften und Produktentwicklung

eingereicht an der Technischen Universität Wien

Fakultät für Maschinenwesen und Betriebswissenschaften

von

Philipp Zorn

01526987

Ort, Datum

Unterschrift



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
WIEN

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

Diplomarbeit

nur mit Bewilligung der Prüfungskommission berechtigt bin.

Ich erkläre weiters 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.

Ort, Datum

Unterschrift

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich allgemein bei all denjenigen bedanken, die mich bei der Anfertigung dieser Diplomarbeit unterstützt haben.

Zuerst möchte ich mich bei meinen Eltern bedanken, die durch ihre emotionale und finanzielle Unterstützung, mein Studium erst ermöglicht haben.

Auch meinen Brüdern Markus und Michael und meiner Freundin Eva möchte ich für ihre Hilfe und Motivation danken.

Weiters gilt dieser Dank Professor Grafinger für die Betreuung und Unterstützung während der Erstellung meiner Arbeit. Auch bei meinen Kollegen des Projektes *TURBO* und bei allen anderen die bei der Entwicklung und Umsetzung mitgewirkt haben ich mich bedanken. Dabei möchte ich Maximilian Papa, Alexander Kinzer, Manuel Buchberger und Ernst Kubr besonders hervorheben, welche aufgrund vieler Diskussionen und deren Feedback, einen wesentlichen Teil zur Fertigstellung meiner Arbeit beigetragen haben.

Kurzfassung

In der Industrie werden Roboter eingesetzt, um den Menschen wiederholende Arbeiten abzunehmen oder in Kooperation die Arbeit zu erleichtern. Diese Roboter werden somit in Abhängigkeit von den Aufgaben und der Umgebung ausgewählt und sind in Bezug auf Änderungen dieser Randbedingungen relativ unflexibel. Die modulare Robotik hingegen hat ihre Stärken vor allem in dem großen Anwendungsfeld, welches sich aufgrund der Anpassbarkeit an unterschiedliche Umgebungen und Aufgaben ergibt. Um diesen Vorteil optimal nutzen zu können, müssen der Aufbau und die Modularisierung gut durchdacht sein.

In dieser Arbeit wird ein Gesamtentwurf eines modular aufgebauten mobilen Manipulators unter Berücksichtigung von Subsystemen behandelt. Diese Arbeit erfolgt im Rahmen des Projektes *TURBO* der TU Wien, welches Raum für weitere Arbeiten im Bereich der Entwicklung und Programmierung eines solchen Roboters geschaffen hat.

Der Produktentwicklungsprozess orientiert sich an der VDI-Richtlinie 2221 und somit steht das methodische Vorgehen im Mittelpunkt. Bei modularen Aufbauten sind vor allem die Form, die Größe und der Funktionsumfang der einzelnen Module entscheidend für die möglichen Konfigurationen und müssen daher gezielt gewählt werden. Die Wahl dieser Charakteristika beeinflusst die Anzahl der benötigten Schnittstellen, welche sich unter anderem stark auf die Kosten und die Steifigkeit des Gesamtsystems auswirken. An diesen Schnittstellen werden je nach Modul verschiedene Anforderungen gestellt. Bei manchen Schnittstellen ist es notwendig einen Energie-, Informations- und Kraftfluss zu übertragen. Um aber die Konfigurationsmöglichkeiten durch verschiedene Schnittstellen nicht einzuschränken und um eine einfache Zusammenbaubarkeit zu gewährleisten, wird eine einheitliche Schnittstelle angestrebt. Diese Standardisierung kann dazu führen, dass die Schnittstelle für manche Module, hinsichtlich mechanischer und elektrischer Eigenschaften, überdimensioniert ist. Im Gegensatz dazu stehen das einfache Austauschen defekter Komponenten und die daraus resultierenden kurzen Reparaturzeiten.

Um den modularen Aufbau zu testen, wird ein Prototyp mit mehreren Modulen gebaut. Damit können außerdem Versuche zur Bewertung des Fahrverhaltens durchgeführt werden und es wird Möglichkeit geboten, Ergebnisse von noch folgenden Arbeiten zu validieren.

Abstract

In industry, robots are used to relieve people of repetitive work or to facilitate work in cooperation. These robots are thus selected depending on the tasks and the environment and are relatively inflexible regarding to changes of these boundary conditions. Modular robotics has its strengths primarily in the wide field of application, which results from its adaptability to different environments and tasks. To exploit this advantage fully, the structure and modularization must be thought through well.

In this thesis, an overall design of a modular mobile manipulator is created, taking subsystems into account. This work is done in the context of the project *TURBO* of the TU Vienna, which has created space for further work in the field of development and programming of such a robot.

The product development process is based on the VDI guideline 2221 and therefore the focus is on a methodical approach. In the case of modular structures, the shape, size, and range of functions of the individual modules are decisive for the possible configurations and must therefore be determined. The choice of these characteristics influences the number of interfaces required, which among other things have a strong effect on the costs and the rigidity of the overall system. Depending on the module, different requirements are placed on these interfaces. With many interfaces it is necessary to transmit a flow of energy, information, and power. To not restrict the configuration options and to ensure simple assembly, a standardization of the interfaces is desired. This results in oversized interfaces, regarding mechanical and electrical properties, of modules with lower demands. The large number of interfaces leads to more components and increased susceptibility to errors. An advantage of these modular structures is the simple replacement of defective components if they should fail and the resulting short time for repairing.

Finally, a prototype of a configuration with low complexity is made to test the modular structure and the driving behavior of the system. This prototype can easily be expanded, and students working in this project can use it to test their findings of their theses.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Vom Automaten zum Projekt <i>TURBO</i>	1
1.2	<i>TURBO</i> - TU Wien Robot	2
1.3	Aufgabenstellung.....	3
1.4	Forschungsfragen	5
1.5	Aufbau und Struktur der Arbeit.....	5
2	Grundlagen mobiler modularer Roboter	7
2.1	Produktstrukturstrategie bei der Produktentwicklung	8
2.2	Modulbauweise und Modularität.....	10
2.3	Rekonfigurierbarkeit von Robotern.....	11
2.3.1	Manuell konfigurierbar und selbst rekonfigurierbar	11
2.3.2	Modulformen: Homogener und heterogener Aufbau	12
2.4	Umgebung und Antrieb	13
2.5	Sensorik von mobilen Manipulatoren	13
2.6	Sicherheitstechnik mobiler Manipulatoren.....	15
2.7	Stabilität mobiler Manipulatoren	16
3	Umsetzung modular aufgebauter Roboter	17
3.1	Ähnliche Lösungsansätze für die Problemstellung.....	17
3.1.1	Thor Robot.....	17
3.1.2	WMR - Modularer Roboter mit Reifen.....	18
3.1.3	Wabenroboter	19
3.2	Ausweitung der Modularität auf die Software.....	21
3.3	Reflektion der Umsetzung des modularen Aufbaus bei mobilen Robotern	22
4	Verwendete Methoden und Hilfsmittel	23
4.1	CAD als Konstruktionsgrundlage	23

4.2	Funktionale Sichtweise und Teilung der Aufgabe	24
4.3	Bewertungsmethoden der Produktentwicklung	25
5	Methodische Umsetzung der Module	27
5.1	Allgemeine Anforderungen des mobilen Manipulators	27
5.2	Modulformen und deren Auswirkungen	30
5.2.1	Bewertungskriterien der Modulformen	31
5.2.2	Paarweiser Vergleich der Bewertungskriterien	31
5.2.3	Nutzwertanalyse der Modulformen	33
5.2.4	Schwachstellenanalyse der Modulformen	35
5.3	Verbinder und deren Einflüsse auf die Konfigurierbarkeit	36
5.3.1	Verbinder in rotationssymmetrischen Anordnungen	37
5.3.2	Verbinder mit rotierbaren Mechanismen	38
5.4	Funktionsstruktur des mobilen Manipulators	40
5.5	Produktstruktur des mobilen Manipulators	43
5.6	Abschätzung der Modulgröße	45
5.7	Funktionsabhängige Modularisierung	46
5.7.1	Antriebs- und Lenkmodul für einen Differentialantrieb	46
5.7.2	Akkumulatoren und Ladesystem	48
5.8	Kippsicherheit verschiedener Konfigurationen	49
5.8.1	Annahmen bei der Schwerpunktanalyse	49
5.8.2	Kippberechnung verschiedener Konfigurationen	52
6	Baugruppen-Umsetzung im CAD	64
6.1	Parametrisiertes Entwurfsmodell	64
6.2	Baukastensystem zur Erstellung von Konfigurationen	65
7	Prototypenbau	67
8	Diskussion und Ausblick	70

8.1	Ergebnisse der Modulform und Modulgröße.....	70
8.2	Auswirkungen der Verbinder auf die Modularität	70
8.3	Ableitbare Anforderungen an die Verbinder	71
8.4	Maßnahmen zur Kippvorbeugung.....	72
8.5	Nächste mögliche Schritte der Weiterentwicklung.....	72
9	Literaturverzeichnis	73
10	Abbildungsverzeichnis	79
11	Tabellenverzeichnis	81
12	Nomenklatur und Abkürzungen	82
13	Anhang.....	84
13.1	Anforderungsliste	85
13.2	Matlab Code der Berechnung.....	88

1 Einleitung

Im Zuge des interdisziplinären Projekts *TURBO* der TU Wien befassen sich bereits mehrere Arbeiten mit der Entwicklung eines modularen und manuell rekonfigurierbaren mobilen Manipulators. Basierend auf diesen Arbeiten wird die Realisierung des Roboters angestrebt. Diese Arbeit behandelt im Speziellen den Gesamtentwurf des Roboters und die Systemintegration. Anforderungen für andere Arbeiten werden von Modellen des Gesamtsystems abgeleitet und Ergebnisse anderer Arbeiten mit Hinblick auf deren Kompatibilität und Zusammenbaubarkeit geprüft. Auch die Grundkonzepte der Umsetzung der Verbinder und die Auswirkungen auf das Gesamtsystem werden behandelt. Weitere Arbeiten im Projekt *TURBO* setzen sich unter anderem mit einzelnen Modulen, der Umsetzung der Verbinder und der Steifigkeit des Systems auseinander. Bei den einzelnen Modulen handelt es sich um eine Art Bausteine, welche in verschiedenen Konfigurationen zusammengebaut werden können und somit ein großes Anwendungsfeld des Gesamtsystems ermöglichen. Im Fachbereich der Informatik werden noch weitere Arbeiten folgen, welche sich mit der Steuerung und Programmierung des Roboters befassen. Diese Themen werden aber hier nicht weiter behandelt.

1.1 Vom Automaten zum Projekt *TURBO*

Der Grundstein der Robotik wurde schon im Altertum mit den ersten Automaten gelegt. Bei Automaten handelt es sich um Maschinen, welche beispielsweise bei Änderung einer physikalischen Größe einen gewissen definierten Bewegungsablauf ausführen [1]. Automaten können sich in der Regel nicht an sich ändernde Umgebungen anpassen und deren Einsatzgebiet ist damit eingeschränkt. Im Unterschied zu den Automaten besitzen Roboter einen größeren Umfang an Verhaltensformen und auch einen höheren Grad an Autonomie. Außerdem ist ein Roboter programmierbar und kann selbstständig mit seiner Umgebung interagieren [2]. Um den Arbeitsraum und den Funktionsumfang der Roboter zu erhöhen, können diese auf eine im Raum bewegliche Basis montiert werden. Die Umsetzung der mobilen Basis erfolgt entweder in Form einer mobilen Roboterplattform oder als klassisches fahrerloses Transportsystem. Eine mobile Roboterplattform kann, je nach Antriebssystem, eine uneingeschränkte Bewegung im Raum ermöglichen. Fahrerlose Transportsysteme sind in der VDI 2510 wie folgt definiert. „*Fahrerlose Transportsysteme (FTS) sind innerbetriebliche,*

flurgebundene Fördersysteme mit automatisch gesteuerten Fahrzeugen, deren primäre Aufgabe der Materialtransport, nicht aber der Personentransport ist.“ [3, S. 6]

Das Projekt *TURBO* hat sich die Entwicklung und Umsetzung eines solchen mobilen Manipulators als Ziel gesetzt. Der zu entwerfende mobile Manipulator muss mit einer Sensorik ausgestattet sein, welche die Umgebung wahrnimmt und mit Hilfe von Aktuatoren mit dieser interagiert. Ein rekonfigurierbarer modularer Aufbau macht eine Anpassung an zu bewältigende Aufgaben und eine sich ändernde Umgebung möglich. Unter einem modularen Aufbau wird die Aufteilung eines Gesamtsystems in einzelne Funktionseinheiten und deren Wechselwirkungen zueinander verstanden. Eine entscheidende Rolle spielen die Verbinderelemente zwischen den Modulen, da neben der mechanischen Verbindung auch die Übertragung von Energie und Signalen ermöglicht werden muss. Eine Standardisierung dieser Schnittstelle in einem System ermöglicht eine große Anzahl an Konfigurationen, bringt aber Nachteile mit sich, welche in dieser Arbeit noch erörtert werden. Modulare Systemstrukturen haben aufgrund ihrer Flexibilität gegenüber herkömmlichem Produktdesign auch im Bereich der Robotik ihre Berechtigung. Ein modularer Aufbau führt zu einer höheren Performance des Produktes, ohne dabei die Kosten überproportional zu erhöhen [4]. Darüber hinaus werden auch bei sich oft ändernden Komponenten die Entwicklungskosten gesenkt, weil einzelne bestehende Module unabhängig voneinander betrachtet und überarbeitet werden können, ohne dass am Gesamtsystem Änderungen vorgenommen werden müssen [5].

1.2 *TURBO* - TU Wien Robot

Die *Pilotfabrik Industrie 4.0* [6] der TU Wien forscht an zukünftigen Entwicklungen der intelligenten Produktion von industriellen Gütern. Die immer weiter voranschreitende Vernetzung aller Prozesse führt dazu, dass Arbeitsschritte nicht mehr einzeln betrachtet werden können und ein Informationsfluss zwischen den beteiligten Maschinen stattfindet, um den gesamten Produktionsablauf überwachen und optimieren zu können. Mit drei beteiligten Instituten der TU Wien hat die *Pilotfabrik Industrie 4.0* das Projekt *TURBO* ins Leben gerufen, welches einen modular aufgebauten, mobilen Manipulator hervorbringen soll. Beteiligt sind das Institut für Fertigungstechnik (IFT), das Institut für Managementwissenschaften (IMW) und das Institut für Konstruktionswissenschaften und Produktentwicklung mit dem Forschungsbereich Maschinenbauinformatik und Virtueller Produktentwicklung (MIVP). Der

Roboter soll für den Einsatz in der Industrie konzipiert sein und im Bereich der Forschung und Lehre eingesetzt werden. Das Projekt *TURBO* ist ein interdisziplinäres Vorhaben, welches Arbeiten sowohl in den technischen Fachbereichen Maschinenbau, Elektrotechnik und Informatik, als auch in wirtschaftlichen Fachbereichen vergibt. Da es sich hier um ein Projekt mit vielen Beteiligten und einer langen Laufzeit handelt, ist eine gute Kommunikation und Dokumentation notwendig. Damit wird die Einarbeitungszeit von Neueinsteigern verringert und die gewonnenen Informationen sind für die Beteiligten jederzeit abrufbar und nachvollziehbar.

Die Industrie 4.0 macht eine ressourcenschonende und effiziente Produktion möglich und kann die Kosten senken. Das Monitoring der Abläufe schafft für das Unternehmen den notwendigen Überblick und zeigt so bei der Analyse mögliche Optimierungen auf. Außerdem kann auf Veränderungen, welche durch sich ändernde Anforderungen des Kunden an das Produkt entstehen, rasch eingegangen und die Produktion angepasst werden. Diese Anpassungen können bei vernetzten Produktionsanlagen automatisch mit den gesammelten Informationen vorgenommen werden. Wichtig für die erfolgreiche Umsetzung der *Industrie 4.0* sind in diesem Zusammenhang die Arbeitsorganisation, der Datenschutz und die IT-Sicherheit. [7]

Die digitale Vernetzung, welche sich über alle Phasen des Produktlebenszyklus erstreckt, kann von Unternehmen unterschiedlich genutzt werden und soll zu einer ressourcenschonenden Kreislaufwirtschaft beitragen. Der Einsatz der Informationen der Maschinen kann beispielsweise zur Optimierung der Maschinenauslastungen genutzt werden. In der *Industrie 4.0* wird auch an wandelbaren, modular aufgebauten Fabriken geforscht, welche sich an neue Aufgaben und Umgebungen anpassen können. Der Einsatz der gesammelten Daten kann auch zur Optimierung der Logistik genutzt werden. Sind die Produkte auch in der Phase der Nutzung vernetzt, so können neue Services im Bereich der Wartung angeboten werden, welche beispielsweise regelmäßig den eigenen Zustand an ein zentrales Element übermitteln und wenn notwendig, eine Wartung oder Abschaltung anordnen. [8]

1.3 Aufgabenstellung

Zentrales Element dieser Arbeit ist der Gesamtentwurf des Roboters im CAD unter Berücksichtigung und Miteinbeziehung aktuell laufender Arbeiten im Projekt *TURBO* und

deren Ergebnisse und Erkenntnisse. Aus dem Gesamtentwurf folgen auch Anforderungen an Komponenten, welche im Rahmen dieser Arbeit dokumentiert werden. Der modulare Aufbau ist ein wesentlicher Bestandteil dieser Arbeit. Dieser ermöglicht eine hohe Anpassbarkeit an neue Aufgaben oder ein sich änderndes Umfeld. Bei einer modularen Systemstruktur ist die Wahl der Funktionsumfänge, Formen und Größen der einzelnen Module entscheidend für die Eigenschaften des Gesamtsystems. Es sollen hier sinnvolle Formen und deren Grenzen gefunden werden, um eine große Anzahl an Konfigurationen zu ermöglichen, ohne überflüssige Schnittstellen zu schaffen. Systeme mit kleinen Modulen und einem geringen Funktionsumfang führen im Gegensatz zu Systemen mit größeren Modulen in der Regel zwar zu mehr möglichen Konfigurationen, erhöhen aber auch die Anzahl an Bauteilen. Durch die zusätzlichen Bauteile steigen die Fehleranfälligkeit und das Gewicht. Einzelne Bauteile können bei etwaigen Reparaturen einfach und schnell ersetzt werden. Als zusätzliche Bedingung für die Wahl einer geeigneten Modulform ist eine ausreichend hohe Steifigkeit des Gesamtsystems zu nennen. Dafür maßgebend sind die Steifigkeiten der einzelnen Module und Verbinder.

Für die Fortbewegung des mobilen Manipulators werden Antriebsmodule benötigt, wobei hier noch keine Unterscheidung getroffen wird, ob die Räder angetrieben sind oder als Aufstandspunkt oder Lenkrolle dienen. Es gibt eine Vielzahl an unterschiedlichen Antriebsmöglichkeiten, welche im Bereich der mobilen Robotik in Frage kommen. Darüber hinaus muss der Roboter über einen Boardcomputer und eine Stromversorgung verfügen. Ob die genannten Funktionen von einzelnen Modulen als Kombination kleinerer Module mit eingeschränktem Funktionsumfang oder in größeren Modulen untergebracht werden, muss durch sinnvolle Wahl der Modulgrenzen festgelegt werden. Auch eine Verbindung für einen Roboterarm, welcher in noch folgenden Arbeiten entworfen werden soll, ist vorzusehen. Die einfache Erweiterbarkeit des Roboters bietet eine gute Grundlage für die Entwicklung weiterer Module durch studentische Arbeiten. Eine Standardisierung der Verbindung zwischen den Elementen führt zu einer einfachen Erweiterbarkeit und zu vielen Konfigurationen. Ändert sich allerdings, beispielsweise aufgrund einer technischen Neuerung die Schnittstelle, so ist es notwendig alle Verbinder auszutauschen und das kann zu hohen Kosten führen. Da die Verbinder einen komplexen Aufbau aufweisen und deren Herstellkosten einen wesentlichen Teil der Gesamtkosten des Roboters ausmachen, werden diese in einer weiteren Arbeit eines Kollegen im Rahmen des *TURBO* Projektes behandelt.

Ein modularer Aufbau bei Robotern hat außerdem den Vorteil, dass eine Erweiterung mit noch unbekanntem Modulen möglich ist. Dies lässt viel Spielraum für zukünftige Entwicklungen und Versuche, welche durch die Vielseitigkeit des modularen Aufbaus profitieren. Verschiedene Sensormodule für alle möglichen Einsatzzwecke sind vorstellbar und es soll deshalb eine Anbindung geschaffen werden, welche diese Erweiterung zulässt.

1.4 Forschungsfragen

- Wie wird der modulare Aufbau in der Robotik in aktuellen Projekten gelöst und vor welche Herausforderungen werden die Entwickler gestellt?
- Welche Anforderungen werden aktuell an mobile Manipulatoren gestellt?
- Wie ist in diesem Projekt die Umsetzung der Anforderungen des zu entwerfenden modular aufgebauten mobilen Manipulators möglich und welche Problematiken treten auf? Wie kann das System hinsichtlich der Modulgrößen und Modulfunktionalitäten sinnvoll aufgebaut werden?

1.5 Aufbau und Struktur der Arbeit

Die VDI-Richtlinie 2221 [9] mit dem Titel *Entwicklung technischer Produkte und Systeme* beschreibt allgemein das methodische Vorgehen bei der Produktentwicklung. Pahl et al. [10, S. 194] hat diese Richtlinie speziell für den Maschinenbau überarbeitet und teilt den Entwicklungs- und Konstruktionsprozess in folgende Hauptphasen ein:

- Planen und Klären der Aufgabenstellung
- Konzipieren
- Entwerfen
- Ausarbeiten.

Oftmals ist hier keine klare Trennung der Hauptkategorien möglich und es kann zu einem Vorgehen oder Rückspringen kommen. Diese Arbeit orientiert sich an der beschriebenen Vorgehensweise von Pahl et al., um eine methodische und strukturierte Produktentwicklung durchzuführen. Die einzelnen Hauptphasen setzen sich meist aus mehreren Arbeitsschritten zusammen und beinhalten unter anderem Informieren und Suchen, und Berechnen. Auch indirekte Tätigkeiten wie Besprechen, Besichtigen und Vorbereiten sind beinhaltet. Diese

erfolgen im Rahmen dieser Arbeit meist in Meetings mit Kollegen, welche parallel an ihren Arbeiten im Projekt *TURBO* schreiben. Kommunikation ist bei interdisziplinären Projekten ein wichtiger Bestandteil, um möglichst alle relevanten Gesichtspunkte im Gesamtentwurf zu berücksichtigen. Die Ergebnisse der Hauptphasen sind meist mit Entscheidungsschritten verbunden und müssen begründet und dokumentiert werden, um deren Nachvollziehbarkeit sicherzustellen.

Der Entwicklungs- und Konstruktionsprozess führt in der Regel bei einem strikten Durchlauf der Hauptphasen zu keinem zufriedenstellenden Ergebnis, da nach Abschluss der Hauptphasen keine Eigenschaftsprüfung erfolgt. Eine Prüfung der Ergebnisse auf die Einhaltung der Vorgaben in kurzen Abständen führt zum Vor- und Rückspringen oder Wiederholen von Tätigkeiten. Die dadurch entstehenden Schleifen garantieren die Eigenschaftsabsicherung und verhindern das Verfehlen von Vorgaben [11, S. 11-23]. In Abbildung 1 ist dieses Vorgehen und das zugrunde liegende V-Modell dargestellt.

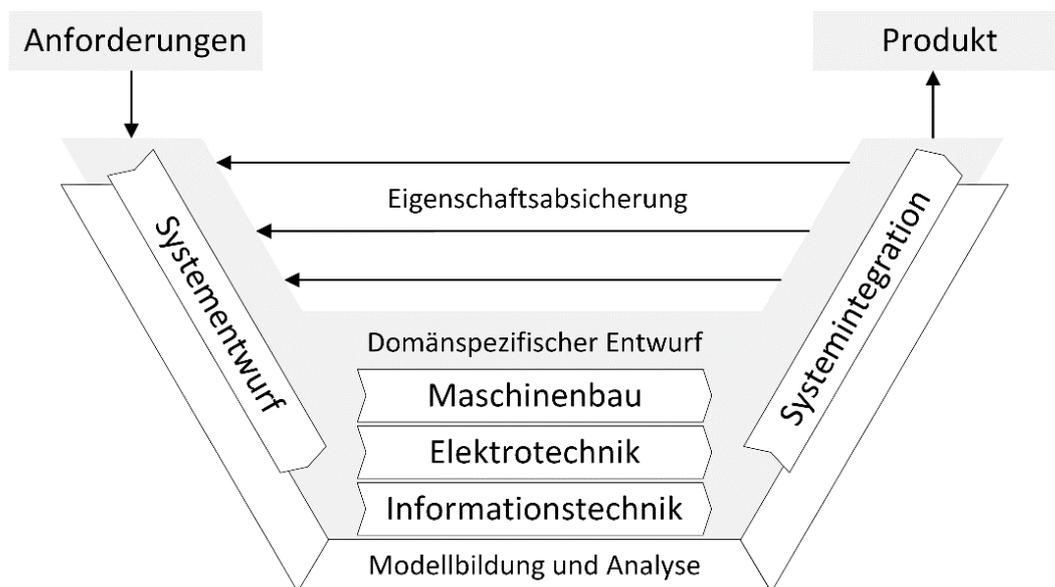


Abbildung 1 - Modifiziertes V-Modell nach VDI 2206 [12]

2 Grundlagen mobiler modularer Roboter

Das Wort *Roboter* hat seinen Ursprung im Tschechischen und ist mit dem deutschen Wort „Arbeit“ verwandt. Der Begriff hat sich im Laufe der Zeit für Handhabungsgeräte, die immer komplizierter und universeller wurden, durchgesetzt und heute existieren mehrere Definitionen. Beispielsweise werden in der VDI Richtlinie 2860 im Speziellen Industrieroboter wie folgt definiert:

„Industrieroboter sind universell einsetzbare Bewegungsautomaten mit mehreren Achsen, deren Bewegungen hinsichtlich Bewegungsfolge und Wegen bzw. Winkeln frei (d.h., ohne mechanischen Eingriff) programmierbar und ggf. sensorgeführt sind. Sie sind mit Greifern, Werkzeugen oder anderen Fertigungsmitteln ausrüstbar und können Handhabungs- und/oder Fertigungsaufgaben ausführen.“ [13, S. 16]

Eine Kategorisierung von Robotern wurde 2018 von Kopacek [14] erstellt und in Anlehnung an diese ist in Abbildung 2 eine modifizierte Version abgebildet. Für diese Arbeit ist diese Einteilung interessant, da ein mobiler modularer Manipulator entworfen werden soll, und dieser gleich in mehrere dieser Kategorien fällt. In den ersten Varianten wird der Roboter sehr wahrscheinlich über Räder verfügen, wodurch dieser somit in die Kategorie der klassischen mobilen Roboter fällt. Die Entwicklung des Roboterarms wird zwar erst stattfinden, aber die Tendenz in Richtung eines Kooperativen Roboters hat sich schon abgebildet. Der Roboter soll später auch in der Industrie eingesetzt werden können, auch wenn derzeit der Fokus noch auf dem Einsatz im wissenschaftlichen Bereich liegt.

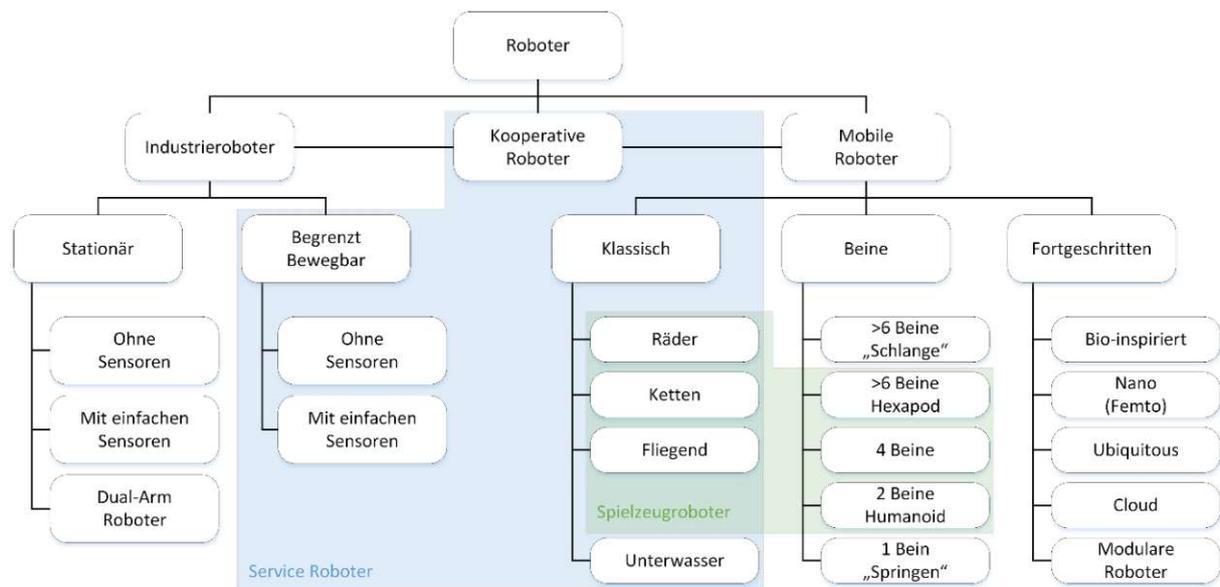


Abbildung 2 - Modifizierte Kategorisierung von Robotern [14, S. 131]

Unter einem mobilen Manipulator wird grundsätzlich ein mobiler serieller Roboter verstanden, welcher sowohl die Vorteile der Mobilität als auch jene der anwendungsanpassbaren Manipulation aufweist. Der Grad der Autonomie ist vom Anwendungsfall abhängig. Durch den modularen Aufbau kann der Roboter an den sich ständig ändernden Markt und auf die damit zusammenhängenden variablen Umgebungsbedingungen und die verschiedenen Aufgaben angepasst werden. Die Modulbauweise führt zu geringeren Stillstandszeiten bei Reparaturen, da ein rasches Austauschen von einzelnen defekten Modulen möglich ist. Außerdem stellt die manuelle Konfigurierbarkeit sicher, dass der Roboter für ein größeres Anwendungsfeld geeignet ist. [15, S. 48]

2.1 Produktstrukturstrategie bei der Produktentwicklung

Die Produktstrukturstrategie ist aufgrund ihrer Auswirkungen auf die Prozesse aller Produktlebensphasen ein wesentlicher Punkt bei der Produktentwicklung und beschreibt den Aufbau eines Produktes aus Komponenten und deren Verknüpfungen untereinander. Wird eine modulare Produktstruktur bei der Produktentwicklung angestrebt, so gilt es bestimmte Komponenten des Systems zu Modulen zusammenzufassen und vom Rest des Systems zu trennen. [16, S. 128]

Abbildung 3 zeigt das modifizierte Produktstrukturstrategie-Chart (PSC) von Eilmus [17] und ordnet die drei Produktstrukturstrategien Plattform, Modulare Produktfamilie und Modulbaukasten anhand unterschiedlicher Eigenschaften ein.

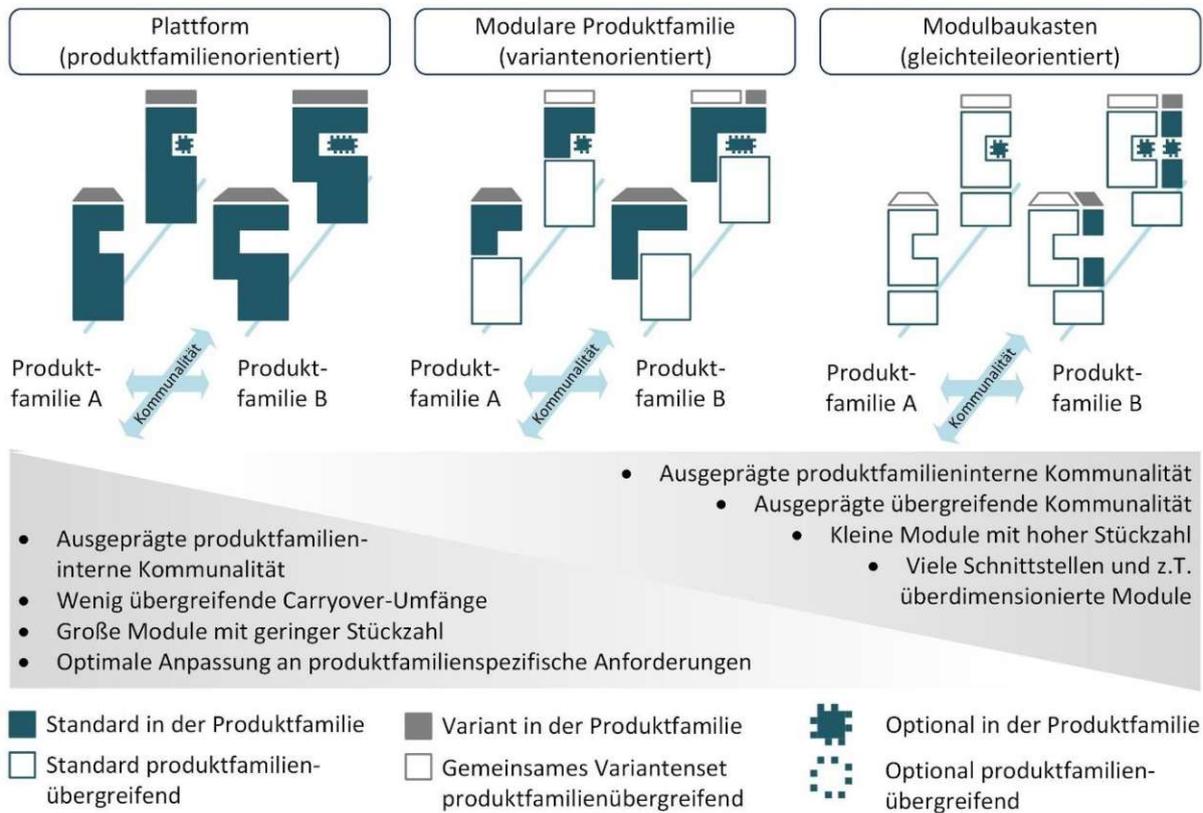


Abbildung 3 - Modifizierte Einordnung der Produktstrukturstrategien [17, S. 23]

Der Begriff der Plattform wird in der Literatur unterschiedlich definiert und beschreibt im Allgemeinen nicht nur die Nutzung von gleichen Komponenten oder Modulen, sondern auch die gemeinsame Nutzung von Entwicklungsparametern. Die Plattform ist für einen Teil eines Produktprogrammes eine Beschreibung mit gemeinsamen Werten, welche Informationen zu Komponenten, Prozessen, Wissen, Personen oder Beziehungen enthält. Die Nutzung der gemeinsamen Werte muss konsequent durchgeführt werden, um die Vorteile der Plattformstruktur nutzen zu können. Dazu zählen unter anderem eine reduzierte Entwicklungszeit, die Flexibilität des Fertigungsprozesses und eine einfache Produktpassungsmöglichkeit sowie die Sammlung von Informationen, welche den Aufwand für Tests und Zertifikate reduziert. [17, S. 20]

Die modulare Produktfamilie basiert auf der Nutzung gemeinsamer Module und Produktvarianten werden durch unterschiedliche Konfigurationen der Module erzeugt. Im

Gegensatz zur Plattform baut die modulare Produktfamilie aber nicht zwingend auf dem gleichen zentralen Element auf. Die Entkopplung von Modulen kann zu einer Reduzierung der Komplexität des Systems führen. Die Weiterentwicklung von einzelnen Komponenten wird aufgrund der Abgeschlossenheit der Module vereinfacht und der benötigte Zeitaufwand für Entwicklungen reduziert. Entwicklungsaufgaben können Organisationseinheiten zugewiesen werden und in gewisser Unabhängigkeit betrachtet werden. [18, S. 19-26]

Am rechten Ende des Produktstrukturstrategie-Charts ist noch der Modulbaukasten abgebildet, dessen Hauptmerkmal die Verwendung von Gleichteilen ist. Eine Sammlung von Modulen, welche über mehrere Produktfamilien hinweg verwendet werden, bildet die Basis dieser Produktstrukturstrategie. Die Module sind in der Regel kleiner ausgeführt als in den vorher beschriebenen Strategien. Im Allgemeinen wird keine Reinform der vorgestellten Strategien, welche am Rand des Spektrums angeordnet sind, angewendet, sondern eine Mischform, um die Vorteile übergreifend ausnutzen zu können. [17, S. 22]

2.2 Modulbauweise und Modularität

Die Modulbauweise zeichnet sich dadurch aus, dass die Konfiguration verschiedener Module zu unterschiedlichen Produktvarianten führt. Die einzelnen Module erfüllen dabei bestimmte zugeordnete Funktionen und lassen sich mit anderen Modulen über eine Schnittstelle koppeln. Die Modulbauweise kann aus verschiedenen Beweggründen angestrebt werden und wirkt sich auf alle Produktlebensphasen aus. Die Kopplungsart ist für die Modularität eine wesentliche Eigenschaft und es wird dabei unterschieden, ob es sich um eine Kopplung zur physischen, stofflichen, informativen oder energetischen Verbindung handelt. Die Kopplungsintensität beschreibt die Auswirkungen einer Änderung eines Moduls auf andere Komponenten und eine starke Entkopplung ist mit einer gewissen Unabhängigkeit gleichzustellen. Als Schnittstelle wird die Verbindung einzelner Module zueinander bezeichnet, welche für einen Kraftfluss oder den Austausch von Energie, Stoff oder Information sorgt. Eine Standardisierung der Schnittstelle kann die Zusammenbaubarkeit des Gesamtproduktes wesentlich erleichtern und den Fertigungsaufwand senken. [16]

Bei modularen Robotern führen unterschiedliche Anordnungen der Module zu verschiedenen Konfigurationen, womit der Roboter an bestimmte Aufgabenstellungen und Umgebungsbedingungen angepasst werden kann. Modulare rekonfigurierbare Roboter

sollten sich vor allem durch Vielseitigkeit, Robustheit und niedrige Kosten auszeichnen. Da diese Roboter aktuell hauptsächlich in der Forschung verwendet werden, sind in der Regel im Vergleich zu herkömmlichen Bauweisen die Herstellkosten aktuell noch höher und auch die Steifigkeit ist aufgrund der hohen Anzahl an Modulen und Teilen niedriger. [19, S. 2]

2.3 Rekonfigurierbarkeit von Robotern

Der wesentliche Vorteil der Rekonfigurierbarkeit ist die Flexibilität hinsichtlich der Anpassbarkeit. Diese Anpassung sollte möglichst einfach sein und wenig Zeit beanspruchen, da bestimmte Konfigurationen immer nur einen bestimmten Anwendungsbereich abdecken. Sind die Aufgaben in Vorhinein ausreichend bekannt, so kann eine Konfiguration gefunden werden, welche diese bestmöglich erfüllt. Sind die Umgebung und die Aufgaben aber nicht genau genug bestimmbar, wie es im Betrieb auf unbekanntem Gelände vorkommt, so benötigt der mobile Manipulator eine große Anzahl an Fähigkeiten, um die Aufgaben zu bewältigen. [20, S. 8]

Der in diesem Projekt entwickelte Roboter soll später zwar hauptsächlich in einer industriellen Umgebung eingesetzt werden, allerdings sind die Aufgaben des Roboters noch nicht vorhersehbar und auch das Aufgabenfeld soll mithilfe des modularen Aufbaus durch zukünftige Entwicklungen erweitert werden können.

2.3.1 Manuell konfigurierbar und selbst rekonfigurierbar

Hinsichtlich der Rekonfigurierbarkeit können modulare Roboter generell in manuell konfigurierbare und selbst konfigurierbare Systeme eingeteilt werden. Dabei erfolgt die Rekonfiguration bei den manuell konfigurierbaren in Regelfall durch den Benutzer und der Roboter wird dadurch an die Aufgabenstellung angepasst. Bei den selbst rekonfigurierbaren Robotern handelt es sich oftmals um homogene Module, welche sich selbst neu anordnen können. [21]

Die Vorteile der manuellen Rekonfigurierbarkeit wurden bei der Entwicklung eines Alligator ähnlichen Roboters [22] ausgenutzt, um diesen vor dem Einsatz im Wasser an unterschiedliche Strömungen und Aufgaben anzupassen. Als weiteres Beispiel soll, aufgrund des möglichen Einsatzes in der Lehre, noch der Roboter *Fabel II* [23] genannt werden. Unterschiedlich komplexe Programmierungsumgebungen und der modulare Aufbau sollen kreatives Lernen,

sowohl für Anfänger als auch Experten, fördern. Es gibt auch eine Vielzahl von selbst rekonfigurierbaren Robotern. Kergala beschreibt in *Space Engine* [24], dass die Hardware der Robotik noch nicht auf dem gleichen technischen Level wie die Software ist und zeigt zukünftige Einsatzmöglichkeiten von Schwarmrobotern mit hunderten homogenen Modulen. Bei *M-Tran* [25] handelt es sich um ein weiteres selbst rekonfigurierbares modulares Robotersystem, welches 2002 entwickelt und Versuche anhand eines Systems mit zehn Modulen durchgeführt wurden. Dieses System wurde weiterentwickelt und mit *M-TRAN III* [26] wurden Versuche mit bis zu 24 Modulen durchgeführt. Eine Verbesserung zu den Vorgängern, hinsichtlich des mechanischen Aufbaus, ist eine steifere Schnittstelle, welche auch weniger Zeit zum Koppeln benötigt.

2.3.2 Modulformen: Homogener und heterogener Aufbau

Der modulare Aufbau und die Rekonfigurierbarkeit führen zu einer Vielseitigkeit an möglichen Anwendungen. Wird ein Aufbau mit homogenen Bausteinen gewählt, so kann das System nach der Entwicklung der Bausteine nur mehr durch Änderung der Anzahl der verwendeten Bausteine verändert werden. Es können hier in Analogie die Zellen von Lebewesen betrachtet werden. Die Zellen an sich weisen eine einfache Struktur auf, aber in hoher Anzahl und bestimmten Konfigurationen können diese die komplexesten Aufgaben bewältigen. [27, S. 1581] Vertreter von Robotersystemen mit homogenen Modulen sind unter anderem die in Kapitel 2.3.1 genannten selbst rekonfigurierbaren Roboter.

Um die Flexibilität so hoch wie möglich zu halten, ist ein System mit heterogenen Bausteinen von Vorteil. Es besteht damit die Möglichkeit das System mit später entwickelten Modulen zu erweitern und das Anwendungsfeld zu vergrößern [28, S. 1]. Es werden dabei den unterschiedlichen Modulen bestimmte Funktionen zugeschrieben und der Anwender entscheidet bei der Wahl der Konfiguration über den Funktionsumfang des Produktes. Die Firma *RobCo* [29] bietet Industrieroboterarme mit verschiedenen standardisierten Modulen an, welche je nach Konfiguration unterschiedliche Eigenschaften aufweisen. Dadurch können unter anderem Reichweite, Traglast und Beschleunigungen beeinflusst werden.

2.4 Umgebung und Antrieb

Je nach Problemstellung sind verschiedene Bodenbeschaffenheiten zu beachten. Eine unbekannte Umgebung bringt viele Schwierigkeiten mit sich. Eine kontrollierte Fortbewegung ist auf einem unebenen, unbekanntem Untergrund aufwändiger zu realisieren, da dann von den Rotationen der Räder nicht mehr auf die Position des Roboters geschlossen werden kann. Darüber hinaus kann auch eine eingebaute Federung notwendig sein. Diese sorgt dafür, dass immer genügend Räder gleichzeitig mit dem Boden in Kontakt sind und Unebenheiten durch den Federweg ausgeglichen werden können. Diese Umgebungen werden aber aufgrund des Einsatzes in Industriehallen im Rahmen dieser Arbeit nicht näher betrachtet. Das Ziel ist es, durch den Aufbau des Gesamtsystems den modularen mobilen Manipulator im Rahmen dieser Arbeit so auszulegen, dass sich dieser auf einem ebenen Untergrund kontrolliert fortbewegen kann, da eben industrielle Anlagen meist diese Voraussetzung erfüllen. Vibrationen können zu unerwünschten Effekten wie mechanischen Schäden oder Ungenauigkeiten führen und diese sollen schon im Antrieb möglichst unterdrückt werden. Dazu können spezielle Dämpferelemente eingesetzt werden, wobei auch gummierte Räder diese Aufgabe übernehmen können, wenn keine hohen Anforderungen bezüglich der Dämpfung gestellt werden.

2.5 Sensorik von mobilen Manipulatoren

Die Steuerung von mobilen Manipulatoren wäre relativ einfach, wenn ein vollständiges Umgebungsmodell vorliegen würde und die Aktuatoren fehlerfrei und ohne Abweichungen arbeiten würden. In der praktischen Anwendung ist das aber nicht der Fall und eine solche Annahme würde zu erheblichen Abweichungen, wie beispielsweise der Roboterposition an sich, führen. Es ist daher notwendig, sowohl Daten des Zustandes des Roboters als auch der Umgebung aufzuzeichnen und auszuwerten. [30, S. 87]

Die Auswahl einer geeigneten Sensorik umfasst sowohl die Klärung der Fragestellung, welche Größen auf welche Art und Weise gemessen werden sollen, als auch eine Erarbeitung der Anforderungen, die ein Sensor an das Gesamtsystem stellt. Unbestimmtheiten, wie wechselnde Bedingungen der Umgebung oder Rauschen eines Signals, müssen berücksichtigt werden und können bei Nichtberücksichtigung fatale Auswirkungen auf die gemessenen Größen und damit auf das Gesamtsystem haben. Damit die Umgebung vom Roboter

wahrgenommen und darauf Rücksicht genommen werden kann, sind Sensoren notwendig, welche diese Informationen zuverlässig liefern können. Durch geeignete Positionierung der Sensoren am Roboter können Fehlereinflüsse minimiert werden. Hesse & Schnell [31] teilt Sensoren für autonome mobile Roboter in Abbildung 4 folgendermaßen ein.

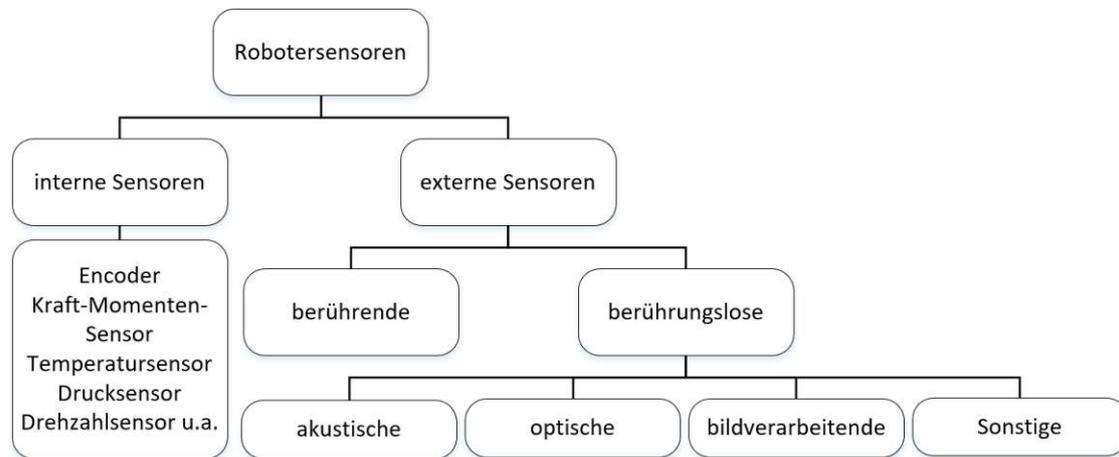


Abbildung 4 - Modifizierte Gliederung der Sensoren für autonome mobile Roboter [31, S. 3]

Die internen Sensoren liefern Informationen über den aktuellen eigenen Zustand und nehmen Größen wie die Temperatur oder die Drehzahl auf. Die externen Sensoren hingegen messen Größen der Umgebung, wie Abstände zu Objekten. In Abhängigkeit von dem zur Verfügung stehenden Budget sollen im Projekt *TURBO* in einer weiterführenden Arbeit zur Sensorik mögliche Sensortypen ausgewählt werden, welche mit dem restlichen System kompatibel sind und die Informationen des Roboters und der Umgebung zuverlässig an den Boardcomputer liefern. In der Robotik werden unter anderem häufig Beschleunigungssensoren eingebaut, um das Anfahren und Bremsen zu erfassen oder beispielsweise ein unerwünschtes Kippen zu detektieren. Das verwendete Bussystem *EtherCAT* von *Beckhoff* unterstützt eine Vielzahl an Sensoren. Als Beispiel soll hier noch ein 2x3-Achs-Beschleunigungssensor [32] von *Beckhoff* genannt werden, welcher neben Beschleunigungen auch Neigungen um alle drei Achsen erfassen kann. Der benötigte Bauraum von modernen Beschleunigungssensoren ist gering und es sind für eine große Anzahl an informationsverarbeitenden Systemen kompatible Beschleunigungssensoren zu finden. Gleiches gilt für die meisten gebräuchlichen Sensoren, wie beispielsweise Temperatur- oder Luftfeuchtigkeitssensoren. Diese können günstig erworben werden und benötigen wenig Bauraum. Als Beispiel soll hier der Sensor *DHT11* [33] von *Aosong* genannt werden, welcher Temperaturen von -20°C bis 60°C und eine relative Luftfeuchtigkeit von 5% bis 95% messen kann.

Die externe Sensorik gestaltet sich komplexer und häufig wird für die Umgebungswahrnehmung ein LIDAR-System verwendet. Die Abkürzung LIDAR steht für „Light detection and ranging“ und bei diesen Sensoren wird die Umgebung mit ausgesendeten Laserimpulsen und deren Reflektionen gescannt und die Laufzeit gemessen, damit auf die Entfernung von Objekten rückgeschlossen werden kann. Umwelteinflüsse, wie Regen, können zu fehlerhaften Scans führen, da der Laserstrahl an Wassertropfen reflektiert werden kann. Dieser Fall wird im Zuge dieser Arbeit aber nicht weiter betrachtet, da der Roboter in erster Linie in trockenen Umgebungen eingesetzt wird und zusätzlich könnten im späteren Verlauf der Entwicklung durch den modularen Aufbau weitere Sensoren angebracht werden, welche diese Fehlereinflüsse minimieren. [34]

Eine andere Möglichkeit die Umgebung visuell wahrzunehmen ist der Einsatz einer Stereokamera, diese Art der Sensoren wird häufig in selbst fahrenden Autos verwendet. Mit Hilfe von zwei Objektiven können Informationen zu Objekten und dem Umfeld abgebildet und verarbeitet werden. Die hohen Sicherheitsanforderungen an kooperative Roboter machen den Einsatz zusätzlicher Radar- und Ultraschallsensoren notwendig und mit Hilfe dieser werden die Daten der verschiedenen Sensoren vernetzt und abgeglichen. [35]

2.6 Sicherheitstechnik mobiler Manipulatoren

Komplexe Bewegungsmuster und hohe Geschwindigkeiten der Aktuatoren führen zu hohen Sicherheitsansprüchen in der Robotik. Kollaborative Systeme weisen aufgrund der Nähe zu Menschen erhöhte Ansprüche auf. Sowohl die Sensorik als auch eine eventuell erforderliche räumliche Trennung des Arbeitsraums der Maschine und des Menschen spielen eine wichtige Rolle. Häufig eingesetzte Sensoren sind unter anderem Not-Aus Schalter, Tastsensoren und Näherungsschalter, welche Kollisionen frühzeitig erkennen oder diese verhindern können. Eine durchdachte Anordnung dieser kann dabei helfen auch die Richtung der Kollision festzustellen, um entsprechend darauf reagieren zu können. Schon bei der Produktentwicklung muss der Faktor Sicherheit betrachtet und Raum für die notwendige Sensorik geschaffen werden.

Zu den sicherheitsrelevantesten Komponenten bei Robotern gehören Sensoren, eine Navigation mit Sensordatenfusion, und eine zuverlässige Robotersteuerung. Sensoren mit sicherheitsrelevantem Charakter müssen unter der Einhaltung gewisser Normen und

Richtlinien zertifiziert sein. Bei der Sensordatenfusion der Navigation werden die von einem Sensor aufgezeichneten Daten mit den Daten eines zweiten Sensors, welcher eine andere Messmethode verwendet, abgeglichen. Als Betriebssystem von mobilen Manipulatoren wird oftmals ROS (Robot Operating System) eingesetzt, da sowohl die mobile Plattform als auch der Greifarm mit einer Software gesteuert werden können. Die Anpassbarkeit an neue Aufgaben des Gesamtsystems bringt auch Schwierigkeiten hinsichtlich der Sicherheit mit sich. Methoden zur virtuellen Validierung der sicherheitstechnischen Anforderungen sollen geschaffen werden, um die Risiken von verschiedenen Konfigurationen und Aufgaben bewerten zu können. [36]

2.7 Stabilität mobiler Manipulatoren

Weisen mobile, bereifte Manipulatoren einen hohen Aufbau und einen geringen Achsabstand auf, so ist die Möglichkeit des Kippens zu beachten. Allgemein kann durch das Anordnen von schweren Komponenten im unteren Bereich der Schwerpunkt in Bodennähe gebracht werden und das führt in den meisten Fällen zu einem stabilen Stand. Auch die Anordnung der Räder und der Achsabstand haben einen wesentlichen Einfluss auf die Kippsicherheit. [37]

3 Umsetzung modular aufgebauter Roboter

Dieses Kapitel dient zum Einstieg in die modulare Robotik und es werden Lösungsansätze für ähnliche Problemstellungen verglichen und Schlüsse daraus gezogen. Es werden gezielt Roboter mit verschiedenen Modulformen und unterschiedlicher Umsetzung der Verbinder betrachtet, um deren Unterschiede aufzeigen zu können.

3.1 Ähnliche Lösungsansätze für die Problemstellung

Bei der Recherche wurden vor allem verschiedene Arten der Modularisierung verglichen, um Vor- und Nachteile verschiedener Modulformen und Bauweisen zu erfassen. Weil die Ausführung der Schnittstelle zwischen den Modulen von wesentlicher Bedeutung ist und einen großen Einfluss auf die gesamte Struktur des Roboters hat, wird auch diese bei den betrachteten Robotern analysiert. Auch der Schutz gegenüber Umwelteinflüssen der vorgestellten Roboter wird verglichen und bewertet. Die Ergebnisse dieser Recherche werden für die Auswahl einer geeigneten Modulform und bei der Aufteilung der Funktionen auf die Module herangezogen.

3.1.1 Thor Robot

Die *University of Southern Denmark* hat einen modularen mobilen Manipulator entwickelt, welcher sich vor allem durch die Trennung von Motoren und Aktuatoren und die Verbindung der einzelnen Module von der Konkurrenz und anderen betrachteten Robotern abhebt. [28]



Abbildung 5 - CAD Rendering einer möglichen Konfiguration des *Thor Robots* [28, S. 1]

Es handelt sich hier um einen Roboter mit heterogenen Modulen, welche mit „geschlechtslosen Verbindern“ miteinander verbunden sind. Der Aufbau mit zylindrischen Modulen und Verbindern als Zwischenelemente führt zu einer offenen Bauweise und einer kettenartigen Struktur. Diese Struktur wird auch von anderen Forschungsprojekten und Firmen hauptsächlich bei modular aufgebauten Greifarmen verwendet, da aufgrund der leichten Anpassbarkeit der Armreichweite, der maximalen Traglast und der möglichen Beschleunigungen ein großes Anwendungsgebiet abgedeckt werden kann. Der Greifarm kann durch Hinzufügen oder Entfernen von Modulen verlängert oder verkürzt werden und das hat einen großen Einfluss auf die maximale Traglast im Arbeitsraum. Das Besondere ist die optionale Drehmomentübertragung in den Verbindern, welche eine Trennung der Motoren und der Aktuatoren ermöglicht. Abbildung 6 zeigt den Aufbau dieser Verbinder. Die Autoren beschreiben, dass diese Ausführung die Entwicklung zusätzlicher Module erleichtert und auch die Kosten zur Erweiterung der Funktionalität senken. Damit können teure Motoren effizient genutzt werden und die Entwicklung neuer Aktuatoren wird vereinfacht. Es ist aber zu beachten, dass die gesamte Größe eines Motormoduls und eines Aktuatomoduls in Summe größer ist als jene eines Moduls mit integriertem Motor und es können immer nur so viele Aktuatoren betrieben werden, wie Motoren im Aufbau vorhanden sind. [28]

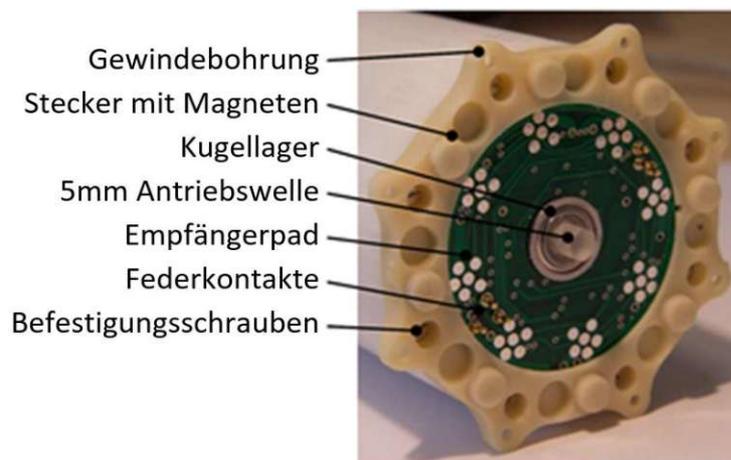


Abbildung 6 - Modifizierte Abbildung: Verbinder mit optionaler Drehmomentübertragung [28, S. 2]

3.1.2 WMR - Modularer Roboter mit Reifen

Die *Robotics Research Group* der *Oxford University* beschreibt in mehreren wissenschaftlichen Veröffentlichungen die Kinematik eines modular aufgebauten Roboters mit Rädern. [38, 39] Abbildung 7 zeigt den Aufbau des WMR (Wheeled Modular Robot) mit Sonarsensoren in der

obersten Ebene, welche mit dem zentralen Modul über freiliegende Kabel verbunden sind. Bei der gewählten Modulform handelt es sich ausschließlich um regelmäßige Hexaeder, welche an ihren Ecken mit den benachbarten Modulen über Bleche befestigt sind. Die Würfel bilden so einen kompakten, lückenlosen Gitteraufbau, welcher eine hohe Steifigkeit aufweist. Im Unterschied zu der in dieser Arbeit angestrebten Lösung hat dieser Roboter keinen Greifarm, aber interessant ist hier unter anderem die Ausführung des Antriebs. Im Roboter sind drei idente Antriebsmodule eingebaut, wobei jedes Rad einzeln angetrieben und gelenkt wird. [39, S. 41]

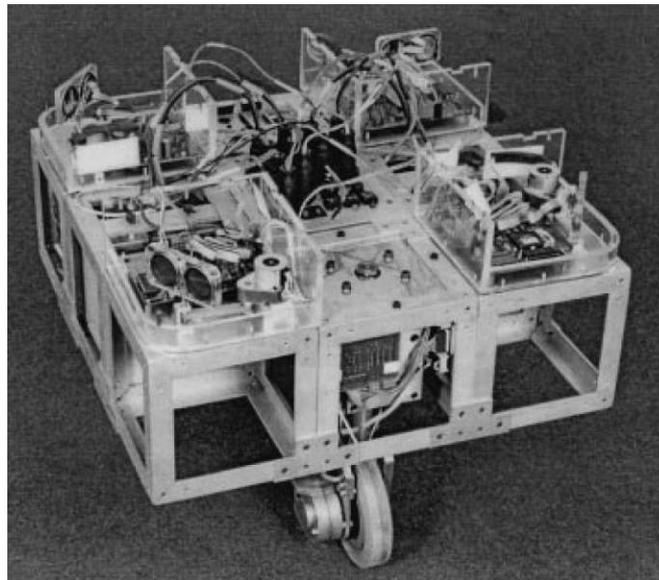


Abbildung 7 - WMR: Modularer Roboter mit Reifen [39, S. 42]

3.1.3 Wabenroboter

Das *Joanneum Research* mit dem Hauptsitz in Graz hat einen modularen Roboter entwickelt, wobei die Grundfläche der Module Sechsecke sind. Die Module werden entweder mit einem speziellen Schnellverschluss oder mit Schrauben miteinander verbunden. Die Wabenstruktur ermöglicht bei dem Fokus auf verschiedene Antriebsmöglichkeiten eine Vielzahl an interessanten Konfigurationen, welche in Abbildung 8 dargestellt sind.

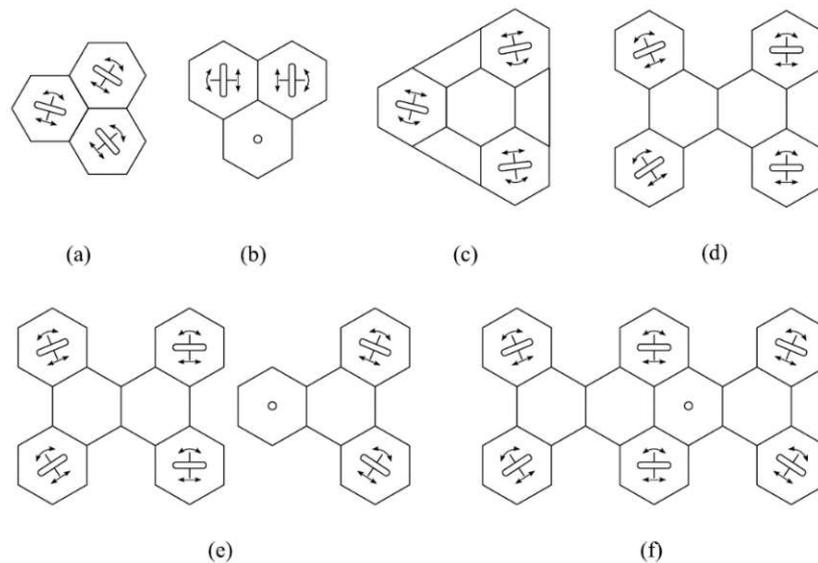


Abbildung 8 - Wabenroboter: Wabenstruktur und mögliche Konfigurationen [40, S. 151]

Ähnlich wie der vorher gezeigte Aufbau mit regelmäßigen Hexaedern des WMR führt auch die Wabenstruktur dieses Roboters zu einem kompakten Gitteraufbau mit hoher Steifigkeit. Die Module sind aufgrund der vorgegebenen Schnittstellenorientierung und der Modulform nicht beliebig zusammensetzbar. Es wurden daher Hilfsmodule entwickelt, welche mit einer Lenkrolle, einer CPU oder einem Akkumulator ausgestattet sein können, und die Anzahl der möglichen Konfigurationen erheblich zu erhöhen. Der Fokus liegt laut den Autoren auf einer robusten Bauweise der anpassbaren mobilen Roboter und den verschiedenen Antriebsmöglichkeiten. Schon bei simplen Transportaufgaben kann durch den Einsatz von mehreren Antriebsmodulen die Traglast erhöht werden. Während eine Konfiguration nur mit omnidirektionalen Rädern eine uneingeschränkte Bewegung auf ebenem Untergrund ermöglicht, so ist die Bewegung bei Kombination mit lenkbaren Rädern eingeschränkt. Abbildung 9 zeigt eine Konfiguration aus vier Wabenmodulen mit zwei lenkbaren, angetriebenen Rädern und einem freilaufenden Rad, welches drehbar gelagert ist. Mit diesem Aufbau ist die Bewegung im Raum aber nur eingeschränkt möglich. [40]

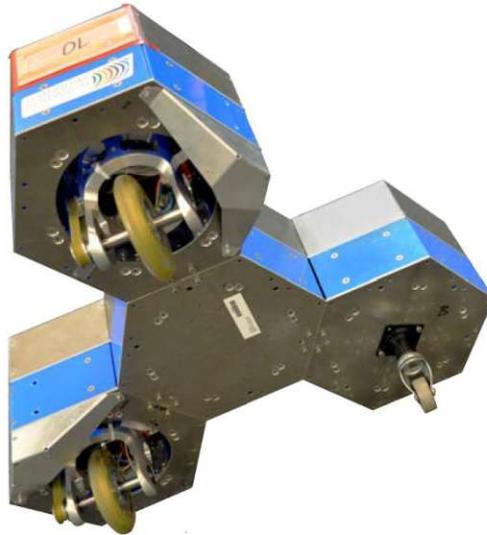


Abbildung 9 - Wabenroboter des Joanneum Research [41, S. 17]

3.2 Ausweitung der Modularität auf die Software

Um die Möglichkeiten abschätzen zu können, wurde eine weitere Arbeit betrachtet, welche sich von der Problemstellung leicht unterscheidet, aber vor allem im Bereich des universellen Verbinders mit dem Projekt *TURBO* überschneidet und ähnliche Anforderungen an diesen stellt.

CMU - Rekonfigurierbarer modularer Manipulator

Die *Carnegie Mellon University* in Pennsylvania hat einen modularen Manipulator entwickelt, wobei sich die Modularität nicht nur auf den mechanischen Aufbau, sondern auch auf die elektronische Hardware, Kontrollalgorithmen und die Software bezieht. Das RMMS (Reconfigurable Modular Manipulator Design) besteht aus austauschbaren Gelenk- und Verbindungsmodulen in verschiedenen Ausführungen. Die Autoren beschreiben den wesentlichen Unterschied zu konventionellen Manipulatoren in den standardisierten Schnittstellen. Diese sind sowohl für die mechanische Verbindung als auch für die Datenübertragung und Energieversorgung zuständig. Um die Rekonfigurierbarkeit zu ermöglichen, wurden Verbinder mit einem Schnellkupplungsmechanismus entwickelt, welche kein zusätzliches Werkzeug benötigen. Als wesentliche Faktoren, welche die möglichen Konfigurationen beeinflussen, sind die Länge der Verbindungsstücke, die Aktuatoren der Gelenke und die Geometrie der Verbindung von Gelenk zu Verbindungsstück zu nennen. Der Roboter ist sowohl für Forschungszwecke als auch für den industriellen Einsatz geeignet. [20, 42]

3.3 Reflektion der Umsetzung des modularen Aufbaus bei mobilen Robotern

Schon in der Form der einzelnen Module unterscheiden sich die gefunden Lösungsansätze anderer Universitäten grundsätzlich voneinander und diese bringen verschiedene Vor- und Nachteile mit sich. Ein Gesamtsystem mit hoher Steifigkeit kann durch einen kompakten Gitteraufbau erreicht werden und für diesen bieten sich Würfel, Quader oder hexagonale Prismen an. Würfel haben gegenüber hexagonalen Prismen auch den Vorteil, dass sich diese bei Rotationen von Vielfachen von 90° um die Hauptachsen in sich selbst überführen lassen. Unter der Voraussetzung, dass die Verbinder diese Orientierungen zulassen, nimmt die Anzahl an möglichen Konfigurationen zu. Der wabenförmige Aufbau ermöglicht verschiedene Konfigurationen, welche im Speziellen für den Antrieb relevant sind. So kann, wie in Abbildung 9 abgebildet, relativ einfach ein um das zentrale Modul um 120° rotationssymmetrischer Aufbau realisiert werden, was bei einem Aufbau mit Würfeln nicht möglich ist. Die zylindrische Form der Module in Kombination mit Verbinder als Zwischenelemente des *Thor Robots* führen, im Gegensatz zu den betrachteten gitterförmigen Strukturen, zu einer kettenartigen Struktur.

Die sehr offene Bauweise des Roboters der *Oxford University* [27] ermöglicht grundsätzlich eine einfachere Erweiterbarkeit, aber der Schutz gegenüber Einflüssen der Umgebung ist gering. Die elektrische Verbindung und die Signalübertragung wurden mit frei liegenden Kabeln und die mechanische Verbindung der einzelnen Module wurde über die L-Profile an den Ecken der Chassis realisiert. Sowohl der *Thor Robot* als auch der *Wabenroboter* weisen mit ihren geschlossenen Aufbauten und innen verlaufenden Kabeln einen höheren Schutz gegenüber Umwelteinflüssen auf und eignen sich daher für rauere Umgebungen.

Der *Thor Robot* hebt sich wesentlich von der Konkurrenz und den anderen genannten Robotern durch die Schnittstelle der Module ab. Diese ist nicht nur für die Übertragung von elektrischer Leistung und von Signalen zuständig, sondern kann optional auch die Übertragung von mechanischer Leistung über eine Drehmomentübertragung übernehmen.

4 Verwendete Methoden und Hilfsmittel

Die in Kapitel 3 betrachteten Umsetzungen von modular aufgebauten mobilen Manipulatoren werden als Grundlage für die angewandten Methoden und zur Entscheidungsfindung zu Hilfe genommen. Methodisches Vorgehen gilt allgemein als Grundlage des wissenschaftlichen Arbeitens und ist aus Gründen der Nachvollziehbarkeit gründlich zu dokumentieren. Diese Dokumentation soll sowohl die angewandten Methoden als auch den Weg zu den Ergebnissen beinhalten.

4.1 CAD als Konstruktionsgrundlage

Im Maschinenbau und auch in der Robotik ist der Einsatz von CAD (Computer-Aided Design) ein gängiges Hilfsmittel [43]. Schon der Entwurf des Roboters erfolgte im CAD, um verschiedene Konfigurationen durch Visualisierung auf deren Umsetzbarkeit prüfen zu können. Der Einsatz von CAD ermöglicht außerdem eine einfachere und umfassende Dokumentation, um den Einstieg für neue Projektmitarbeiter zu erleichtern. Auch der Projektfortschritt kann mit Hilfe von Renderings anschaulich präsentiert werden und Probleme sind anhand von Modellen leichter erkennbar und nachvollziehbar. Schwierigkeiten können bei Verwendung mehrerer verschiedener Softwares auftreten, da diese oft nicht kompatibel sind und die Dateien in einem universellen Format weitergegeben werden müssen und bei der Formatierung Informationen des Modells verloren gehen können. Im Maschinenbau hat sich das standardisierte *STEP*-Format, welches für „Standard for the Exchange of Product model data“ steht, durchgesetzt [44]. Bei der Formatierung in eine Step-Datei gehen zwar keine Informationen über die Geometrie an sich verloren, aber der Aufbau des Modells kann nicht mehr nachvollzogen werden und Änderungen am bestehenden Modell sind nur bedingt möglich.

In Abhängigkeit vom Entwicklungsfortschritt eines Produktes werden unterschiedliche Anforderungen an das CAD-Modell gestellt. In der Hauptphase der Konzeptionierung ist der Detaillierungsgrad des Modells gering zu halten, weil Änderungen am Konzept mit einem sehr hohen Änderungsaufwand verbunden sind, wenn das Modell schon sehr umfangreich ausgestaltet ist. Ist ein zufriedenstellendes Konzept gefunden, so nimmt in der Hauptphase des Entwerfens der Detaillierungsgrad zu und die Modelle werden komplexer. Eine

vollständige Parametrisierung würde in dieser fortgeschrittenen Phase zu einem unverhältnismäßig hohen Aufwand führen. Der Datenaustausch von CAD Daten zwischen Projektpartnern mit unterschiedlichen CAD Formaten bringt, bezogen auf die Kompatibilität, weitere Hürden mit sich und erschwert unter anderem die Parametrisierung. Aus den genannten Gründen ist ein parametrisiertes Modell zu Beginn der Entwicklung sinnvoll und bei Fortschreiten des Projektes ein Umstieg auf ein detaillierteres Modell ohne viele Parameter vorteilhaft.

4.2 Funktionale Sichtweise und Teilung der Aufgabe

Bei der funktionalen Sicht wird das Produkt in einzelne Funktionen aufgeteilt, ohne die technische Umsetzung dieser zu definieren. Pahl et al. definiert den Begriff der Funktion wie folgt „*Unter Funktion ist der allgemeine und gewollte Zusammenhang zwischen Eingang und Ausgang eines Systems mit dem Ziel, eine Aufgabe zu erfüllen, zu verstehen.*“ [11, S. 242]

Die Methode der funktionellen Interpretation einer Aufgabe soll schon in frühen Phasen der Produktentwicklung angewandt werden, um das Potential dieser Methode auszuschöpfen. Es können verschiedene Abstraktionsgrade dargestellt werden und das hilft das Gesamtsystem sinnvoll zu gliedern und übersichtlich abzubilden. Die Darstellung von Funktionen erfolgt mit Black-Box-Strukturen oder zustandsverbale Beschreibungen, um die technischen Lösungen, welche erst in späteren Hauptphasen der Entwicklung gefunden werden, nicht einzuschränken. [45]

Die Funktionale Struktur teilt die Gesamtaufgabe des Systems schon in kleinere Aufgaben und erleichtert die Lösungssuche bei komplexen Strukturen. Die Umsetzung der Funktion in ein physisches Produkt erfolgt laut dem Vorgehen nach Pahl et al. [11] in der Konzept- und Entwurfsphase. In Abbildung 10 sind die Funktionsstruktur, Produktarchitektur und Produktstruktur, in Anlehnung an Krause & Gebhardt [16, S. 81] und Eilmus [17, S. 11], schematisch dargestellt.

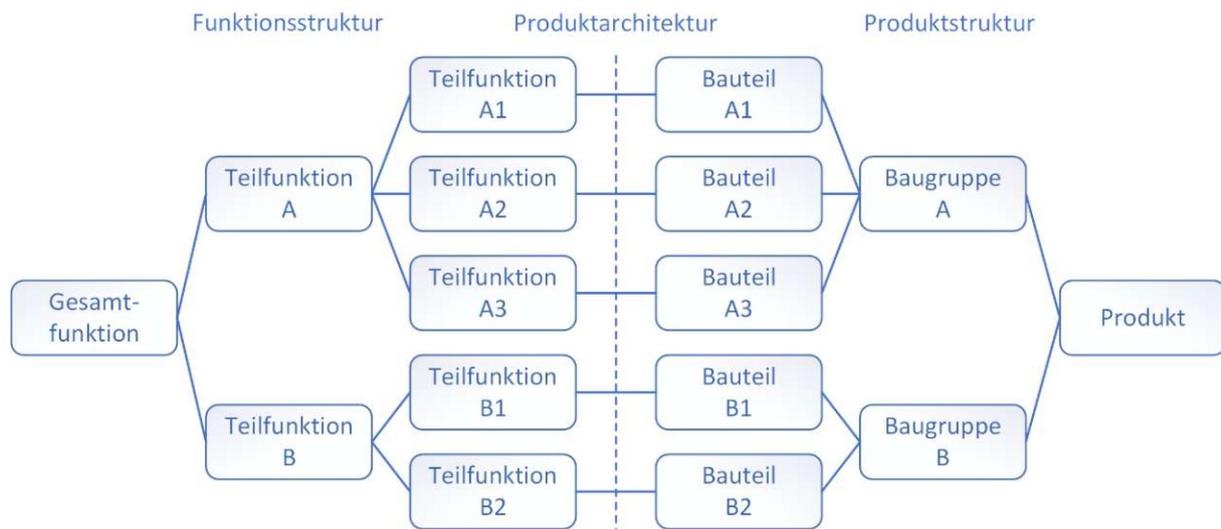


Abbildung 10 - Modifizierte schematische Darstellung einer Produktarchitektur [16, S. 81]; [17, S. 11]

Die Funktionsstruktur gliedert die Gesamtfunktion des Produktes in Unterfunktionen, dabei werden die Teilfunktionen so oft in kleinere Teilaufgaben aufgegliedert, bis für diese Teilfunktionen im nächsten Schritt Wirkprinzipien gefunden werden können. Die Produktarchitektur verbindet die Funktionsstruktur mit der Produktstruktur und beschreibt, welche Funktionen von welchen Bauteilen oder Baugruppen übernommen werden. Das Zusammenfassen mehrerer Bauteile zu Baugruppen und dann zu dem Produkt wird in der Produktstruktur wiedergegeben. [18]

4.3 Bewertungsmethoden der Produktentwicklung

Die Nutzwertanalyse [11, S. 390] wurde erstmals 1970 vorgestellt und wird eingesetzt eine Aussage über die Erfüllung sowohl technischer als auch wirtschaftlicher Anforderungen zu erhalten. Als erster Schritt müssen Bewertungskriterien gefunden werden, welche vor allem aus der bereits vorhandenen Anforderungsliste abgeleitet werden. Entscheidend ist, dass alle relevanten Anforderungen berücksichtigt werden und diese voneinander unabhängig sind, damit sich diese nicht gegenseitig beeinflussen. Außerdem ist eine positive Formulierung dieser Werte notwendig, um eine einheitliche Bewertungsrichtung zu erhalten. Wurden unabhängige Bewertungskriterien gefunden, so können beispielsweise mit einem Paarweisen Vergleich [11, S. 388-389] Gewichtungsfaktoren für die einzelnen Kriterien gefunden werden. Bei der Nutzwertanalyse werden anschließend die einzelnen Bewertungskriterien der Varianten mit einem Wertespektrum von 0 bis 10 Punkten bewertet und anschließend mit den Gewichtungsfaktoren multipliziert. Die Summe dieser Werte der jeweiligen Variante gibt

dann Aufschluss über die Erfüllung der Zielvorstellung der Lösung und hilft somit eine geeignete Lösungsvariante zu finden. Erhalten zwei oder mehr Lösungsvarianten eine ähnlich gute Bewertung so kann eine Schwachstellenanalyse [11, S. 403] mit Hilfe eines Werteprofiles durchgeführt werden, welche die einzelnen Bewertungen der Kriterien der Lösungsvarianten visuell gegenüberstellt. Damit können einzelne Kriterien, welche von der Lösungsvariante kaum erfüllt werden, ersichtlich gemacht und Schwachstellen gefunden werden. Optimal ist eine Lösung ohne Schwachstellen und einer allgemein hohen Punktzahl der Nutzwertanalyse [11, S. 373].

Die Ergebnisse der Bewertungsmethoden sind immer kritisch zu hinterfragen und auf Plausibilität zu prüfen. Das Betrachten von verschiedenen Blickwinkeln kann helfen alle relevanten Bewertungskriterien zu finden. Außerdem sind beim Anwenden der Methoden neutrale Bezeichnungen zu wählen, um den unerwünschten subjektiven Einfluss zu minimieren und die Aussagekraft des Ergebnisses wird dadurch erhöht.

5 Methodische Umsetzung der Module

Um geeignete Module hinsichtlich Form, Größe und deren Funktionsumfang zu finden, ist ein methodisches Vorgehen sinnvoll und notwendig. Damit die Anforderungen an den mobilen Manipulator möglichst gut erfüllt werden können, werden diese in einer Anforderungsliste gesammelt und dokumentiert. Darauf aufbauend werden Modulformen anhand unterschiedlicher Kriterien verglichen und ausgewählt. Diese Schritte erfolgen mit bewährten Methoden der Produktentwicklung, welche eine objektive Bewertung ermöglichen. Der Paarweise Vergleich und die Nutzwertanalyse werden als Methoden angewandt, um eine zufriedenstellende Lösung zu finden. Parallel zur Anwendung der Methoden wird ein CAD-Modell geführt, welches zur Entscheidungsfindung und zur Validierung der gefundenen Ergebnisse dient. Der Detaillierungsgrad dieses Modells steigt mit zunehmendem Entwicklungsstand und dient dazu, verschiedene Konfigurationen des Manipulators widerzuspiegeln.

5.1 Allgemeine Anforderungen des mobilen Manipulators

Das Ergebnis der ersten Hauptphase der Produktentwicklung, dem Planen und Klären der Aufgabenstellung, ist eine Anforderungsliste. Diese Liste enthält Informationen über die Anforderungen, die an das Produkt gestellt werden und deren Bedeutung. Dabei gilt es alle Rahmenbedingungen, gültige Normen und Sicherheitsrichtlinien zu beachten. Mit dem Fortschreiten des Projektes, können sich die Anforderungen ändern und ein Aktualisieren der Anforderungsliste ist notwendig. [46, S. 210]

Um die für diese Arbeit relevanten Anforderungen zu definieren, wurden die Ergebnisse der Literaturrecherche miteinbezogen und die dort gefunden Stärken und Schwächen der einzelnen Roboter und deren Aufbau betrachtet. Eine der ersten Arbeiten im Projekt *TURBO* beschäftigte sich mit dem Konzept für einen modularen kooperativen Roboter. Diese Projektarbeit von A. Kinzer mit dem Titel „*Developing a Concept for a Modular Cooperative Robot*“ enthält unter anderem eine umfangreiche Anforderungsliste (Anhang Kapitel 13.1), welche auch als Hilfsmittel herangezogen wurde. Im Laufe der Entwicklung werden neue Erkenntnisse gewonnen und die Anforderungsliste kann und wird sich ändern. Um möglichst alle Anforderungen an den mobilen Manipulator zu erfassen, wurde ein Brainstorming mit

den am Projekt beteiligten Kollegen gemacht. Die Auflistung in Tabelle 1 enthält die für dieses Kapitel relevanten Anforderungen, welche mit den genannten Methoden und Hilfsmitteln gesammelt wurden.

Beschreibung/ Name der Anforderung	Bezeichnung (Variable)	Zahlenwert (mit Toleranz)		Einheit	Gew.	Ursprung / Erläuterung
		min.	max.			
Außenmaße (ohne Arm)	LxHxB	400x400x400	1000x1000x1000	mm	mittel	Minimum: Für möglichst viele Use Cases, geeignet für die Lehre Maximum: Um nicht klobig zu werden und um Kosten zu sparen
Stückzahl Gesamtsystem	Stück	2,00	Beliebig	1	mittel	Minimale Anzahl für Versuche; Maximale Anzahl für wirtschaftliche Fertigung
Anordnung extern	Roboter	1,00	9,00	1	hoch	Zusammenschalten von Gesamtsystemen (z.B.: Transportaufgaben)
Anordnung intern	Modul	4,00	-	1	hoch	Beispiele für Module: Boardcomputer, Antrieb, Akku, Sensoren
Anschluss extern	Schnittstelle	4,00	-	1	hoch	Fahrzeugschnittstellen an allen vier Seiten
Anschluss intern	Kopplung	-	-	1	hoch	Schnittstellen zwischen Modulen, Schnittstelle zum Arm
Ausbau	Abdichtung				mittel	IP Schutzart: Arbeit im Freien, staubbelastete Umgebung und Sicherheit
Stabilität					mittel	Stabilität des Gesamtsystems beeinflusst Präzision bei Aufgaben
Eigengewicht	m	-	100,00	kg	niedrig	Maximum: Aufgrund der Handhabbarkeit und benötigten Leistung
Tragfähigkeit	m	100,00	-	kg	niedrig	Stark abhängig von Use Case und Konfiguration
Baumaterialien	-	-	-	-	hoch	Nachhaltige und sortenreine Materialien verwenden
Hilfsstoffe (Öle, ...)	-	-	-	-	hoch	Aus Umweltgründen möglichst vermeiden
Ein- und Ausgangssignale					hoch	Kommunikation zu anderen Maschinen: WLAN/Bluetooth, etc.
Anzeigeart					mittel	Kommunikation zu Menschen: Signalton, Signallicht, Bildschirm, etc.
Betriebs- und Überwachungsgeräte					hoch	Sensorische Erfassung der Umwelt: Abstand, Kollision, etc.
Mechanisch					hoch	Stabile Arretierung zwischen den Modulen, werkzeuglos, hohe Steifigkeit
Elektrisch					hoch	Leistungsversorgung aller Module, minimale Impedanz
Information					hoch	Gängige Kommunikationsstandards, Ethernet, Netzwerktopologie
Unmittelbare Sicherheitssysteme					hoch	Not-Aus-System, Kollisions- und Personenerkennung, Bremssystem, etc.
Schutzsysteme					hoch	Elektrische Sicherungen, Berührungsschutz bei Elektronik und Fahrwerk
Betriebs, Arbeit, Umwelt					hoch	EMV- und CE-Normen
Bedienbarkeit					hoch	Werkzeuglos, automatischer und manueller Modus bei Nutzung
Übersichtlichkeit					hoch	Beschriftungen, Zugänglichkeit für Wartung, Warn- und Sicherheitssystem
Formgestaltung					hoch	Modularer Aufbau, einfach herstellbare Formen
Wartbarkeit					mittel	Verschleiß und Korrosion, gute Zugänglichkeit von Elektronik und Akkumulator
Anwendungsgebiet					hoch	Für möglichst breites Spektrum an Use Cases
Zuverlässigkeit					hoch	Hohe Zuverlässigkeit um Nutzung einfach zu machen
Benutzbarkeit					hoch	TURBO muss für Kunden mit Anleitung und Dokumentation betreibbar sein
Änderbarkeit / Modularität					hoch	Werkzeugloses Stecksystem, Konfigurationserkennung, Baugruppenerstellung
Wiederverwendung					hoch	Reparaturfähige, austauschbare und langlebige Komponenten verwenden
Wiederverwertung					hoch	Sortenreines Recycling, vollständig Demontierbar
Entsorgung					hoch	Kreislaufwirtschaft berücksichtigen
Herstellungskosten	KH	0,00	5.000-10.000	€	hoch	Maximum gewählt um Konkurrenz zu unterbieten (Eigenentwicklungen)

Tabelle 1 - Modifizierte Anforderungsliste in Anlehnung an Kinzer (Anhang Kapitel 13.1)

Die minimalen und maximalen Außenabmessungen sollen durch Rekonfigurationen erreichbar sein, dafür muss die Größe der Module passend gewählt werden und die Steifigkeiten der Module als auch der Verbinder ausreichen. Die externe Anordnung meint das Zusammenwirken mehrerer Roboter zueinander durch eine mechanische Verbindung, welche möglichst an allen vier Seiten vorhanden sein soll. Die interne Anordnung beschreibt den Aufbau durch die Module und der interne Anschluss die Verbindung dieser. Die Steifigkeit ist ein wichtiger Faktor für die Genauigkeit, mit der Aufgaben gelöst werden können. Eine hohe Steifigkeit kann sich aber auch auf das Gesamtgewicht des Roboters auswirken, welches mit einer Obergrenze aufgrund der Handhabbarkeit versehen ist. Je nach Anwendungsfall müssen bestimmte Umgebungsbedingungen beachtet werden und dabei kann das Einhalten einer IP-Schutzklasse notwendig sein. Allgemein soll bei der Materialwahl und bei dem Einsatz von Hilfsstoffen auf deren Umwelteinflüsse geachtet werden. Hinsichtlich der Signale sind sowohl Kanäle für die interne Kommunikation notwendig als auch eine Schnittstelle zum Menschen. Die externe Sensorik liefert Informationen der Umwelt und die interne Sensorik misst die Zustandsgrößen des Roboters an sich. Diese Informationen müssen an den Boardcomputer zur Datenverarbeitung weitergeleitet werden. Als Kommunikationsstandard kommt hier ein Ethernet basiertes System in Frage. Um die notwendige Sicherheit für den Bediener zu gewährleisten, sind unmittelbare Sicherheitssysteme vorzusehen und das Einhalten von EMV- und CE-Normen ist obligat. Das Einhalten von relevanten Normen und Richtlinien und die dazugehörige Dokumentation ein wichtiger Schritt, um eine zukünftige Vermarktung zu ermöglichen. Hinsichtlich der Ergonomie ist ein werkzeugloses Stecksystem für die Verbinder der Module erstrebenswert. Um eine gute Wartbarkeit zu gewährleisten, ist eine gute Zugänglichkeit aller Bauteile notwendig. Eine Dokumentation soll dies unterstützen und für Kunden muss eine Anleitung angefertigt werden. Es soll in einem späteren Stadium der Entwicklung eine Software entwickelt werden, welche automatisch Konfigurationen erkennt oder beispielsweise basierend auf bestimmten Anforderungen mögliche Konfigurationen vorschlägt.

5.2 Modulformen und deren Auswirkungen

Die Modulform hat unter anderem einen wesentlichen Einfluss auf die Konfigurierbarkeit, die Steifigkeit und das Design des Gesamtsystems. Wie in Kapitel 4.3 Bewertungsmethoden beschrieben, werden zuerst die relevanten Bewertungskriterien aus der Anforderungsliste

abgeleitet. Um die so abgeleiteten Kriterien zu validieren, erfolgte die Betrachtung von verschiedenen Standpunkten und eine Diskussionsrunde mit den am Projekt beteiligten Kollegen.

5.2.1 Bewertungskriterien der Modulformen

Folgend sind die von der Anforderungsliste abgeleiteten Bewertungskriterien aufgelistet und kurz beschrieben.

- **Konfigurationsmöglichkeiten:** Um den Roboter an verschiedene Aufgabenstellungen anpassen zu können, sind die Konfigurationsmöglichkeiten, welche mit den Modulformen möglich sind, wesentlich.
- **Einheitliche Schnittstelle:** Eine einheitliche Schnittstelle sorgt für eine hohe Anzahl an möglichen Konfigurationen und ist vor allem für die Erweiterbarkeit durch zukünftige Entwicklungen wichtig. Außerdem verkürzt sich die benötigte Zeit zur Rekonfiguration des Roboters.
- **Kompakter Aufbau/Steifigkeit:** Ein kompakter Aufbau führt zu einem stabilen Gesamtsystem und ist aufgrund der Anforderungen, bezüglich Genauigkeit und Wiederholbarkeit von Aktionen, relevant.
- **Hohes Verhältnis V/A:** Das Verhältnis von Volumen (V) zu Oberfläche (A) der Modulformen spiegelt den zur Verfügung stehenden Platz innerhalb der Module im Verhältnis zur Fläche der Verbinder wider.
- **Einsatz größerer Module:** Dieses Kriterium gibt an, wie einfach eine Kombination mit größer skalierten Modulen gleicher Form möglich ist. Manche Komponenten benötigen viel Platz und eine Aufteilung auf kleine Module wird nicht immer möglich sein.
- **Geringer Fertigungsaufwand:** Der geringer Fertigungsaufwand wirkt sich auf die Kosten des Gesamtsystems aus und diese sind möglichst gering zu halten. Baugleiche Komponenten führen in der Regel zu Ersparnissen bei der Herstellung.

5.2.2 Paarweiser Vergleich der Bewertungskriterien

Um den gefundenen Bewertungskriterien einen Gewichtungsfaktor zuzuordnen, wurde ein Paarweiser Vergleich durchgeführt. Dabei wird die Wichtigkeit der Kriterien zueinander

bestimmt und ein Gewichtungsfaktor abgeleitet. Der Paarweise Vergleich ist in Tabelle 2 abgebildet und in dem darauffolgenden Absatz erörtert.

	Konfigurationsmöglichkeiten	Einheitliche Schnittstelle	Kompakter Aufbau/Steifigkeit	Hohes Verhältnis V/A	Einsatz größerer Module	Geringer Fertigungsaufwand	Gewichtung	Gewichtung %
Konfigurationsmöglichkeiten		0,5	0,5	1	0	0,5	2,5	0,167
Einheitliche Schnittstelle	0,5		1	1	0,5	1	4	0,267
Kompakter Aufbau/Steifigkeit	0,5	0		0,5	0,5	0,5	2	0,133
Hohes Verhältnis V/A	0	0	0,5		0,5	0	1	0,067
Einsatz größerer Module	1	0,5	0,5	0,5		0	2,5	0,167
Geringer Fertigungsaufwand	0,5	0	0,5	1	1		3	0,200
							15	1,000

Tabelle 2 - Paarweiser Vergleich der Modulformen

Die Relevanz der Konfigurationsmöglichkeiten, welche ein großes Anwendungsgebiet ermöglichen, ist gleichzusetzen mit jener einer einheitlichen Schnittstelle, die für ein einfaches Rekonfigurieren und eine gute Erweiterbarkeit des Roboters sorgt. Der kompakte Aufbau und die damit einhergehende Steifigkeit des Gesamtsystems sind für die Aktuatoren und die Reproduzierbarkeit beim Ausführen von Aufgaben etwa gleichbedeutend wie die Konfigurationsmöglichkeiten. Das hohe Verhältnis von Volumen zu Oberfläche der einzelnen Module ist den Konfigurationsmöglichkeiten untergeordnet. Der Einsatz größerer Module hingegen ist, aufgrund der unterschiedlichen Bauteile, welche je nach Anwendung einen bestimmten Bauraum benötigen, höher zu bewerten als die Konfigurationsmöglichkeiten. Ein geringer Fertigungsaufwand und die damit einhergehenden niedrigeren Kosten sind etwa gleichbedeutend wie die Konfigurationsmöglichkeiten, denn wenn das Anwendungsfeld vergrößert wird, ist eine verhältnismäßige Erhöhung der Kosten zulässig. Eine einheitliche Schnittstelle ist für das Produkt wichtiger als ein kompakter Aufbau oder ein hohes Verhältnis

von Volumen zu Oberfläche, da ein Anpassen an verschiedene Umgebungen und Aufgaben erleichtert wird und somit der Nutzen und das Anwendungsfeld des mobilen Manipulators wesentlich erhöht werden. Der Einsatz von größeren Modulen ist etwa von gleicher Relevanz wie eine einheitliche Schnittstelle, da manche Bauteile einen großen Bauraum benötigen und je nach Anwendung aber notwendig sein können. Dem geringen Fertigungsaufwand ist weniger Relevanz zuzuschreiben als einer einheitlichen Schnittstelle, da diese den Nutzen des Gesamtsystems wesentlich erhöht. Der kompakte Aufbau und die Steifigkeit des Gesamtsystems sind einem hohen Verhältnis von Volumen zu Oberfläche und dem Einsatz größerer Module etwa gleichzusetzen. Denn werden größere Module eingesetzt, so erhöht sich die Steifigkeit, weil weniger Verbinder notwendig sind und das Chassis der Module im Normalfall steifer ist. Auch dem geringen Fertigungsaufwand ist eine ähnliche Relevanz wie dem kompakten Aufbau zuzuschreiben. Kann eine höhere Steifigkeit erzielt werden, so darf der Fertigungsaufwand in einem gewissen Rahmen steigen. Da sowohl ein hohes Verhältnis von Volumen zu Oberfläche als auch der Einsatz größerer Module für mehr Platz innerhalb der Module sorgen, sind diese im Paarweisen Vergleich gleich zu bewerten. Ein geringer Fertigungsaufwand ist aus Kostengründen dem Verhältnis von Volumen zu Oberfläche und dem Einsatz größerer Module vorzuziehen.

Es zeichnet sich die Relevanz einer einheitlichen Schnittstelle ab und auch ein geringer Fertigungsaufwand, um die Kosten der Fertigung niedrig zu halten, ist wichtig. Das Verhältnis von Volumen zu Oberfläche der einzelnen Module ist jenes Kriterium, welches den geringsten Einfluss in der Nutzwertanalyse haben wird, aber aufgrund des festgelegten Platzbedarfs der Verbinder durchaus von Bedeutung ist.

5.2.3 Nutzwertanalyse der Modulformen

Um eine objektive Aussage über die Erfüllung der gefundenen Bewertungskriterien der möglichen Modulformen zu finden, wurde eine Nutzwertanalyse durchgeführt. Dabei wurden die mit dem Paarweisen Vergleich gefundenen Gewichtungen übernommen und die Erfüllung der Kriterien der Varianten mit dieser Gewichtung multipliziert. Eine hohe Summe der gewichteten Werte weist auf eine gute Lösung hin. In Tabelle 3 kann die durchgeführte Nutzwertanalyse nachvollzogen werden.

	Gewichtung	Würfel		Hexagonales Prisma		Zylinder		Würfel und Quader	
		Wert	Gew. Wert	Wert	Gew. Wert	Wert	Gew. Wert	Wert	Gew. Wert
Konfigurationsmöglichkeiten	0,167	10	1,67	7	1,17	3	0,50	9	1,50
Einheitliche Schnittstelle	0,267	10	2,67	4	1,07	10	2,67	10	2,67
Kompakter Aufbau/Steifigkeit	0,133	8	1,07	10	1,33	3	0,40	9	1,20
Hohes Verhältnis V/A	0,067	7	0,47	5	0,33	4	0,27	9	0,60
Einsatz größerer Module	0,167	6	1,00	5	0,83	0	0,00	10	1,67
Geringer Fertigungsaufwand	0,200	10	2,00	3	0,60	2	0,40	8	1,60
		51	8,87	34	5,33	22	4,23	55	9,23

Tabelle 3 - Nutzwertanalyse der Modulformen

Die Konfigurationsmöglichkeiten sind bei einem Aufbau nur mit Würfel praktisch uneingeschränkt. Werden Zylinder gewählt, so sind die Konfigurationsmöglichkeiten aufgrund der Geometrie im Vergleich gering. Eine einheitliche Schnittstelle ist bei Verwendung von Würfel und Quader problemlos möglich, wenn die Seitenlängen aufeinander abgestimmt sind. Bei zylindrischer Form ist eine einheitliche Schnittstelle auf der Mantelfläche nur mit erhöhtem Aufwand umsetzbar. Ein kompakter Aufbau, welcher mit einer hohen Steifigkeit in Verbindung steht, ist bei Würfel und Quader am besten umsetzbar, da größere quaderförmige Module die Steifigkeit des Gesamtsystems erhöhen. Im Gegensatz dazu steht der offene Aufbau aus zylindrischen Modulen, welche keinen kompakten, lückenlosen Gitteraufbau zulassen. Das Verhältnis von Volumen zu Oberfläche der Module spiegelt den zur Verfügung stehenden Raum für das Modulinnenleben zur Oberfläche, welche für die Verbinder benötigt wird, wider. Ist das Verhältnis zu gering, dann kann das zu einem unnötig hohen Einsatz an Verbindern führen. Daraus resultieren ein höherer Fertigungsaufwand und damit einhergehende höhere Kosten. Außerdem wirken sich überflüssige Komponenten auf die Masse des Roboters aus und das muss bei der Motorauslegung beachtet werden. Die zusätzliche Masse führt zu einem höherem Energieverbrauch bei der Fortbewegung und das wiederum zu einem größeren und schwereren Akkumulator. Durch die Kombination von Würfel und Quader kann das Verhältnis von Volumen zu Oberfläche an das Modul und dessen

Funktionsumfangs angepasst werden. Außerdem können dadurch überflüssige Verbinder vermieden werden. Auch der Einsatz größerer Module kann überflüssige Verbinder vermeiden und die Kombination von Würfel und Quader lässt dies am einfachsten zu. Der Fertigungsaufwand ist bei den Würfeln am geringsten, da die Anzahl benötigter unterschiedlicher Teile am geringsten ist und diese Form am wenigsten komplex ist.

Das Ergebnis der Nutzwertwertanalyse zeigt klar, dass für diese Problemstellung der Einsatz von Würfel, oder die Kombination von Würfel und Quader anzustreben ist. Da die beiden Summen der gewichteten Werte der beiden genannten Lösungen ähnlich hoch sind, wird folgend noch eine Schwachstellenanalyse zur Entscheidungsfindung durchgeführt. Sowohl das hexagonale Prisma als auch der Zylinder weisen geringe gewichtete Gesamtwerte auf und werden somit nicht weiter als sinnvolle Lösung angesehen. Eine weitere Auseinandersetzung mit den ungünstigeren Lösungen würde keinen Nutzen, sondern nur unnötigen Aufwand mit sich bringen.

5.2.4 Schwachstellenanalyse der Modulformen

Um eventuelle Schwachstellen der Modulformen aufzuzeigen, wurden Werteprofile erstellt und gegenübergestellt. Abbildung 11 zeigt das visuelle Ergebnis der Schwachstellenanalyse mit den aufgelisteten Bewertungskriterien.

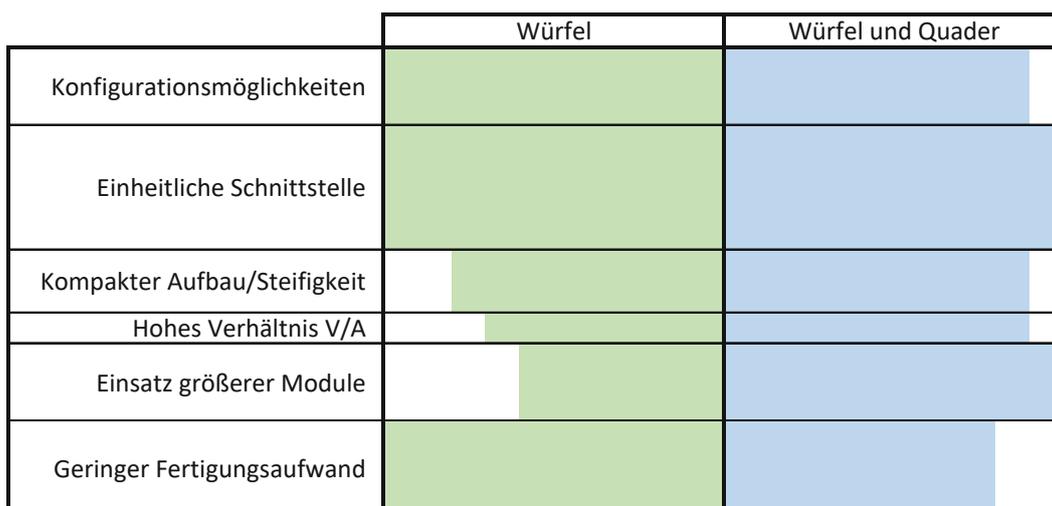


Abbildung 11 - Schwachstellenanalyse: Werteprofile der Modulformen

Die Höhe der einzelnen Balken zeigt die Gewichtung der einzelnen Kriterien und die Längen den erzielten Wert bei der Nutzwertanalyse. Die Würfel erfüllen zwar viele Kriterien

ausgezeichnet, aber weisen wiederum nicht zu vernachlässigende Schwachstellen bei dem Einsatz größerer Module und dem Verhältnis von Volumen zu Oberfläche der Module auf. Das Werteprofil der Würfel und Quader ist ausgeglichener und weist nur beim Fertigungsaufwand relevante Defizite im Vergleich zu den Würfeln auf. Der Fertigungsaufwand ist allerdings schwierig abzuschätzen, da dieser auch wesentlich von den Verbindern und deren Komplexität abhängt und wenn nicht notwendige Verbinder durch Quader vermieden werden, so sinkt dieser.

Als sinnvoller Ansatz ergibt sich würfelförmige Module anzustreben und wenn größere Module benötigt werden auf Quader mit einer vielfachen Seitenlänge der des Würfels auszuweichen. Das führt dazu, dass keine unnötigen Verbinder verbaut werden, die Konfigurationsmöglichkeiten hoch sind und ein kompakter, steifer Gitteraufbau möglich ist. Ohne Berücksichtigung der Eigenschaften der mechanischen und elektrischen Verbinder kann ein Würfel in 24 Orientierungen auf ein darunter liegendes Modul gesetzt werden.

5.3 Verbinder und deren Einflüsse auf die Konfigurierbarkeit

Ziel dieses Abschnittes ist es, in Abhängigkeit verschiedener Verbinder, die Konfigurierbarkeit des Gesamtsystems zu bewerten. Diese Verbinder werden im Zusammenhang mit einer modularen Bauweise auch oft als Schnittstellen bezeichnet und diese sind für die Interaktion benachbarter Module zuständig. Bei ähnlichen Anforderungen innerhalb des Gesamtsystems an die Verbinderelemente können die Verbinder standardisiert werden [16, S. 93]. Der konkrete Aufbau der Verbinder wird in einer anderen Arbeit im Zuge des *TURBO* Projektes, aufbauend auf den Ergebnissen dieses Abschnittes, behandelt und konkretisiert. Es sollen hier Anforderungen an die Verbinder abgeleitet werden, welche eine hohe Anzahl an Konfigurationsmöglichkeiten erlauben.

Um die Anzahl der möglichen Konfiguration nicht einzuschränken, sind Verbinder notwendig, die sich bei einer Rotation um 90° immer noch verbinden lassen. Mechanisch lässt sich diese Anforderung leicht umsetzen. Wird aber das Problem von der elektrotechnischen Seite betrachtet, so treten hier Schwierigkeiten auf. Bei den handelsüblichen elektrischen Verbindern handelt es sich oft um Male/Female Konnektoren und das kann einen Einfluss auf die Konfigurierbarkeit haben. Eine mögliche Lösung neben handelsüblichen Steckverbindungen wäre rotationssymmetrische oder drehbare Stecker selbst zu entwickeln.

Das führt allerdings zu einem hohen Mehraufwand und aufgrund der Kostenanforderungen wird das nicht näher in Betracht gezogen.

5.3.1 Verbinder in rotationssymmetrischen Anordnungen

Um zwei Module in Vielfachen von 90° Rotationen immer noch verbinden zu können, ist ein rotationssymmetrischer Aufbau erforderlich. In den folgenden Abbildungen stellt *Gelb* den *Female* und *Blau* den *Male* Anschluss dar. Damit sich zwei Module erfolgreich verbinden lassen, müssen immer ein Female und eine Male Konnektor aneinander liegen. Es bietet sich eine rotationssymmetrische Anordnung mehrerer Female Konnektoren an und entweder ein einzelner oder auch eine rotationssymmetrische Anordnung von Male Konnektoren.

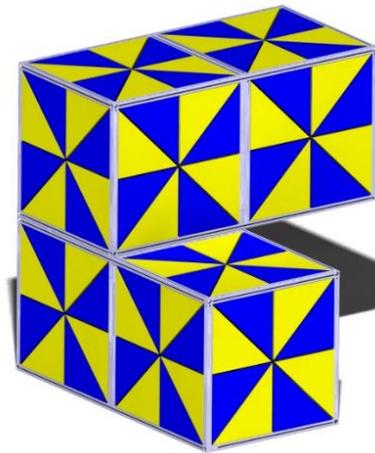


Abbildung 12 - Kompatibilität von Modulen bei 90° verbindbaren Male/Female Konnektoren

In Abbildung 12 ist die Prinzipskizze zweier zusammengefügter Module mit einer Male/Female Konfiguration, welche um 90° drehbar ist, dargestellt. Damit ist ein uneingeschränktes Verbinden der Module möglich, wenn die Anzahl an Verbindern und deren Position an den jeweiligen Modulen uneingeschränkt ist. Dieser Lösungsansatz führt zu vielen Konfigurationsmöglichkeiten, aber auch zu einer hohen Anzahl an benötigten Steckverbindern.

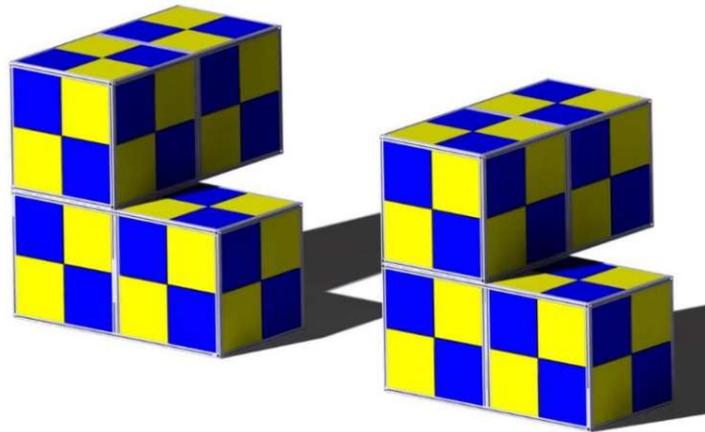


Abbildung 13 - Kompatibilität von Modulen bei 180° verbindbaren Male/Female Konnektoren

Das linke Bild der Abbildung 13 zeigt einen Verbinderaufbau, welcher lediglich um 180° drehbar ist, da sich bei einer Rotation von 90° die Male/Female Konnektoren unpassend gegenüberstehen und keine Verbindung möglich ist. Erkennbar ist dies an der unterschiedlichen Ausrichtung der oben liegenden Flächen. Das rechte Bild der Abbildung 13 zeigt einen Aufbau, bei dem die Verbinderelemente unabhängig vom Chassis rotierbar sind. Die Ausrichtung der Verbinder kann an die umgebenden Verbinder angepasst werden und es entstehen somit keine Einschränkungen hinsichtlich der Konfigurationen. Allerdings führt das zu einem erhöhten Zeitaufwand bei Konfigurationsänderungen. Außerdem ist die Anzahl notwendiger Steckverbinder immer noch sehr hoch.

5.3.2 Verbinder mit rotierbaren Mechanismen

Um diese genannten Probleme der rotationssymmetrischen Anordnungen zu lösen, wäre eine rotierbare Steckverbindung möglich, welche passend zum Gegenstück ausgerichtet werden kann. Das hat aber den Nachteil, dass beim Zusammenbauen einer Konfiguration darauf geachtet werden muss, wie die rotierenden Elemente zueinander stehen. Bei diesem Ansatz ist es ausreichend, wenn jeweils nur die Female oder nur die Male Konnektoren drehbar sind. Um Rotationen um ein Vielfaches von 90° zuzulassen, reicht es bei günstiger Wahl der mittleren Position aus, den Male Konnektor um 270° drehbar zu lagern.

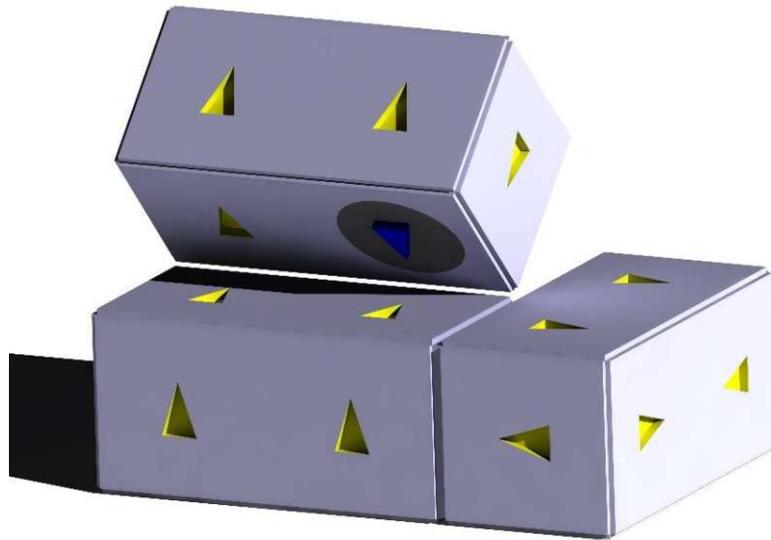
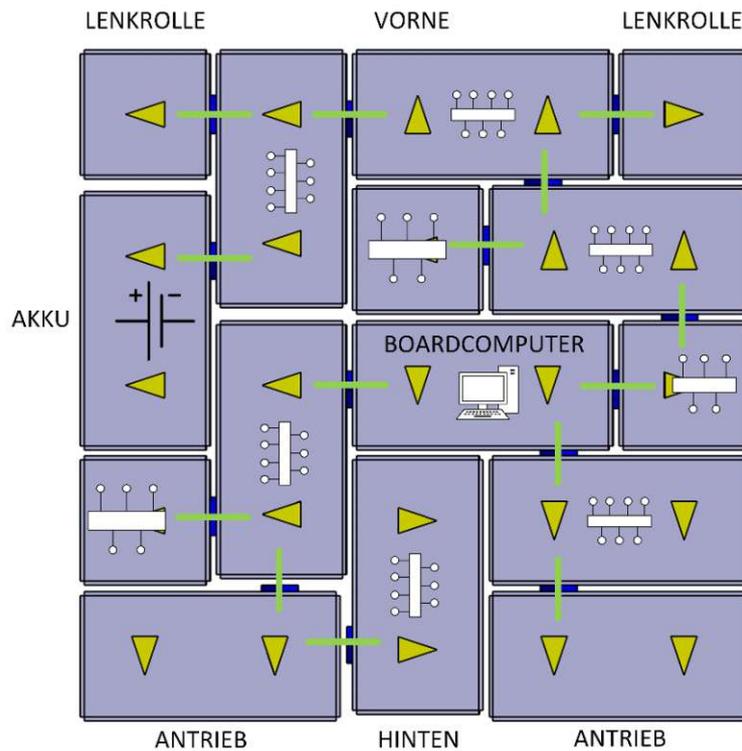


Abbildung 14 - Kompatibilität bei Modulen mit einem rotierbaren Mechanismus

In Abbildung 14 ist dieses Prinzip abgebildet, wobei hier nur der Male Konnektor drehbar gelagert ist. Das Modul mit dem Boardcomputer als zentrales Element besitzt nur Female Konnektoren und jedes andere Modul verfügt über einen einzigen Male Konnektor. Die mechanische Verbindung ist unabhängig von der elektronischen Verbindung und verbindet somit immer zwei aufeinandertreffende Kontakte und sorgt für eine ausreichende Steifigkeit. Die verwendete Kommunikationstechnologie EtherCAT unterstützt die durch den mechanischen Aufbau entstehende Baum-Netzwerktopologie [47]. Abbildung 15 zeigt beispielhaft die entstehende Netzwerktopologie einer möglichen Konfiguration. Dabei wird in jedem Modul ein 8-fach Abzweig eingebaut, welcher einen Eingang hat, der dann mit dem Male Konnektor verbunden werden muss. Im Vergleich zu den rotationsymmetrischen Anordnungen, welche in 5.3.1 behandelt werden, ist der Verkabelungsaufwand geringer, da nur jeweils ein Anschluss je Verbinder vorgesehen werden muss. Allerdings muss hier ein rotierbarer Mechanismus für den Male Konnektor entworfen werden. Außerdem muss die Position des Male Konnektors je nach bevorzugter Einbaulage des Moduls günstig gewählt werden.

Abbildung 15 - Netzwerktopologie: Baumstruktur des *TURBO*

Bei der Realisierung des drehbaren Mechanismus für den Male Konnektor muss auf eine hohe Lebensdauer, bezogen auf die Anzahl der Koppelvorgänge, geachtet werden. Um das Zusammensetzen von Modulen zu erleichtern, sollten bestimmte Positionen des Verbinders über einen Einrastmechanismus vorgegeben oder ein Sperren der Drehverbindung möglich sein. Der Kontakt für den Signal- und Energiefluss kann entweder über ein Kabel oder über einen rotierbaren Schleifkontakt erfolgen. Im Rahmen dieser Arbeit sollen aber nur die Anforderungen und Schwierigkeiten aufgezeigt werden, welche bei der Realisierung der Konnektoren auftreten können, da die Umsetzung der Verbinder in einer anderen Arbeit des Projektes *TURBO* behandelt wird.

5.4 Funktionsstruktur des mobilen Manipulators

Die Aufteilung der Gesamtfunktion des mobilen Manipulators in einzelne Funktionen ist in Abbildung 16 auf der folgenden Seite abgebildet. In der Legende ist die farbliche Kennzeichnung des Informations- und Energieflusses dargestellt. Die einzelnen Funktionen werden jeweils durch Subjekt und Verb beschrieben und beinhalten zum Teil eine untergeordnete Strukturierung, welche eine allgemeine Bezeichnung für Komponenten beinhalten.

Der Informationsaustausch mit der Umgebung wird über ein User Interface erfolgen, wo sowohl Daten vom Benutzer eingegeben als auch Informationen ausgegeben werden können. Bei der Entwicklung der Benutzerschnittstelle ist vor allem auf die Ergonomie und Benutzerfreundlichkeit zu achten, sowie auf eine intuitive Bedienung mit einer Anleitung zum Nachschlagen. Die in der Benutzerschnittstelle ausgetauschten Informationen werden von einem Boardcomputer verarbeitet und an alle Komponenten, welche diese benötigen, verteilt. An dieser Stelle werden auch von der Sensorik gelieferte Informationen zugeführt und diese an den Boardcomputer weitergeleitet. Die benötigte Energie muss extern zugeführt und intern gespeichert werden, damit der Roboter auch ohne elektrische Anbindung an die Umgebung betrieben werden kann. Um die Energieversorgung aller Komponenten gewährleisten zu können, ist eine Einheit notwendig, welche den Energiehaushalt überwacht und die Energie an die angeschlossenen Komponenten, je nach Anforderungen, verteilt. Der Einsatz von mehreren Spannungsniveaus wird wahrscheinlich notwendig sein, da sich die Anforderungen der Aktuatoren und Sensoren wesentlich unterscheiden. Als Interaktion mit der Umgebung werden in der Funktionsstruktur die Fortbewegung des Roboters und andere Aktuatoren genannt, welche noch nicht weiter definiert sind und je nach Entwicklung unterschiedlich ausgeführt werden können. Auch die Wahrnehmung der Umgebung und der internen Robotereigenschaften ist in dieser Darstellung noch nicht genauer definiert und die technische Ausführung soll in einer Arbeit zum Thema Sensorik geklärt werden.

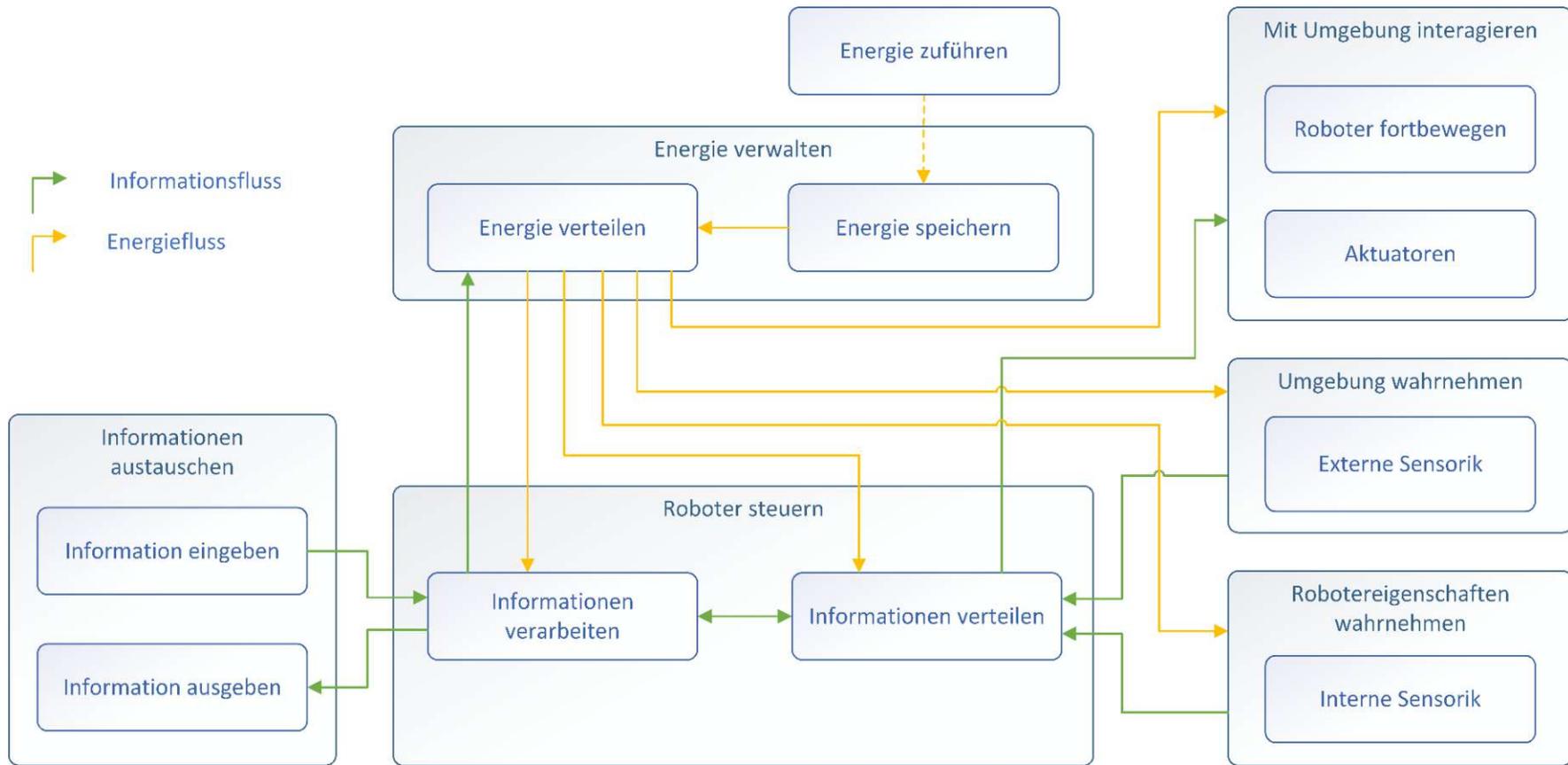


Abbildung 16 - Funktionsstruktur am Beispiel des *TURBO*

5.5 Produktstruktur des mobilen Manipulators

Die Produktstruktur zeigt den physikalischen Aufbau des Produktes und deren Verbindungen zueinander. Das ist vor allem bei einem modularen Aufbau wichtig, um die möglichen Konfigurationen zeigen zu können. Die Zuteilung der Komponenten, welche bestimmte Funktionen übernehmen und anschließend einzeln oder in Gruppen zu Modulen zusammengefasst und vom Rest des Produktes zu einem gewissen Grad entkoppelt werden, beeinflusst die Variantenbildung stark. [16, S. 80]

Das Zusammenfassen einzelner Komponenten zu den Modulen hängt im Wesentlichen von den Funktionen der Komponenten und deren Abhängigkeiten in der Funktionsstruktur ab. Erst durch die Entkopplung von Modulen, welche eine hohe innere Kopplung aufweisen, können die Vorteile der Modularität ausgenutzt werden. In dem Schritt der Modularisierung muss außerdem der zur Verfügung stehende Bauraum beachtet werden. Da eine Anforderung an den mobilen Manipulator die hohe Konfigurierbarkeit ist, sind Module in einheitlicher Größe oder einem Vielfachen dieser, auszuführen. Abbildung 17 zeigt die Produktstruktur des mobilen Manipulators. Die Elemente der Funktionsstruktur sind bestimmten Komponenten zugeordnet und abgeschnittene Rechtecke deuten weitere mögliche Lösungen an. In der Produktstruktur ist die Umsetzung von Energie- und Signalfluss mit EtherCAT eingezeichnet. Diese Produktstruktur enthält im Vergleich zur Funktionsstruktur zusätzlich eine übertragene mechanische Größe, da die Aufteilung innerhalb des Antriebsmoduls diese erfordert. Das Mastermodul als zentrales Modul verwaltet mit dem Boardcomputer den Informationsfluss des Gesamtsystems mit Hilfe des Abzweigers. Ein Energieverwaltungsmodul sorgt für die Verteilung der elektrischen Leistung, die vom Akkumulator bereitgestellt wird. Das User Interface lässt den Benutzer mit dem Roboter kommunizieren wobei eine Verbindung zum Boardcomputer bestehen muss. Andere Kooperations- und Kommunikationsmodule, welche beispielsweise für die Informationsübertragung zwischen zwei Robotern zuständig sind, sind auch mit dem Abzweiger verbunden. Für den mobilen Manipulator kommt eine große Anzahl an verschiedenen Sensoren in Frage, die entweder für die Umgebungswahrnehmung oder für die Informationsbereitstellung interner Größen eingesetzt werden können. Das Antriebsmodul und die Aktuatoren interagieren mit der Umgebung und benötigen jeweils zumindest einen Informations- und Energiefluss.

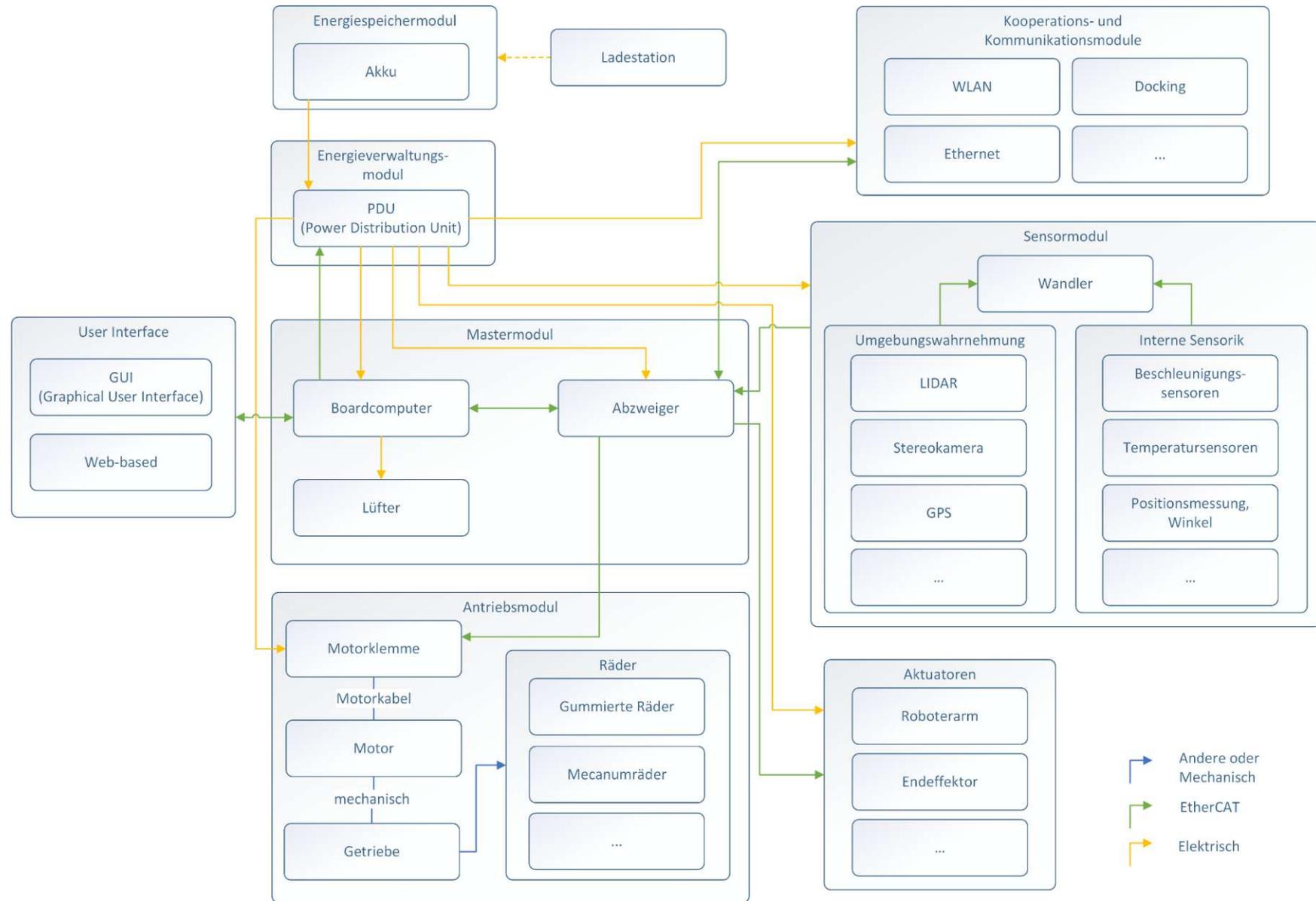


Abbildung 17 - Produktstruktur am Beispiel des TURBO

5.6 Abschätzung der Modulgröße

Die Seitenlänge eines Würfels wurde als bestimmendes Maß in der parametrischen Konstruktion definiert und legt somit das Volumen und die Oberfläche der Module fest. Durch bestimmte Bauteile, welche häufig in der Robotik eingesetzt werden, kann die Mindestlänge der Würfel abgeschätzt werden. So hat beispielsweise der Boardcomputer *NVIDIA Jetson Nano 2* [48] eine Länge von 100mm. Die zur Verfügung stehende Oberfläche und eine gewisse Tiefe sind für die Verbinder relevante Maße, welche berücksichtigt werden müssen. Der Platz für die Verbinder wurde mit einem Tiefenmaß von 20mm abgeschätzt und als Anforderung an die Konstruktion dieser weitergegeben. Darüber hinaus wurde ein abgeschätzter Platzbedarf für Kabel und Montageelemente eingerechnet. Diese Überlegungen führten zu einer abgeschätzten Seitenlänge der Würfel von etwa 160mm für das Boardcomputermodul. Der benötigte Bauraum für Verteiler, welche unter anderem von der Firma Beckhoff angeboten werden, ist etwas größer als jener des Boardcomputers, allerdings sind die Anschlüsse günstig angebracht und auch diese können in einem Modul mit 160mm Seitenlänge untergebracht werden. Da der informationsverarbeitende Boardcomputer immer einen Verteiler benötigt, ist es sinnvoll, diese Komponenten in einem größeren Modul zu vereinen. Es ergibt sich daher ein Quader mit den Seitenlängen 320mmx160mmx160mm. Andere große Komponenten sind im Antriebsmodul zu finden und können für die einheitliche Modulgröße relevant sein. In der Diplomarbeit zum Antriebsmodul wurden Komponenten gesucht, welche die räumlichen Voraussetzungen, unter Berücksichtigung aller anderen Anforderungen an dieses Modul, erfüllen. Dabei stellte sich heraus, dass auch hier der Einsatz von quaderförmigen Modulen mit den Seitenlängen 320mmx160mmx160mm notwendig sein wird. Die dort eingebauten Komponenten wie Motor und Getriebe sind stark gekoppelt und ein gemeinsames Unterbringen in einem Modul ist sinnhaft. Die Räder des Antriebsmoduls sind außerhalb angebracht und haben damit keinen Einfluss auf die Modulgröße und können einfach durch andere Räder ersetzt werden. Übliche Sensoren stellen keine hohen Anforderungen an den Platzbedarf und die gefunden Seitenlängen sind ausreichend. Die Schnittstelle der Aktuatoren, vor allem jene des Roboterarms, ist noch nicht genauer definiert.

5.7 Funktionsabhängige Modularisierung

Wie in der Produktstruktur abgebildet, werden je nach Anforderungen mehrere Komponenten, die bestimmte Funktionen des Roboters erfüllen, zu Modulen zusammengefasst. Zentrale Module des Roboters, welche in allen Varianten vorkommen, wie beispielsweise ein Boardcomputermodul oder Antriebsmodule, können auch als Basis der Plattformstrategie angesehen werden. Auch wenn später eventuell Varianten dieser Module erarbeitet werden, so werden diese Module zu Beginn in allen Produktvarianten in gleicher Bauweise vertreten sein und bilden somit den wiederkehrenden Kern der Produktfamilie. Die anderen Module werden dann, je nach Anforderungen der zu bewältigenden Aufgabe, mit der Basis verbunden. Ein solcher Aufbau ist eine Kombination des Prinzips des Modulbaukasten und der modularen Produktfamilie. Dieser Ansatz ermöglicht den Aufbau eines Prototyps mit reduzierter Komplexität und der darauf aufbauenden Entwicklung weiterer Module, welche im Zusammenbau mit der Basis getestet werden können. Die Basis setzt sich im Wesentlichen aus den folgenden Modulen zusammen:

- Boardcomputermodul
- Antriebsmodule
- Energieversorgungsmodul.

Damit der mobile Manipulator an verschiedene Problemstellungen angepasst werden kann und somit die Vorteile des modularen Aufbaus und der Rekonfigurierbarkeit ausgenutzt werden können, sind weitere Module mit den folgenden Komponenten notwendig:

- Sensoren
- Aktuatoren
- PDU (Power Distribution Unit)
- Akkumulator
- Platzhalter und Ablageflächen
- Variationen und Kombinationen der Komponenten.

5.7.1 Antriebs- und Lenkmodul für einen Differentialantrieb

Folgend sind Überlegungen im Zusammenhang mit dem Gesamtentwurf, welche für eine erfolgreiche Implementierung des Antriebsmoduls relevant sind, angeführt. Das

Antriebsmodul mit den Seitenlängen 320mmx160mmx160mm setzt sich im Wesentlichen aus einem Motor, einem Getriebe und einem Rad zusammen. Für den Gesamtentwurf sind die Orientierung des Quaders und die Orientierung und Position der Achse des Rades und die Seite, an welcher die Verbinder angebracht werden können, wesentlich. Das Lenkrollenmodul ist 160mmx160mmx160mm und beinhaltet ein freilaufendes Rad, welches um die z-Achse frei drehbar gelagert ist. Abbildung 18 zeigt den vereinfachten Aufbau des Lenkrollenmoduls. In diesem Abschnitt soll nur der Differentialantrieb mit je zwei Antriebsmodulen und zwei Lenkrollenmodulen betrachtet werden.

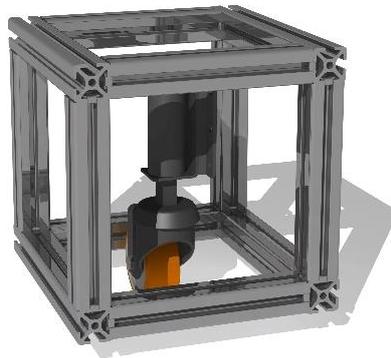


Abbildung 18 - Rendering eines Lenkrollenmoduls

Es werden drei Varianten der Radmontage der Antriebsmodule mit integriertem Motor und Getriebe betrachtet und deren Auswirkungen auf die Konfigurationen aufgezeigt. In Abbildung 19 sind Renderings vereinfachter Modelle gegenübergestellt und deren grundsätzlicher Aufbau ersichtlich. Bei einem Differentialantrieb liegen im Regelfall die angetriebenen Räder auf einer Achse und das soll auch für diese Aufbauten vorausgesetzt werden. Als Vorteil der ersten und zweiten Varianten ist die niedrige Bauform zu nennen. Mit der Variante 1 sind Konfigurationen ab einer Breite von vier Würfelmodulen möglich. Das führt bei einer Seitenlänge der Würfel von 160mm zu einer Gesamtbreite ohne Räder von 640mm. Variante 2 und 3 ermöglichen schmalere Konfigurationen mit einer Breite von nur 320mm. Schmale und lange Konfigurationen benötigen aber bei Wendemanövern viel Platz. Bei gleicher Anzahl an Modulen ist daher ein Aufbau mit quadratischer Grundfläche vorzuziehen und die schmale Bauweise ist nicht weiter relevant. Für die Konstruktion sollte aufgrund der möglichen niedrigen Bauweise eine der ersten beiden Varianten verfolgt werden.

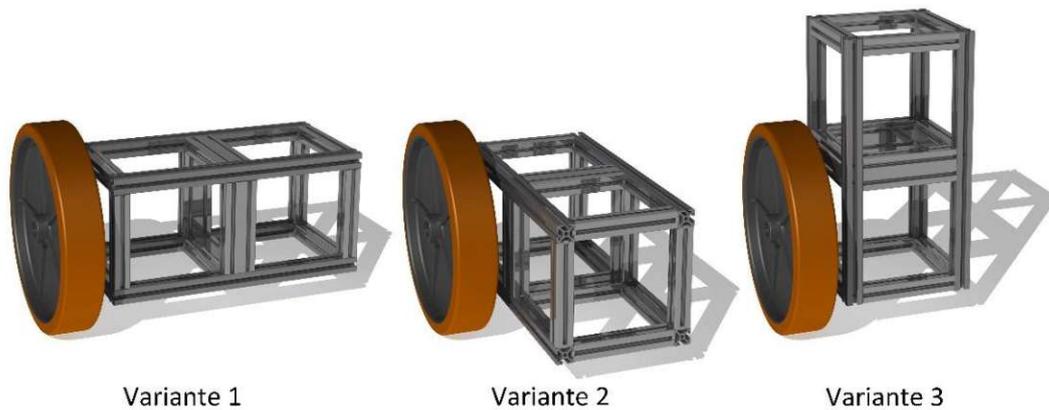


Abbildung 19 - Rendering der Antriebsmodulvarianten

5.7.2 Akkumulatoren und Ladesystem

Die Akkumulatoren müssen nach der benötigten Leistung des Gesamtsystems ausgelegt werden. Eine Abschätzung der notwendigen Leistung kann schon vor der Auswahl der Komponenten erfolgen. Dabei können Komponenten mit einer niedrigen benötigten Leistung vernachlässigt werden. Die leistungsintensivsten Module sind jene des Antriebs. Der Servomotor AM8112-wFyz [49] der Firma *Beckhoff* hat laut dem Datenblatt eine Nennleistung von 170W. Der Spitzenstrom eines Motors beträgt 16,5A und die Nennspannung 48V. Konfigurationen mit einem Differentialantrieb benötigen zwei Antriebsmodule. Für eine erste überschlägige Auslegung werden gesamt 400W angenommen, da andere Komponenten auch eine gewisse Leistung benötigen. Akkumulatoren von E-Bikes und E-Scooter weisen hinsichtlich der elektrischen und mechanischen Eigenschaften ähnliche Anforderungen wie der Akkumulator des Roboters auf. *Akkushop24*¹ bietet eine Vielzahl an Lithium-Ionen-Akkus mit diesen Eigenschaften an. Erhältlich sind diese für 48V in Kapazitäten von etwa 10Ah bis 30Ah mit zulässigen Spitzenströmen von 90A bis 180A. Bei einer angenommenen Kapazität von 15Ah und einer Leistung von 400W bei 48V ist eine Betriebszeit von 1,8 Stunden zu erwarten (1).

$$t = \frac{U * Q}{P} = \frac{48V * 15Ah}{400W} = 1,8h \quad (1)$$

¹ <https://www.akkushop-24.de/> (Zugriff am 26.12.2021)

5.8 Kippsicherheit verschiedener Konfigurationen

Um Konfigurationen hinsichtlich deren Kippsicherheit bewerten zu können, sind Berechnungen und Modelle zur Schwerpunktsermittlung notwendig. Mit den so gewonnenen Informationen können Konfigurationen erstellt werden, welche eine ausreichende Sicherheit gegen Kippen aufweisen. Außerdem können die Masse und die Schwerpunktslage genutzt werden, um zulässige Geschwindigkeiten und Beschleunigungen zu definieren, welche in der Software des Roboters implementiert werden können.

Um ein Kippen bei Rampenfahrten ausschließen zu können, ist die Bestimmung des Gesamtschwerpunktes notwendig. Aus den detaillierten und umfangreichen Modellen der einzelnen Module werden die Schwerpunkte der einzelnen Module ausgelesen und die Massen jener Komponenten, welche noch nicht festgelegt sind, werden abgeschätzt. Diese Informationen werden in vereinfachten Modellen übernommen und Gesamtschwerpunkte von einzelnen Konfigurationen können so schnell und zuverlässig ausgegeben werden, ohne große Rechenkapazitäten zu benötigen. Für jene Komponenten, welche erst im Zuge weiterer Arbeiten definiert werden, wie beispielsweise der Roboterarm, werden Massen und Positionen in Anlehnung an andere ähnliche und handelsübliche Komponenten angenommen.

5.8.1 Annahmen bei der Schwerpunktanalyse

Zum Abschätzen der Masse der Module erfolgte eine Recherche von ähnlichen Produkten und Komponenten von etablierten Herstellern. Außerdem können, bei korrekter Zuweisung der Materialien zu den Komponenten, Daten zur Masse und der Schwerpunktslage aus dem CAD-Modell entnommen werden.

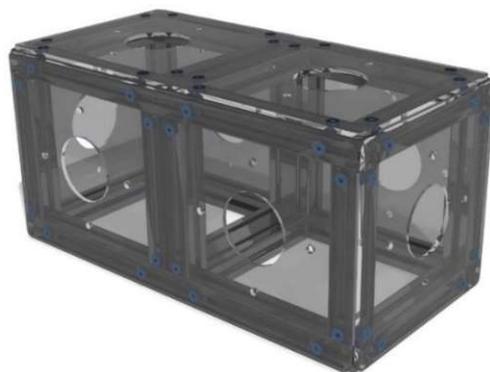


Abbildung 20 - Rendering des Chassis mit Verbindungsplatten aus Acrylglas

Abbildung 20 zeigt ein Rendering des Chassis eines Moduls mit Abdeckungen aus Acrylglas. Diese Abdeckungen wurden als günstige Alternative zu den noch nicht ausgearbeiteten Verbindern entworfen und wurden aufgrund der Transparenz für das Rendering des Chassis gewählt. Die Profile aus Aluminium sind an den Stoßpunkten mit Standardverbindern dieses Profilsystems verbunden. Die Abdeckplatten werden mit Nutensteinen und Senkkopfschrauben montiert. Da sich das Gewicht der Verbinder wesentlich von dem der Acrylglasplatten abheben wird, muss dieses abgeschätzt werden. Das Zuweisen von Aluminium als Material für die Abdeckplatten und das Aufschlagen von etwa 150g pro Verbinder ist für die Berechnung eine ausreichend exakte Abschätzung. Abbildung 21 zeigt die CAD-Modelle der Chassis mit den für den Prototyp entworfenen Ersatzelementen für die Verbinder. Das Gewicht des links abgebildeten Würfelmoduls beträgt 1,8kg und jenes des Quadermoduls 3,2kg. Die offenen Seiten ermöglichen das Einsetzen von Komponenten und können, je nach Einsatz und Anforderungen durch eine zusätzliche Abdeckung verschlossen werden. Das Aufschlagen der zusätzlichen Masse der Verbinder führt zu einer Masse des würfelförmigen Chassis von 2,55kg und des quaderförmigen Chassis von 4,4kg. Das Einsetzen von Sensoren, Aktuatoren oder anderen Komponenten erhöht die Massen zusätzlich und als endgültige Masse für die Berechnung werden 3kg für das kleine Modul und 5kg für das große Modul angenommen.

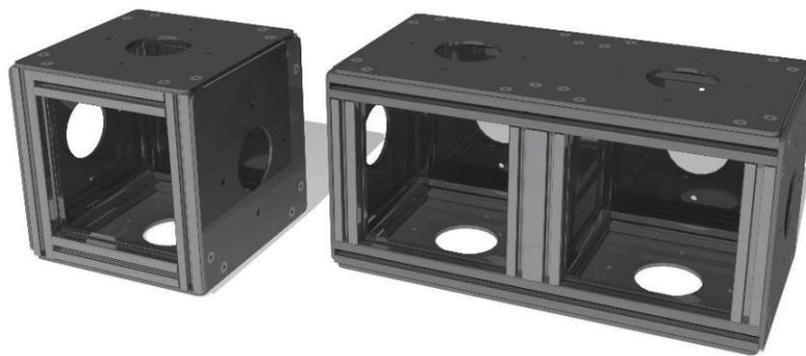


Abbildung 21 - Chassis der Module mit Abdeckungen aus Aluminium

Für die Abschätzung der Masse des Roboterarms werden für die Recherche von ähnlichen Roboterarmen relevante Punkte der Anforderungsliste herangezogen. Die geforderte Armreichweite beträgt 300-1000mm und die minimale Traglast 3kg. Die bei der Recherche erstellte Tabelle 4 stellt gängige Roboterarme und deren für die Abschätzung wichtigen Eigenschaften gegenüber. Die Masse der Roboterarme weicht stark zwischen den Herstellern ab, weil sich diese hinsichtlich der maximalen Traglast und des Aufgabengebietes

unterscheiden. Bei den in Tabelle 4 angeführten Robotern der Firma *HEBI Robotics*² handelt es sich um leichte Industrieroboter mit einer im Vergleich geringeren maximalen Traglast. Die beiden Modelle von *HEBI Robotics* weisen einen modularen Aufbau auf, sind aber nicht für den kollaborativen Einsatz ausgelegt. Da im Projekt *TURBO* ein kollaboratives Arbeiten angestrebt wird, ist von einer höheren Masse des Roboterarms auszugehen, weil zusätzliche Sensoren, Steuerungen und Verkabelungen notwendig sind. Die geringe Masse der Roboter Universal Robots lässt sich durch die Auslagerung von Komponenten in den Schaltkasten erklären. Für die Berechnung wird ein Roboterarm mit einer Reichweite von 500mm, einer Gesamtmasse von 15kg und einer maximalen Traglast von 3kg angenommen.

	Roboterarm					Controller					
	Modell	Reichweite [mm]	Masse [kg]	max Last [kg]	Abmessung [mm]	Bezeichnung	Gewicht [kg]	Abmessungen (LxBxH) [mm]			Leistung [W]
Omron	TM 5-700	700	22,1	6	Ø 177	Control Box		410	210	432	
	TM 5-900	900	22,6	4	Ø 177	Control Box		410	210	432	
Universal Robots	UR3e	500	11,2	3	Ø 128	Schaltkasten	12	460	449	254	100
	UR5e	850	20,6	5	Ø 149	Schaltkasten	12	460	449	254	200
	UR10e	1300	33,5	12,5	Ø 190	Schaltkasten	12	460	449	254	350
	UR16e	900	33,1	16	Ø 190	Schaltkasten	12	460	449	254	350
Umbratek	Ultra 6-550	550	10,5	3	Ø 120	NTRO 350	3	360	162	88	150
	Ultra 6-850	850	13	5	Ø 136	NTRO 750	4	360	162	88	200
	Ultra 6-1000	1000	16	10	Ø 156	NTRO 1000	4,8	360	162	88	300
HEBI Robotics	A-2303-01	500	8,25	1	T-Slot 80/20	HEBI I/O Board		89	60	18	220
	A-2240-06	750	6	0,5	T-Slot 80/20	HEBI I/O Board		89	60	18	220

Tabelle 4 - Vergleich von Roboterarmen zur Abschätzung der Masse [50-53]

Mit den recherchierten Informationen können die Schwerpunktlage und die Gesamtmasse ermittelt werden. Abbildung 22 zeigt das vereinfachte CAD-Modell einer einfachen Konfiguration, welches zur Ermittlung des Gesamtschwerpunktes eingesetzt wurde. Die farbliche Kennzeichnung wird zur Nachvollziehbarkeit kurz beschrieben und ist für die noch folgenden vereinfachten Modelle gleichbleibend. In Schwarz sind die Modulaußenmaße dargestellt und in Rot die jeweils dazugehörigen Schwerpunkte. Die Räder sind in Hellblau dargestellt, um die Ausrichtung des Roboters und die Konfiguration einfacher nachvollziehen zu können. Hier nicht abgebildet ist der Arbeitsraum des Roboterarms, welcher in Gelb dargestellt wäre. In Grün dargestellt ist das absolute Koordinatensystem, auf das sich die Schwerpunktsangabe in *CATIA* bezieht. Die so ausgegebenen Werte zum Schwerpunkt werden zur Berechnung in *Matlab* verwendet.

² <https://www.hebirobotics.com/> (Zugriff am 28.12.2021)

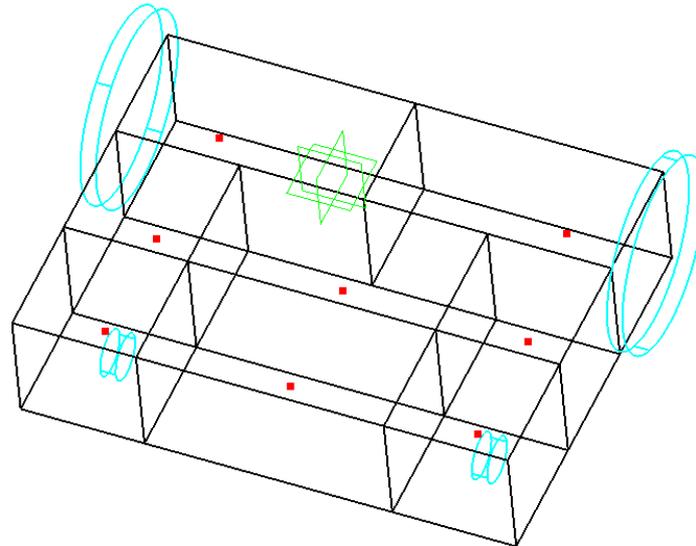


Abbildung 22 - Vereinfachtes CAD-Modell zur Massenmittelpunktsberechnung

5.8.2 Kippberechnung verschiedener Konfigurationen

Für die Berechnung wurden bewusst auch kritische Konfigurationen ausgewählt, um Schwachstellen von hohen und kurzen Aufbauten aufzuzeigen. Für die Konfiguration 4x3x3 werden die notwendigen Arbeitsschritte der Schwerpunktermittlung beschrieben, um eine Basis für noch folgende Arbeiten des Projektes *TURBO* zu schaffen. Die allgemein bekannte Formel der Standsicherheit S_S (2) setzt das Standmoment M_S und das Kippmoment M_K in Verhältnis [54, S. 87]. Bei einem Verhältnis von 1 reicht die geringste Störung, um den Roboter zum Kippen zu bringen.

$$S_S = \frac{M_S}{M_K} \quad (2)$$

Treten außer der Erdbeschleunigung keine weiteren Beschleunigungen auf und befindet sich der Roboter in Ruhe auf einem ebenen Untergrund, dann gilt Folgendes: Der kleinste Winkel, der vom kritischen Aufstandspunkt zum Gesamtschwerpunkt und einer Vertikalen eingeschlossen wird, gibt die maximale Steigung an, auf der der Roboter, ohne zu kippen, stehen kann.

Wenn der Roboter, wie in Abbildung 23 dargestellt, um den Radaufstandspunkt oder um die Radachse kippt, dann wird die Normalkraft in Punkt C zu Null und hat daher keinen Einfluss auf die Kippberechnung. Bei Kippen um den Punkt A kann der gesamte Roboter, inklusive des Antriebs, als eine einzelne Einheit betrachtet werden und der Roboter steht noch im

Gleichgewicht, wenn die Wirkungslinie der Gewichtskraft durch den Kippunkt A geht. Damit ist der zulässige Neigungswinkel der Rampe nur von der Schwerpunktlage und dem Kippunkt abhängig.

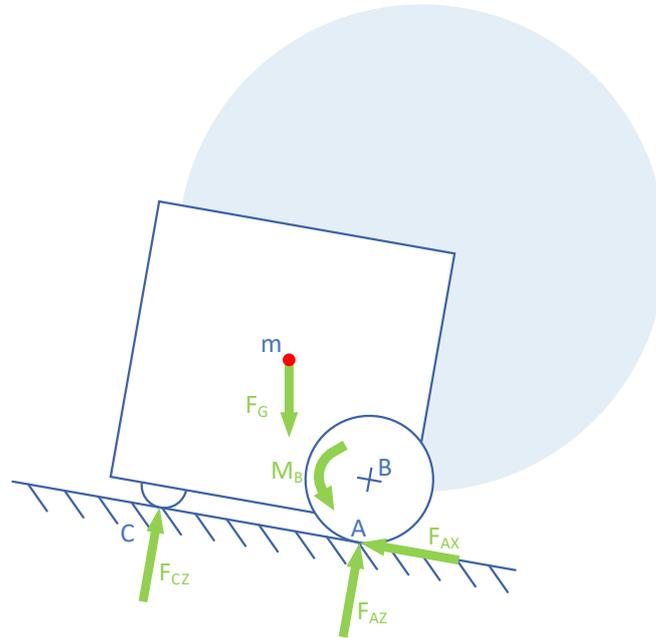


Abbildung 23 - Prinzipskizze: Kippen des Roboters auf einer Rampe

Konfiguration 1

Konfiguration 1 wurde in Anlehnung an das typische Aussehen von mobilen Manipulatoren erstellt. Der Aufbau solcher Roboter setzt sich meist aus einer fahrenden Basis und einem Roboterarm zusammen. Mehrere Beispiele mit dem klassischen Aufbau von mobilen Manipulatoren sind in „*A review of the challenges in mobile manipulation: systems design and RoboCup challenges*“ [55] zu finden.

Bei der Konfiguration 1 handelt es sich um einen Aufbau mit einer ungünstigen Gesamtschwerpunktlage. Wie in Abbildung 24 ersichtlich, besteht der Aufbau aus einer Grundfläche von 4x3 Würfelmodulen. Das entspricht einer Länge von 480mm und einer Breite von 640mm. Die Höhe des Grundkörpers beträgt bei drei Moduleinheiten 480mm. Auf der mobilen Plattform ist ein Greifarm montiert, wobei dessen Arbeitsraum mit 500mm angenommen wird. Auf der obersten Ebene sind zusätzlich diagonal zwei LIDAR-Sensoren zur Wahrnehmung der Umgebung montiert.

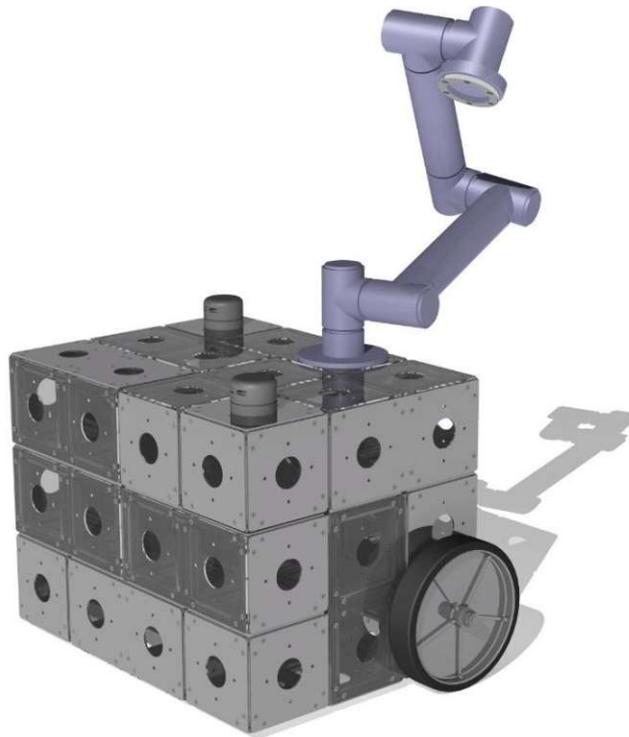


Abbildung 24 - Konfiguration 1: CAD-Modell des Gesamtsystems

Da diese Konfiguration exemplarisch gewählt wurde, wurde auch das detaillierte CAD-Modell erstellt. Die grafisch anspruchsvollen Konfigurationen müssen nicht mit den detaillierten CAD-Modellen zur Schwerpunktermittlung erstellt werden, sondern die vereinfachten Modelle können zur Schwerpunktermittlung verwendet werden. Zur Validierung der vereinfachten Modelle wurden die Gesamtmassen und Schwerpunktslagen beider Modelle ausgegeben und verglichen. Abbildung 25 zeigt das vereinfachte CAD-Modell, welches zur Bestimmung des Gesamtschwerpunktes genutzt wird.

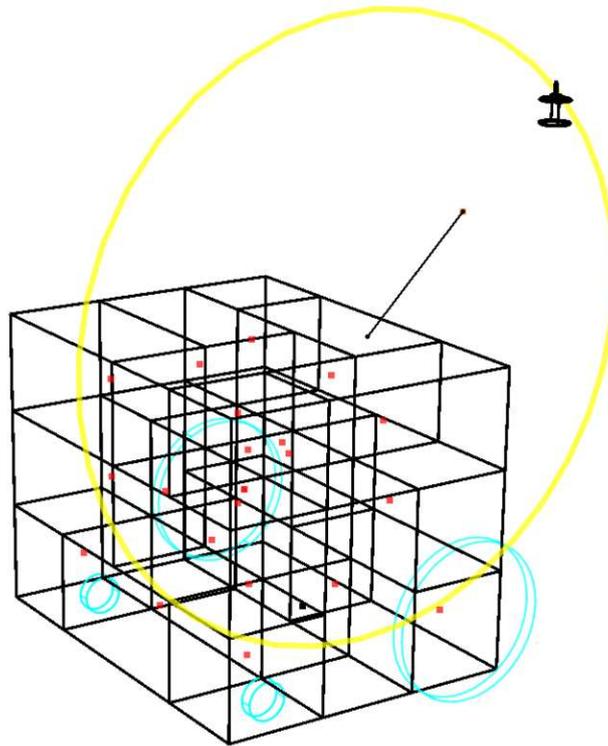


Abbildung 25 - Konfiguration 1: Vereinfachtes Modell zur Schwerpunktermittlung

In Abbildung 25 ist aufgrund der Vielzahl an Teilschwerpunkten der Gesamtschwerpunkt nicht mehr erkennbar. Abbildung 26 zeigt das gleiche Modell daher in schattierter Darstellung mit ausgeblendeten Teilschwerpunkten der Module. Da der Schwerpunkt sehr hoch und nahe einer Vertikalen durch den Radaufstandspunkt liegt, ist dieser Aufbau für unebenes Gelände ungeeignet.

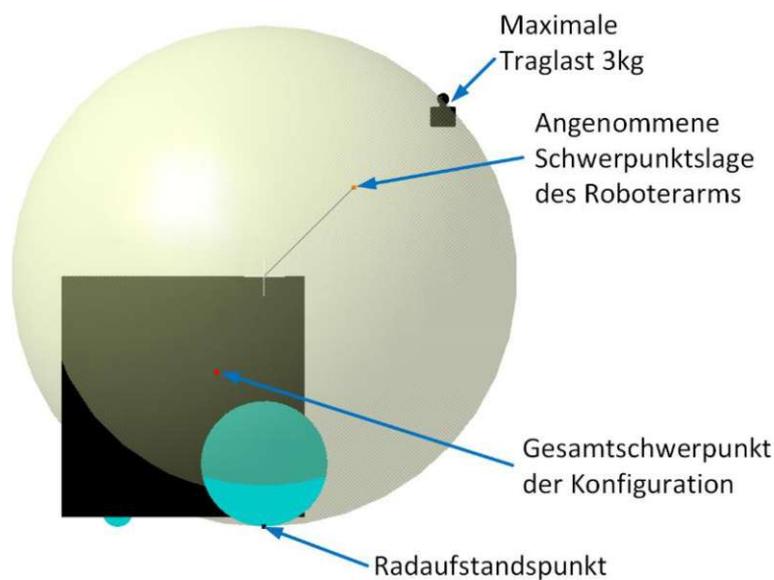


Abbildung 26 - Konfiguration 1: Schattiertes Modell mit Gesamtschwerpunkt

Die problematische Lage des Schwerpunktes lässt sich unter anderem auf die gewählte, kritische Lage des Schwerpunktes des Roboterarms zurückführen. Grundsätzlich wird beim Roboterarm ein Großteil der Masse in der Nähe des Standfußes angesammelt sein, da dies für die Kinematik günstig ist. Der Schwerpunkt des Roboterarms wurde bei der halben Armreichweite gewählt, um bei der Berechnung auf der sicheren Seite zu sein.

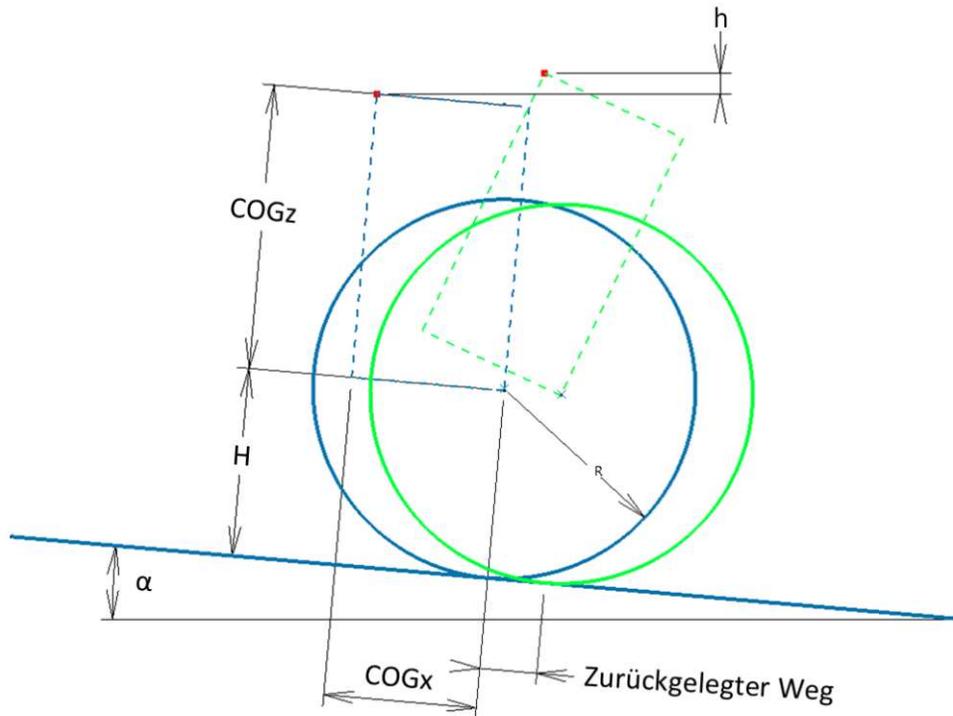


Abbildung 27 - Kippen: Skizze mit Bemaßungen

Um eine Aussage über die Kippsicherheit des Roboters machen zu können, wird jene kritische Geschwindigkeit berechnet, welche notwendig ist, um den Schwerpunkt über den Radaufstandspunkt zu heben. Betrachtet wird der kritische Fall eines augenblicklichen Sperrens des Antriebsrades bei konstanter Geschwindigkeit und ohne Berücksichtigung von Verlusten. Abbildung 27 zeigt eine Skizze für die Berechnung mit den notwendigen Abmessungen und der Orientierung des Roboters auf einer schiefen Ebene. Die Beschriftung „COG“ wurde aus CATIA übernommen und steht für „Center of Gravity“ mit dem Index der dazugehörigen Koordinatenachse. Die beim Kippen vom Schwerpunkt zurückgelegte Höhe ist, bei geometrischer Nähe von Schwerpunkt und Kippunkt, gering. Das führt dazu, dass weniger Energie zugeführt werden muss, um den Roboter zum Kippen zu bringen. Eine günstigere Lage des Schwerpunktes wäre bodennah, aber trotzdem von dem Kippunkt weit entfernt. Für die Berechnung wurde die Energieerhaltung herangezogen, wobei die kinetische Energie vor der

Kippbewegung mit jener potenziellen Energie gleichgesetzt wird, welche zum Heben des Schwerpunkts über den Aufstandspunkt benötigt wird. Formel (3) beschreibt den Zusammenhang mit Hilfe des Energieerhaltungssatzes [54, S. 220]. Die kinetische Energie setzt sich aus der translatorischen Bewegung des Schwerpunkts und einem rotatorischen Anteil der Antriebsräder zusammen. Die Lenkrollen werden bei dem rotatorischen Anteil aufgrund des geringen Massenträgheitsmoments vernachlässigt. Bei der Betrachtung auf einer schiefen Ebene ist bei der Höhe h auch der zurückgelegte Weg auf der schiefen Ebene einzurechnen.

$$\frac{1}{2}mv^2 + \frac{1}{2}I\omega^2 = mgh \quad (3)$$

Die Berechnung erfolgte mit dem Berechnungsprogramm *MATLAB*³ der Firma *MathWorks* und ist im Anhang in Kapitel 13.2 vorzufinden. Die Ergebnisse von Konfiguration 1 sind in Abbildung 28 in Form von Diagrammen abgebildet. Zwei Punkte sind im Zusammenhang mit dem Diagramm der kritischen Geschwindigkeit besonders hervorzuheben. Jener Punkt bei einer Rampenneigung $\alpha=0^\circ$, welcher die Kippsicherheit auf ebenem Untergrund beschreibt. Und jener Punkt, bei dem die kritische Geschwindigkeit zu Null wird. Dieser Punkt steht für die maximale Rampenneigung, auf der der Roboter noch stillstehen kann, wenn keine anderen Beschleunigungen oder Belastungen auftreten. Die kritische Geschwindigkeit ist eine sehr konservative Annahme, da keine Verluste in die Berechnung miteinbezogen werden, aber diese in der Realität immer auftreten und daher ein wesentlich höherer Wert erwartet werden kann.

³ <https://de.mathworks.com/products/matlab.html> (Zugriff am 28.12.2021)

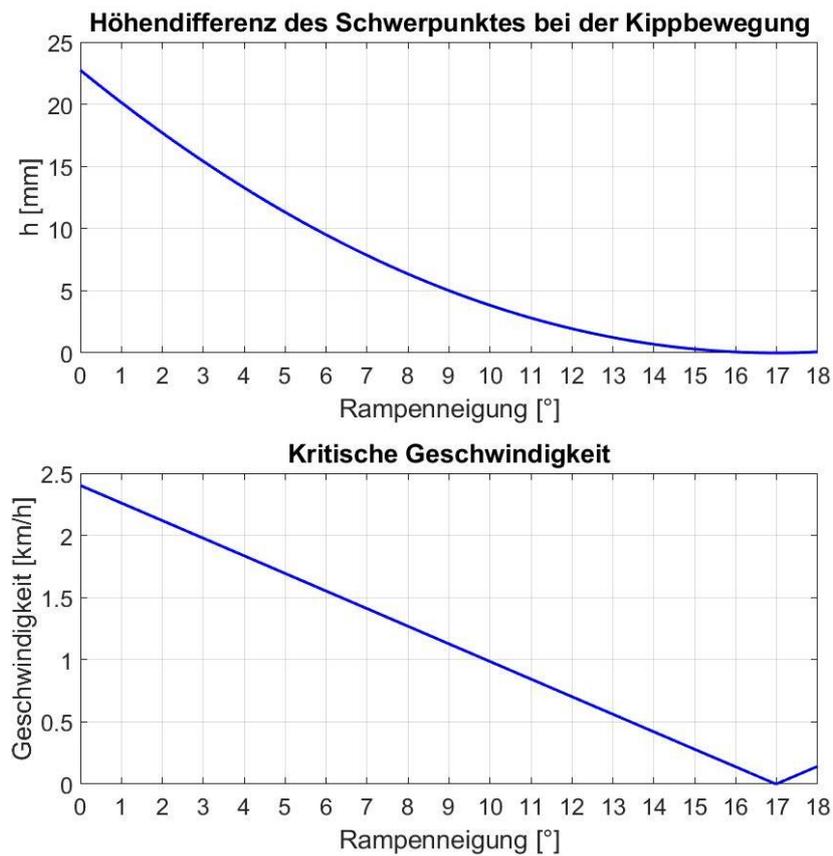


Abbildung 28 - Konfiguration 1: Diagramme der Kippberechnung

Aus dem oberen Diagramm von Abbildung 28 kann abgeleitet werden, warum die kritische Geschwindigkeit so niedrig liegt. Die zu überwindende Höhe des Schwerpunktes im Fall des Kippens ist gering und daher reicht eine geringe Geschwindigkeit und eine damit einhergehende geringe kinetische Energie, um einen Kippvorgang einzuleiten. Abbildung 29 zeigt die Konfiguration 1 mit einer Greifarmlage, welche die Schwerpunktslage günstig beeinflusst. Diese Annahme ist berechtigt, wenn der Roboter Aufgaben im Stillstand erledigt und beim Fahren den Arm in einer günstigeren Position hält. Der Schwerpunkt liegt zentraler und die zurückzulegende Höhendifferenz im Falle eines Kippens wird höher.

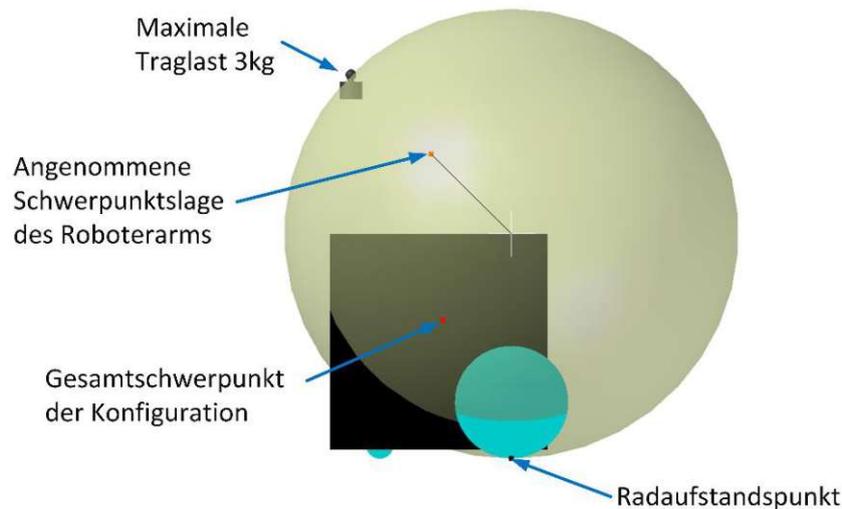


Abbildung 29 - Konfiguration 1: Gesamtschwerpunkt bei günstigerer Greifarmposition

Eine erneute Berechnung führt zu den in Abbildung 30 abgebildeten Diagrammen. Jene Rampenneigung, auf der der Roboter noch ohne äußere Einflüsse stehen kann, ergibt sich zu über 26° . Da in dieser Lage die Lenkräder keine Kraft übertragen und der Roboter praktisch nur auf den Hinterrädern steht, kann der notwendige Haftreibungskoeffizient über den Rampenneigungswinkel mit der allgemein bekannten Formel (4) berechnet werden.

$$\tan(\alpha) = \mu_H \quad (4)$$

Es ergibt sich ein Haftreibungskoeffizient von 0,49 und dieser ist niedriger als der von Rollenbau⁴, dem Hersteller der Räder, auf Anfrage angegebene Wert von $\mu_H > 0,6$ auf trockenem Beton. Der Roboter würde auf trockenem Beton also kippen und nur bei schlechten Haftverhältnissen davor zu rutschen beginnen.

⁴ <https://www.rollenbau.at/home/home.html> (Zugriff am 26.12.2021)

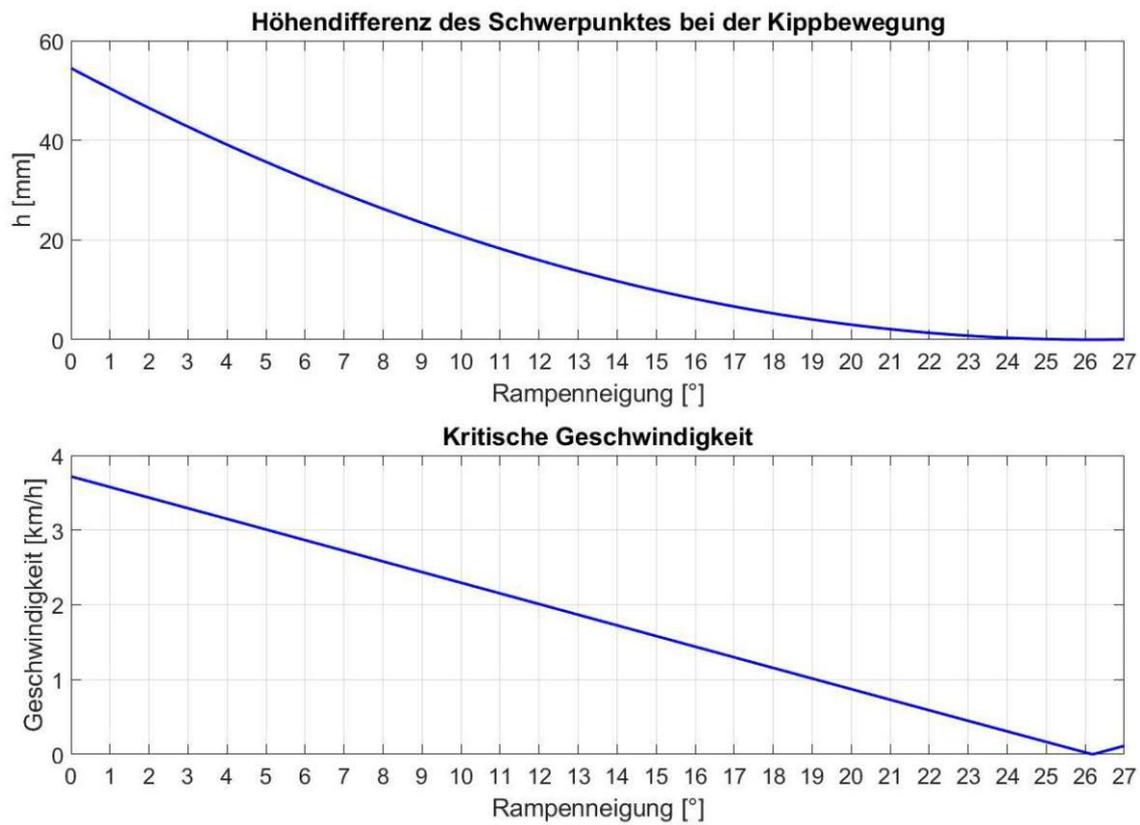


Abbildung 30 - Konfiguration 1 mit günstigerer Greifarmposition: Diagramme der Kippberechnung

Konfiguration 2

Eine Erhöhung der Kippsicherheit kann durch die Wahl einer geeigneten Konfiguration erzielt werden. Zur Veranschaulichung wird, die in Abbildung 31 gezeigte Konfiguration 2, auf Kippen berechnet. Diese Konfiguration wurde in Anlehnung an niedrigere mobile Manipulatoren, wie dem *KUKA youBot* [56], erstellt. Die Vorgehensweise der Berechnung ist analog zu jener der Konfiguration 1 und zeigt die Auswirkungen einer niedrigeren Bauform auf die Kippsicherheit.

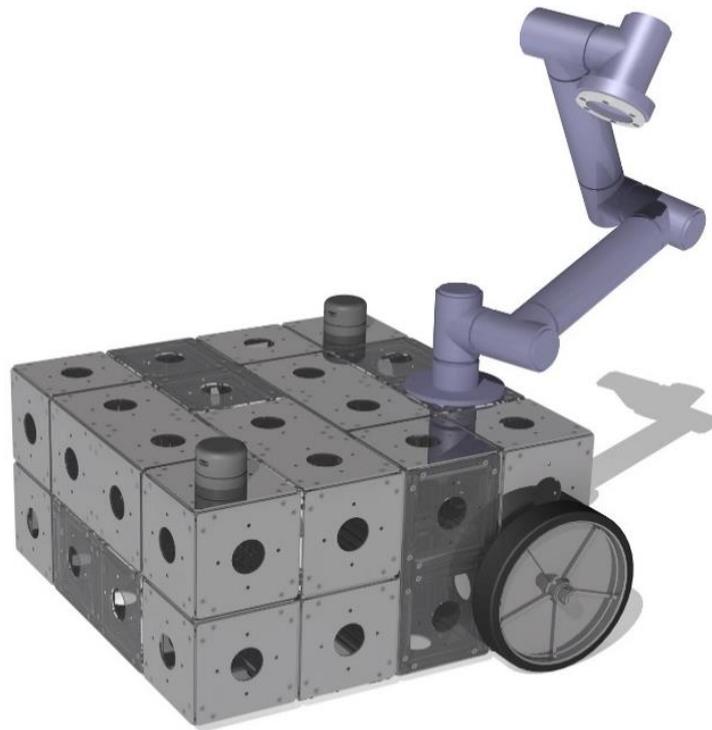


Abbildung 31 - Konfiguration 2: CAD-Modell des Gesamtsystems

Das vereinfachte Modell in Abbildung 32 zeigt die im Vergleich zu Konfiguration 1 niedrigere Schwerpunktslage. Die Annahme einer ungünstigen Position des Roboterarms führt zu einem geringen Abstand einer Vertikalen vom Radaufstandspunkt und dem Gesamtschwerpunkt.

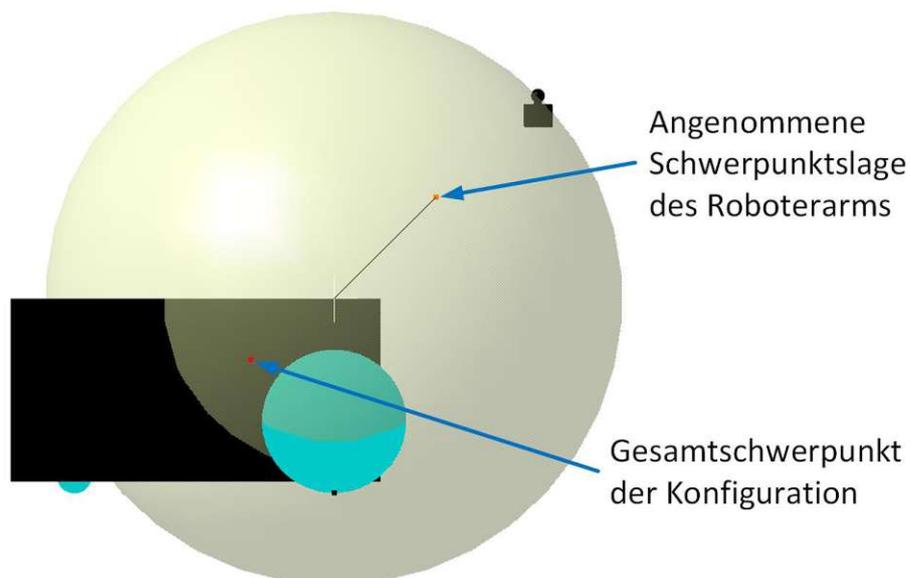


Abbildung 32 - Konfiguration 2: Schattiertes Modell mit Gesamtschwerpunkt

Die Berechnungsergebnisse der Konfiguration 2 sind in Abbildung 33 abgebildet und zeigen, dass eine größere Höhendifferenz aufgrund der günstigeren Schwerpunktslage überwunden

werden muss, wenn der Roboter zu Kippen droht. Daraus resultieren eine höhere kritische Geschwindigkeit und ein allgemein geringeres Kippisiko.

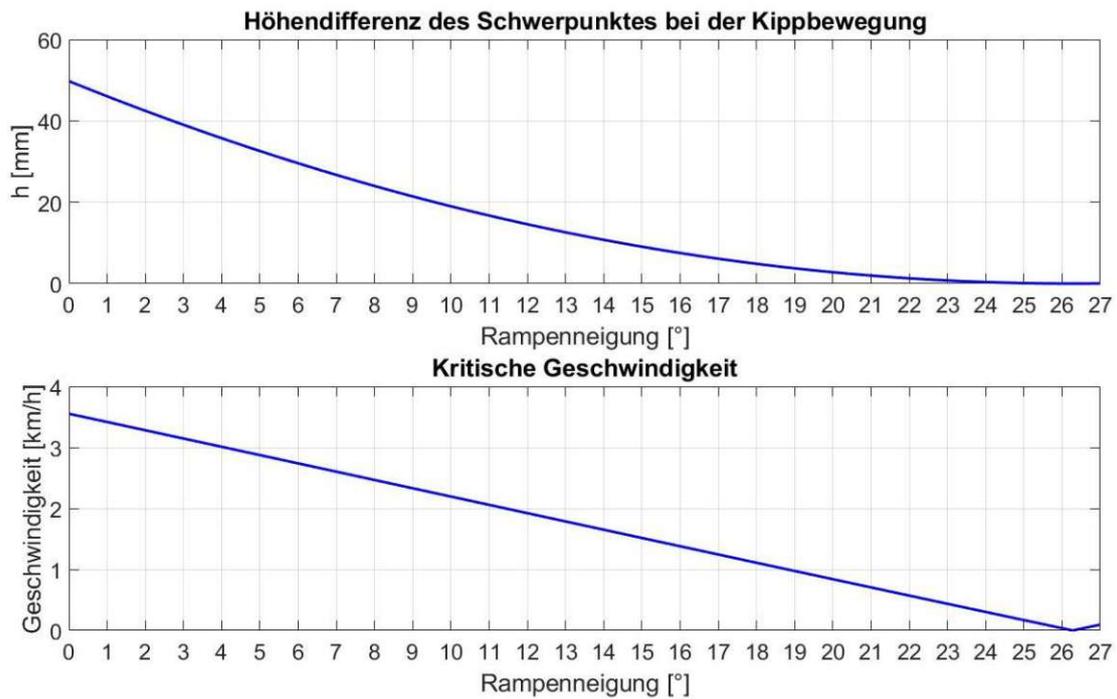


Abbildung 33 - Konfiguration 2: Diagramme der Kippberechnung

Um den Einfluss des Schwerpunktes des Roboterarms auch bei dieser niedrigeren Bauform aufzuzeigen, wurde die Schwerpunktslage in einer günstigeren Position angenommen. Das Modell zur Schwerpunktsermittlung ist in Abbildung 34 ersichtlich.

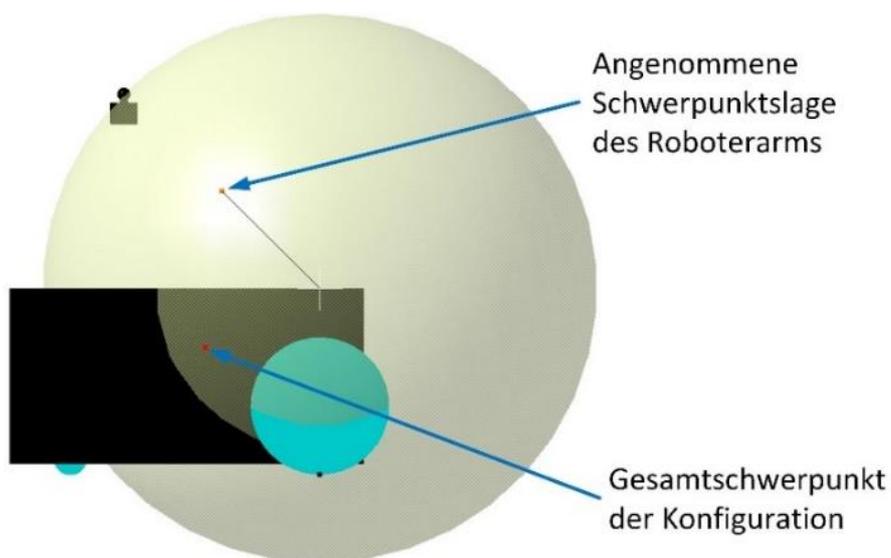


Abbildung 34 - Konfiguration 2: Gesamtschwerpunkt bei günstigerer Greifarmposition

Die Ergebnisse der Berechnungen mit den überarbeiteten Randbedingungen führen zu den Diagrammen in Abbildung 35. Die kritische Geschwindigkeit dieser Konfiguration in der Ebene liegt über der in der Anforderungsliste (Siehe Tabelle 1) genannten Geschwindigkeit von 4km/h. Für Industriehallen sind Stufen von 20mm zugelassen und das führt bei dieser Konfiguration zu einer Neigung von 1,5°. Dieser Wert ist hinsichtlich des Kippverhaltens daher auch in einem unkritischen Bereich. Die Norm für Barrierefreies Bauen, die ÖNORM B 1600 [57], schreibt eine maximale Steigung von 6% (entspricht etwa 3,5°) vor. Auch bei dieser Steigung liegt die kritische Geschwindigkeit über der in der Anforderungsliste geforderten Geschwindigkeit von 4km/h.

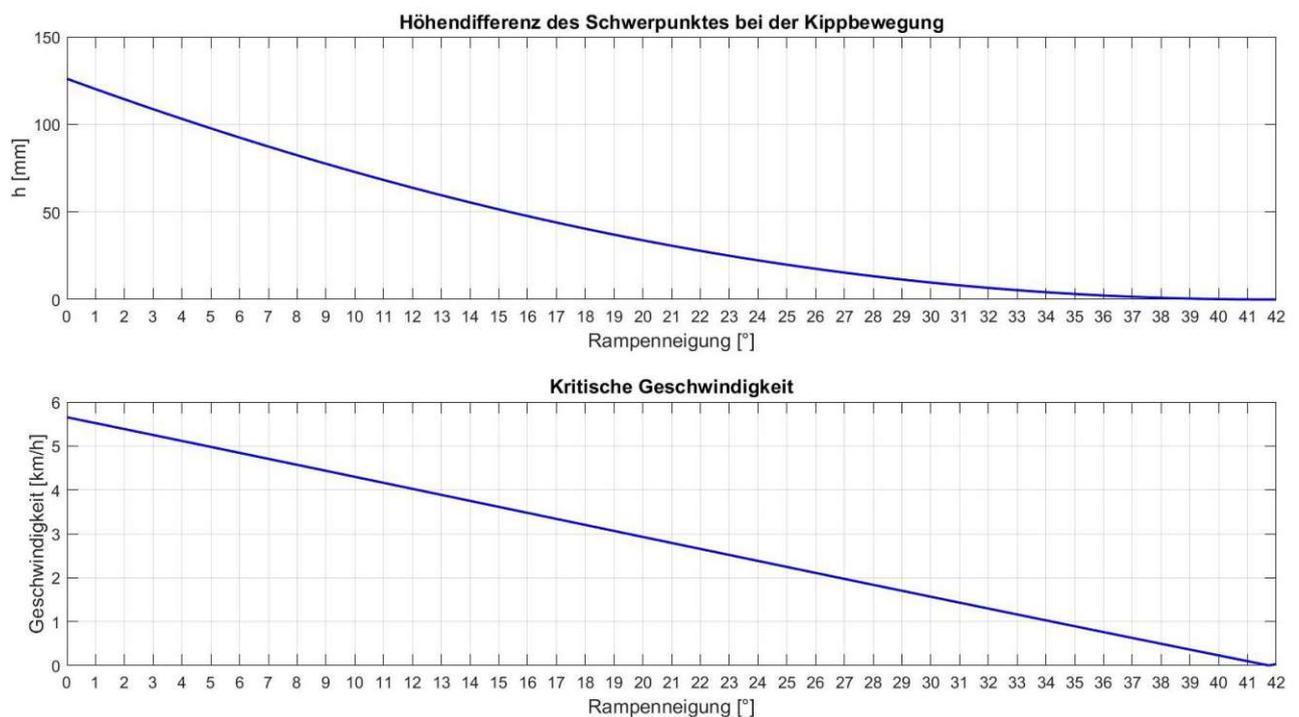


Abbildung 35 - Konfiguration 2 mit günstigerer Greifarmposition: Diagramme der Kippberechnung

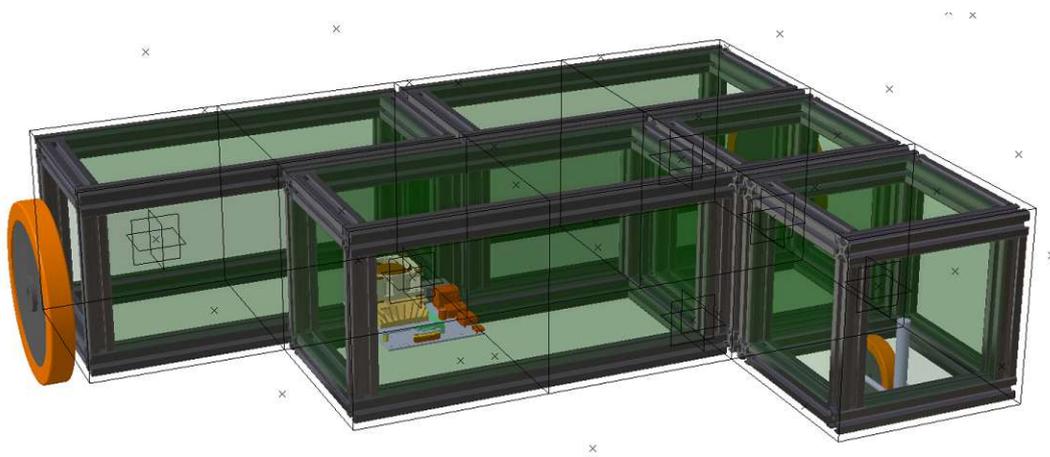
6 Baugruppen-Umsetzung im CAD

Die Konstruktion erfolgte mit *CATIA V5* der französischen Firma *Dassault Systèmes*⁵, einer weit verbreiteten Software für Produktdesign und -entwicklung. Die umfangreiche Funktionalität ermöglicht unter anderem Konstruktionen mit Parametern und das Erstellen von Renderings und diese Modelle haben sich als hilfreiche Hilfsmittel für den Gesamtentwurf und die Systemintegration erwiesen. Die erstellten Baugruppen helfen bei der Visualisierung des Problems und die Umsetzbarkeit von Konfigurationen unter bestimmten Voraussetzungen kann bewertet werden.

6.1 Parametrisiertes Entwurfsmodell

Als zentraler Parameter des Entwurfsmodells wurde die Seitenlänge eines Würfels festgelegt, da sich dieser Wert vor allem zu Beginn der Entwicklung oft änderte. In Abhängigkeit von diesem Parameter ändern sich unter anderem die Längen der verwendeten Aluminiumprofile des Chassis. In Kapitel 5.6 ist der Vorgang der Abschätzung der Modulgröße beschrieben und die bestimmenden Komponenten werden genannt. Als Skelett dieses Modells dient eine Punktwolke, welche in einer regelmäßigen Gitterstruktur angeordnet ist. Der Abstand zweier Punkte ist mit dem Parameter der Seitenlänge verknüpft. In der Baugruppe können die einzelnen Module an dieser Punktwolke positioniert werden. Mit Bedingungen zu den Ursprungsebenen kann die Orientierung der Module definiert werden. Für die Antriebsmodule werden vereinfachte Modelle gewählt, da diese in einer Diplomarbeit eines Kollegen entwickelt werden. In Abbildung 36 ist ein Screenshot des erstellten Modells abgebildet. Erkennbar ist die Punktwolke zur Positionierung der Module. Außerdem wurden einzelne Module ausgeblendet, um die Sicht auf innen liegende Komponenten zu ermöglichen. Die grün eingefärbten Elemente sind Quader, welche den Platzbedarf der Verbinder darstellen. Auch diese sind in dem Modell mit dem Parameter der Seitenlänge verknüpft.

⁵ <https://www.3ds.com/de/produkte-und-services/catia/> (Zugriff am 27.12.2021)

Abbildung 36 - Parametrisiertes Entwurfsmodell des *TURBO*

6.2 Baukastensystem zur Erstellung von Konfigurationen

Die Festlegung der Seitenlänge auf 160mm macht das parametrische Modell obsolet. Eine weitere Baugruppe ohne Parametrisierung, aber unter Beibehaltung der Punktwolke zur Positionierung und Ausrichtung der einzelnen Module, wurde erstellt. Eine festgelegte Seitenlänge war auch für die verknüpften Arbeiten ein wesentlicher Schritt, da dadurch die Entwicklung der Module vorangetrieben werden konnte. Die so entwickelten Module wurden im Step-Format weitergegeben und eine Integration in die Baugruppe ist problemlos möglich. Für diese Baugruppe wurde außerdem ein Ersatzmodell für den Roboterarm erstellt, welchem eine Ersatzmasse zugewiesen werden kann. Mit Hilfe dieser Ersatzmasse können Gesamtschwerpunkteslagen und die Gesamtmasse von Konfigurationen ausgegeben werden, um beispielsweise wie in Kapitel 5.8 ein Kippberechnung durchführen zu können. Auch der Arbeitsbereich des Greifarmes ist groß gewählt und die Ersatzmasse eines Objektes, welches vom Endeffektor gehalten wird, kann an verschiedene Positionen bewegt werden. Um den Zusammenbau von Konfigurationen zu erleichtern, wurde eine übersichtliche Ordnerstruktur mit Unterbaugruppen angelegt. Diese Unterbaugruppen enthalten Komponenten, welche immer wieder in gleicher Anordnung vorkommen. Das führt beim Erstellen von Konfigurationen zu einer wesentlichen Zeitersparnis. Auch Änderungen, welche gleiche Komponenten betreffen, können effizient vorgenommen werden.

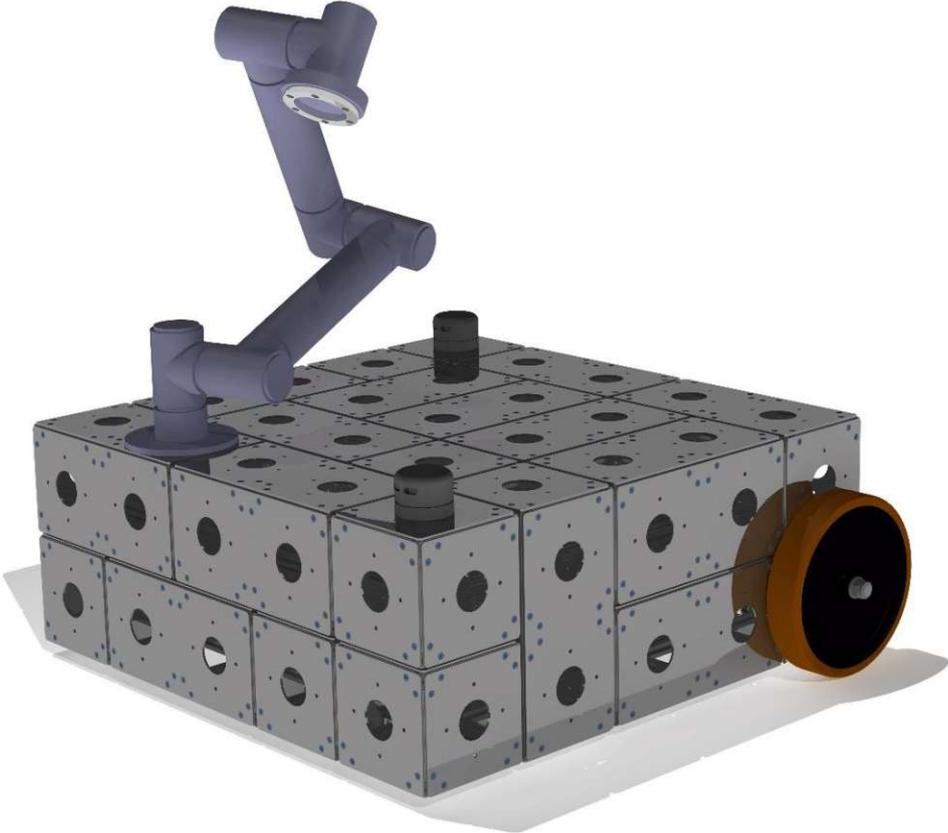


Abbildung 37 - Konfiguration erstellt mit dem Baukastensystem

7 Prototypenbau

Ein Prototyp bezeichnet eine vereinfachte Realisierung des Aufbaus mit eingeschränkten Funktionen. Zu Beginn kann ein Prototyp sehr einfach gestaltet sein und die Komplexität nimmt in der Regel mit dem Fortschreiten in der Produktentwicklung zu. Prototypen werden zur Klärung kritischer Fragen eingesetzt, bevor eine Detaillierung der Konstruktion erfolgt, um den Arbeitsaufwand gering zu halten. Darüber hinaus können Fehler frühzeitig erkannt und entsprechend darauf reagiert werden. [58, S. 117-119]

Der erste Prototyp im Projekt *TURBO* ist in Abbildung 38 als 3D Modell dargestellt und setzt sich im Wesentlichen aus zwei Antriebsmodulen, zwei Lenkrollenmodulen und leeren Chassismodulen für den Aufbau zusammen. Die Energieversorgung wird im ersten Prototyp noch nicht über ein eigenes Modul, sondern über freiliegende Kabeln realisiert. Mit diesem einfachen Aufbau können erste Tests zum Verhalten des Roboters durchgeführt und analysiert werden.

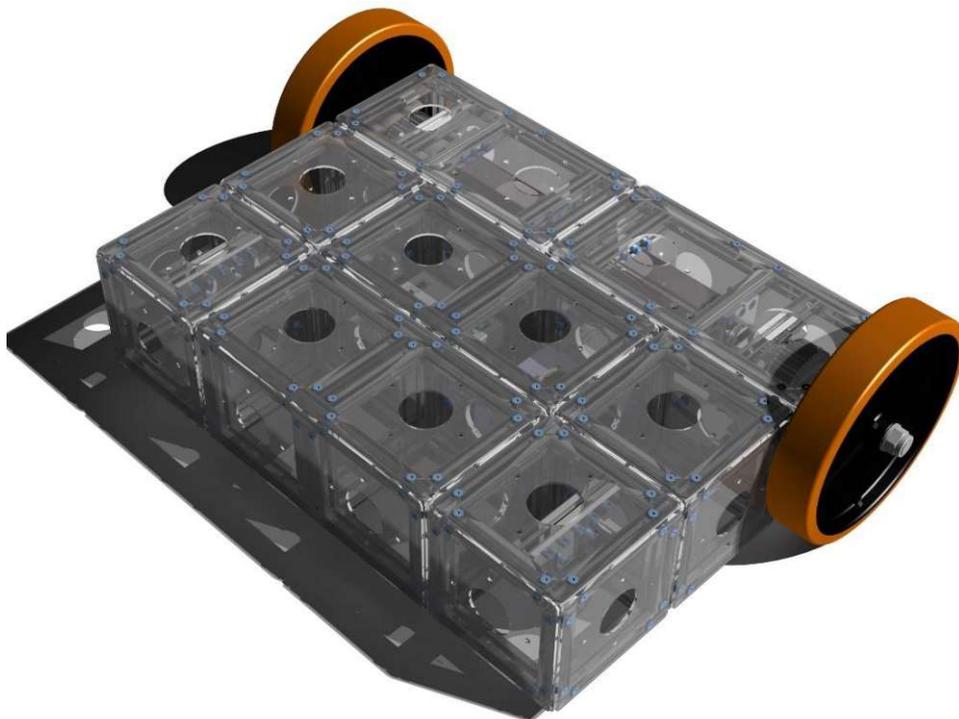


Abbildung 38 - CAD-Modell des ersten geplanten Prototyps

Zur Ansteuerung der Motoren wird ein Boardcomputer benötigt, wobei für diesen Aufbau keine speziellen Anforderungen an die Datenverarbeitung vorliegen. Es wird daher ein günstiger, handelsüblicher *Raspberry Pi 3* [59] eingesetzt. Die leeren Chassismodule

ermöglichen die Realisierung des gitterartigen Aufbaus. Außerdem kann damit die Zusammenbaubarkeit und Konfigurierbarkeit in mehreren Ebenen getestet werden, indem an einzelnen Flächen der Verbinder die Male Konnektoren simuliert werden (siehe Kapitel 5.3.2). Die Verbinder wurden in diesen Prototypen durch Acrylplatten ersetzt, welche ein Zusammenschrauben der Module ermöglichen. In Abbildung 39 ist diese Ersatzverbindung mit allen beteiligten Elementen in Form einer Explosionsdarstellung abgebildet.

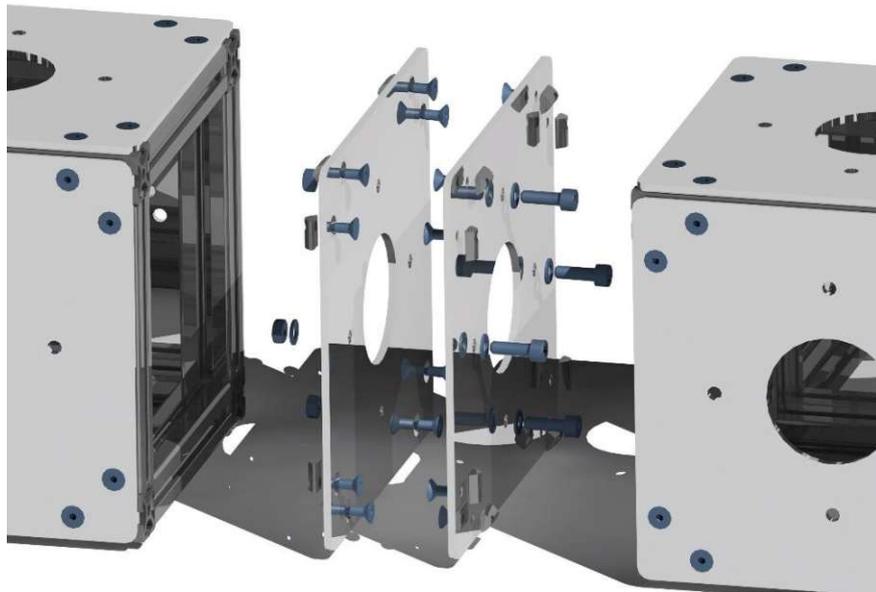


Abbildung 39 - Realisierung der Verbinder im ersten Prototyp durch Ersatzplatten

Die am Umfang verteilten Schrauben sind für die Verbindung zwischen Ersatzverbinder und den in den Aluminiumprofilen eingeschobenen Nutensteinen zuständig. Rund um das Loch in der Mitte sind vier Schrauben auf einem Lochkreisdurchmesser, ähnlich dem des realen Verbinders, verteilt. Diese Anordnung spiegelt bei Ausführung der Ersatzverbinder aus Aluminiumblechen die Steifigkeiten des tatsächlichen Verbinders wider. Um die Steifigkeiten der Verbinderelemente zu überprüfen, werden zwei Module vollständig mit Aluminiumblechen ausgestattet, um diese wie in Abbildung 40 dargestellt zu belasten und deren Durchbiegung zu messen.

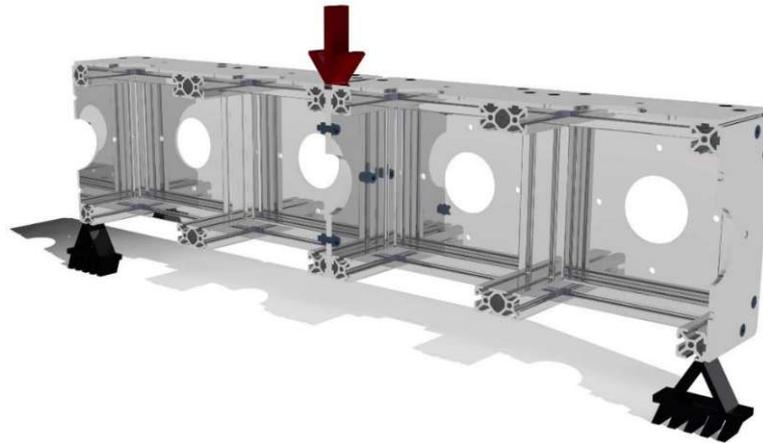


Abbildung 40 - Geplanter Belastungsversuch der Verbinderelemente

Aus Kostengründen und weil die Ersatzverbinder nicht wiederverwendet werden können, werden nur jene Ersatzverbinder, welche für den Belastungsversuch benötigt werden, aus Aluminium gefertigt. Für die restlichen Ersatzverbinder wurde Acrylglas gewählt, dadurch sinken die Produktions- und Bearbeitungskosten und auch die Belastung der Umwelt wird reduziert. Abbildung 41 zeigt ein solches Modul mit Acrylplatten.

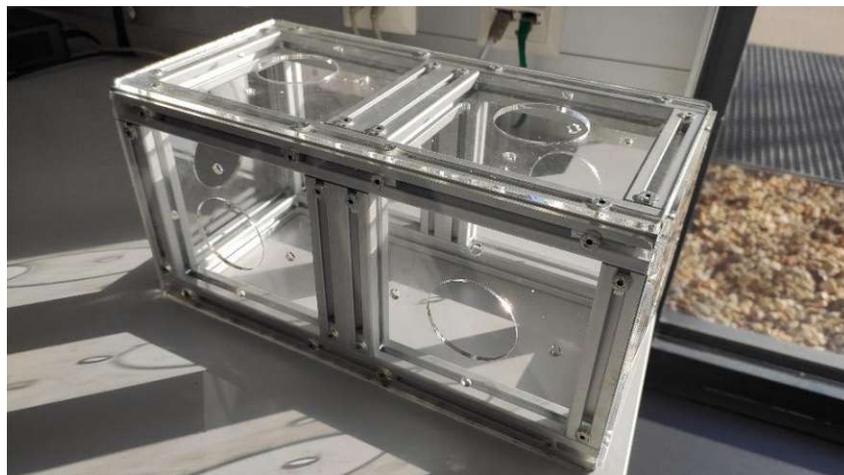


Abbildung 41 - Prototyp eines leeren Moduls

Gesamt wurden neben den beiden Antriebsmodulen und den beiden Lenkrollenmodulen neun weitere Module mit einer Größe von 320mmx160mmx160mm und zwei Module mit einer Größe von 160mmx160mmx160mm gefertigt. Damit kann eine Konfiguration von 5x5x1 Würfeln aufgebaut und das Fahrverhalten überprüft werden. Die leeren Module sollen für zukünftige Entwicklungen im Laufe des *TURBO* Projektes für Sensoren, Aktuatoren, Akkumulatoren oder andere Komponenten Platz bieten.

8 Diskussion und Ausblick

Dieses Kapitel enthält Erkenntnisse der Produktentwicklung des mobilen Manipulators im Projekt *TURBO*, welche aus den angewandten Methoden und deren Ergebnissen abgeleitet wurden. Außerdem wird ein Ausblick über künftige mögliche Entwicklungen und Verbesserungen gegeben.

8.1 Ergebnisse der Modulform und Modulgröße

Kapitel 3 behandelt die Umsetzung modularer Roboter und es werden drei Roboter mit unterschiedlichen Modulformen und Anforderungen verglichen. Als entscheidende Merkmale des modularen Aufbaus sind die Modulform und die Modulgröße zu nennen. Für den zu entwickelnden mobilen Manipulator wurden für die Entscheidungsfindung der Modulform (ausgeführt in Kapitel 5.1) eine Nutzwertanalyse, ein Paarweiser Vergleich und eine Schwachstellenanalyse durchgeführt. Die Wahl der Modulform fiel unter anderem aufgrund der Bedeutsamkeit vieler Konfigurationsmöglichkeiten, einer einheitlichen Schnittstelle und einem geringeren Fertigungsaufwandes auf eine Kombination aus Würfeln und Quadern. Vorteilhaft bei der Kombination der Modulformen ist eine höhere Steifigkeit des Gesamtsystems, welche durch den Einsatz größerer Module erreicht werden kann. Die Größe der Module wird mit einer Seitenlänge von 160mm festgelegt, da die Module somit für Bauteile von Robotern mit ähnlichen Anforderungen, genügend Platz bieten (siehe Kapitel 5.6).

8.2 Auswirkungen der Verbinder auf die Modularität

Der in Kapitel 5.3.2 beschriebene rotierbare Mechanismus der Verbinder mit je einem Male Konnektor pro Modul führt zu Einschränkungen im modularen Aufbau hinsichtlich möglicher Konfigurationen. Abbildung 42 zeigt den prinzipiellen Aufbau in Form eines vereinfachten CAD-Modells. Die Wahl der Positionierung des Male Konnektors muss mit Bedacht auf die Orientierung des Moduls im Gesamtsystem gewählt werden. Bei Modulen, welche in den meisten Konfigurationen in der untersten Ebene eingebaut sind, sollte der Male Konnektor seitlich oder oben positioniert sein. Dazu zählen die Antriebsmodule und das Akkumodul. Bei Modulen, welche in der Regel in der obersten Ebene eingebaut werden, wie ein Modul mit

einem LIDAR, sollte sich der Male Konnektor an der unteren Seite oder seitlich befinden. Der Vorteil dieses Prinzips mit je einem Male Konnektor ist, dass die Netzwerktopologie, wie in Abbildung 15 ersichtlich, immer eine Baumstruktur aufweist. Die Einschränkungen, welche durch die Orientierung des Male Konnektors entstehen, können durch Umstecken der Kabel umgangen werden.

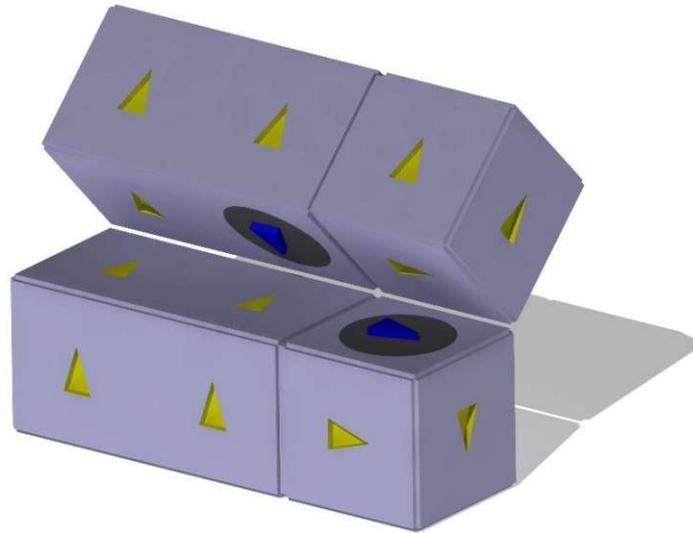


Abbildung 42 - Modularer Aufbau mit rotierbarem Mechanismus

Große Module weisen zehn potenzielle Verbinderpositionen auf. Die gängigen Verteiler der Firma Beckhoff des verwendeten EtherCAT Systems haben acht Anschlüsse. Daraus resultieren zwei Verbinder, welche keine Signale übertragen können, wenn keine weiteren Verteiler eingebaut sind. Da bei den Modulen aber eine Seite meist als Abdeckung ausgeführt ist, um Zugriff zum Innenleben zu haben, ist das keine zusätzliche Einschränkung mit wesentlichen Nachteilen. Die mechanischen Eigenschaften des Gesamtsystems bleiben unbeeinflusst, da die mechanische Verbindung mit jenen einer signalübertragenden Schnittstelle übereinstimmen.

8.3 Ableitbare Anforderungen an die Verbinder

Die mechanische Schwachstelle bei dem modularen Aufbau sind die Verbinder. An diese werden hohe Anforderungen hinsichtlich Festigkeit und Steifigkeit gestellt. Abweichungen und Toleranzen von Modulgrößen können in den Verbindern zu erhöhten Belastungen führen, welche bei der Auslegung und Konstruktion beachtet werden müssen. Außerdem sollten die Verbinder für eine gewisse Mindestanzahl an Koppelvorgängen ausgelegt werden. Diese

Randbedingungen und Anforderungen an die Verbinder führen zu komplexen Komponenten. Die Fertigungs- und Materialkosten sollten daher bei der Entwicklung im Auge behalten werden. Eine Überarbeitung standardisierter Schnittstellen ist meist mit hohen Kosten verbunden, da alle Verbinder ausgetauscht werden müssen.

8.4 Maßnahmen zur Kippvorbeugung

Das Kippverhalten des mobilen Manipulators wird wesentlich von der Wahl der Konfiguration beeinflusst. Ein stabiler Aufbau kann durch eine niedrige zentrale Schwerpunktlage erzeugt werden. Das ist durch die Anordnung von schweren Modulen in den unteren Ebenen umsetzbar. Darüber hinaus helfen ein breiter Aufbau und ein großer Achsabstand das Kippen vorzubeugen. Außerdem können Module mit einem Gegengewicht eingesetzt werden, um eine zentrale Schwerpunktlage zu erreichen. Das kann vor allem dann hilfreich sein, wenn ein schwerer Greifarm in einer ungünstigen Position montiert wird. Zu den ungünstigen Positionen zählen allgemein die äußeren Module in der obersten Ebene. In Kapitel 5.8.2 wird der Einfluss des Schwerpunkts des Greifarms ersichtlich. In der Regel sollte bei der Bewegung im Raum der Greifarm über dem Roboter positioniert sein und nicht auskragen. Befindet sich der Roboter in einem kritischen Zustand hinsichtlich Kippen, sollte keine Bewegung des Greifarms erfolgen, da sich die Beschleunigungen negativ auf die Stabilität auswirken können.

8.5 Nächste mögliche Schritte der Weiterentwicklung

Um einen funktionierenden Prototypen zu erhalten, wurden die Bauteile großzügig ausgelegt. Eine Arbeit mit dem Fokus auf Leichtbau und ECO-Design sollte folgen, um Material und Gewicht zu sparen. Das führt zu einem geringeren Energieverbrauch und einer längeren Einsatzdauer des Roboters. Die Energieversorgung des Roboters soll über Akkumulatoren erfolgen. Ein automatisiertes Ankoppeln an eine Ladestation wird angestrebt und kann getestet werden.

Sind die wesentlichen Module entwickelt und ausgearbeitet, kann eine Überarbeitung des Baukastensystems in Erwägung gezogen werden, um Daten der Konfigurationen direkt aus dem CAD Programm zu exportieren. Diese Daten können Werte, welche für das Fahrverhalten relevant sind, wie die Achsabstände, enthalten und in den Programmen zur Ansteuerung verwendet werden.

9 Literaturverzeichnis

- [1] H. Bruderer, „Ein Blick in die Frühgeschichte der Robotik“ (de), 2019, doi: 10.3929/ETHZ-B-000340432.
- [2] S. Scholtysek, *Wann ist ein Roboter ein Roboter?* [Online]. Verfügbar unter: <http://www.roboterwelt.de/magazin/wann-ist-ein-roboter-ein-roboter/> (Zugriff am: 26. September 2021).
- [3] *Fahrerlose Transportsysteme (FTS)*, VDI 2510, Verein Deutscher Ingenieure, Berlin, Okt. 2005.
- [4] A. K. Chakravarty und N. Balakrishnan, „Achieving product variety through optimal choice of module variations“, *IIE Transactions*, Jg. 33, Nr. 7, S. 587-598, 2001, doi: 10.1080/07408170108936856.
- [5] N. Worren, K. Moore und P. Cardona, „Modularity, strategic flexibility, and firm performance: a study of the home appliance industry“, *Strat. Mgmt. J.*, Jg. 23, Nr. 12, S. 1123-1140, 2002, doi: 10.1002/smj.276.
- [6] Pilotfabrik TU Wien, *Pilotfabrik der TU Wien*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.pilotfabrik.at/> (Zugriff am: 26. Dezember 2021).
- [7] Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, *Chancen durch Industrie 4.0: Von smarten Objekten und vernetzten Maschinen zurück zum Menschen*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.plattform-i40.de/IP/Redaktion/DE/Standardartikel/chancen-durch-industrie-40.html> (Zugriff am: 17. November 2021).
- [8] Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, *Was ist Industrie 4.0?: Menschen, Maschinen und Produkte sind direkt miteinander vernetzt: die vierte industrielle Revolution hat begonnen*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.plattform-i40.de/IP/Navigation/DE/Industrie40/WasIndustrie40/was-ist-industrie-40.html> (Zugriff am: 17. November 2021).
- [9] *Entwicklung technischer Produkte und Systeme*, VDI 2221, Verein Deutscher Ingenieure e.V., Berlin, Nov. 2019.
- [10] G. Pahl, W. Beitz, J. Feldhusen und K.-H. Grote, *Pahl/Beitz Konstruktionslehre: Grundlagen erfolgreicher Produktentwicklung; Methoden und Anwendung*, 7. Aufl.

- Berlin: Springer, 2007. [Online]. Verfügbar unter: http://deposit.d-nb.de/cgi-bin/dokserv?id=2839938&prov=M&dok_var=1&dok_ext=htm
- [11] G. Pahl, W. Beitz, J. Feldhusen und K.-H. Grote, *Pahl/Beitz Konstruktionslehre*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2013.
- [12] *Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme*, VDI 2206, Verein Deutscher Ingenieure e.V., Berlin.
- [13] *Montage- und Handhabungstechnik*, VDI 2860, Verein Deutscher Ingenieure e.V., Berlin, Mai. 1990.
- [14] P. Kopacek, „Robo-Ethics A Survey of Developments in the Field and their Implicants for Social Effects“, *IFAC-PapersPnLine*, 2019.
- [15] A. Angerer, M. Pfulner, M. Brandstötter und M. Hofbauer, „Modulare serielle Roboter“, *Elektrotech. Inftech.*, Jg. 130, Nr. 2, S. 48-53, 2013, doi: 10.1007/s00502-013-0130-8.
- [16] D. Krause und N. Gebhardt, *Methodische Entwicklung modularer Produktfamilien*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2018.
- [17] S. Eilmus, „Methodische Unterstützung der Entwicklung von Produktprogrammen mit hoher Kommunalität“. Dissertation, Technische Universität Hamburg-Harburg.
- [18] C. Blees, „Eine Methode zur Entwicklung modularer Produktfamilien“, *Produktentwicklung und Konstruktionstechnik*, Technische Universität Hamburg-Harburg.
- [19] J. Seo, J. Paik und M. Yim, „Modular Reconfigurable Robotics“ (en), *Annu. Rev. Control Robot. Auton. Syst.*, Jg. 2, Nr. 1, S. 2-18, 2019, doi: 10.1146/annurev-control-053018-023834.
- [20] D. Schmitz, P. Khosla und T. Kanade, „The CMU Reconfigurable Modular Manipulator System“.
- [21] 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*, Jg. 14, Nr. 3, 172988141771045, 2017, doi: 10.1177/1729881417710457.
- [22] X. Jia, M. Frenger, Z. Chen, W. R. Hamel und M. Zhang, „An alligator inspired modular robot“ in *2015 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, Seattle, WA, USA, 2015, S. 1949-1954, doi: 10.1109/ICRA.2015.7139453.

- [23] M. Pacheco, R. Fogh, H. H. Lund und D. J. Christensen, „Fable II: Design of a modular robot for creative learning“ in *2015 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, Seattle, WA, USA, 2015, S. 6134-6139, doi: 10.1109/ICRA.2015.7140060.
- [24] R. Kergala, *Space Engine is a revolutionary platform technology for shape-shifting robotics*. [Online]. Verfügbar unter: <http://www.3rdvector.com/> (Zugriff am: 16. Dezember 2021).
- [25] S. Murata, E. Yoshida, A. Kamimura, H. Kurokawa, K. Tomita und S. Kokaji, „M-TRAN: self-reconfigurable modular robotic system“, *IEEE/ASME Trans. Mechatron.*, Jg. 7, Nr. 4, S. 431-441, 2002, doi: 10.1109/TMECH.2002.806220.
- [26] H. Kurokawa, K. Tomita, A. Kamimura, S. Kokaji, T. Hasuo und S. Murata, „Distributed Self-Reconfiguration of M-TRAN III Modular Robotic System“, *The International Journal of Robotics Research*, Jg. 27, 3-4, S. 373-386, 2008, doi: 10.1177/0278364907085560.
- [27] T. Fukuda und S. Nakagawa, „Dynamically reconfigurable robotic system“ in *Proceedings. 1988 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Philadelphia, PA, USA, 1988, S. 1581-1586, doi: 10.1109/ROBOT.1988.12291.
- [28] A. Lyder, R.-F. Mendoza-Garcia und K. Stoy, *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2008: IROS 2008 ; 22 - 26 Sept., 2008, Acropolis Convention Center, Nice, France*. Piscataway, NJ: IEEE Service Center, 2008. [Online]. Verfügbar unter: <http://ieeexplore.ieee.org/servlet/opac?punumber=4637508>
- [29] RobCo, *Modulare Industrieroboter*. [Online]. Verfügbar unter: <https://robco.de/de/> (Zugriff am: 16. Dezember 2021).
- [30] D. Spath und E. Westkämper, Hg., *Handbuch Unternehmensorganisation*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2016.
- [31] S. Hesse und G. Schnell, *Sensoren für die Prozess- und Fabrikautomation: Funktion - Ausführung - Anwendung*, 5. Aufl. Wiesbaden: Vieweg + Teubner, 2011.
- [32] Beckhoff Automation GmbH & Co. KG, „Dokumentation 2 x 3-Achs-Beschleunigungssensor“. [Online]. Verfügbar unter: <https://download.beckhoff.com/download/document/io/ethercat-box/ep3752de.pdf>
- [33] Aosong(Guangzhou) Electronics Co.,Ltd., *Temperature and humidity module: DHT11 Product Manual*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.roboter->

- bausatz.de/media/pdf/67/39/40/DHT11PnjCxBKjtkQs.pdf (Zugriff am: 20. Dezember 2021).
- [34] C. Weitkamp, *Lidar: Range-resolved optical remote sensing of the atmosphere*. New York: Springer, 2005.
- [35] „Fahrerassistenzsysteme / Interieur“, *ATZ Extra*, Jg. 18, Nr. 11, S. 26-27, 2013, doi: 10.1365/s35778-013-1214-0.
- [36] A. Markis, M. Papa, D. Kaselautzke, M. Rathmair, V. Sattinger und M. Brandstötter, „Safety of Mobile Robot Systems in Industrial Applications“, 2019.
- [37] M. Brandstötter, D. Mirkovic und M. Hofbaur, „Mobile Manipulation - eine altbekannte Technologie findet durch sensitive Robotertechnologie Einzug in die Industrie.“, *C-AR2017 - conference on automation and robotics*, 2017.
- [38] T. P. Burke und H. F. Durrant-Whyte, „Modular Mobile Robot Design“, *IFAC Proceedings Volumes*, Jg. 26, Nr. 1, S. 427-432, 1993, doi: 10.1016/S1474-6670(17)49337-2.
- [39] A. Mutambara und H. E. Durrant-Whyte, „Estimation and control for a modular wheeled mobile robot“, *IEEE Trans. Contr. Syst. Technol.*, Jg. 8, Nr. 1, S. 35-46, 2000, doi: 10.1109/87.817690.
- [40] M. Hofbaur, M. Brandstötter, S. Jantscher und C. Schorghuber, „Modular re-configurable robot drives“ in *2010 IEEE Conference on Robotics, Automation and Mechatronics (RAM)*, Singapore, 2010, S. 150-155, doi: 10.1109/RAMECH.2010.5513196.
- [41] A. Rabl, P. Salner, L. Büchi, J. Wrona, S. Mühlbacher-Karrer und M. Brandstötter, „Implementation of a Capacitive Proximity Sensor System for a Fully Maneuverable Modular Mobile Robot to Evade Humans“ in *Austrian Robotics Workshop 2018*, S. 17-22, doi: 10.15203/3187-22-1-05.
- [42] C. Paredis, B. H. Brown und P. Khosla, „A Rapidly Deployable Manipulator System - Robotics and Automation, 1996. Proceedings., 1996 IEEE International Conference on“, 1996.
- [43] J. Gausemeier, *Rechnerunterstützte Entwicklung (CAE/CAD)*. [Online]. Verfügbar unter: [https://www.enzyklopaedie-der-wirtschaftsinformatik.de/lexikon/informationssysteme/Sektorspezifische-Anwendungssysteme/Computer-Integrated-Manufacturing-\(CIM\)/Rechnerunterstützte-Entwicklung-\(CAE-CAD\)](https://www.enzyklopaedie-der-wirtschaftsinformatik.de/lexikon/informationssysteme/Sektorspezifische-Anwendungssysteme/Computer-Integrated-Manufacturing-(CIM)/Rechnerunterstützte-Entwicklung-(CAE-CAD)) (Zugriff am: 20. Dezember 2021).

- [44] STEP Tools Inc, *The STEP Standard - ISO 10303*. [Online]. Verfügbar unter: https://www.steptools.com/stds/step/step_1.html (Zugriff am: 20. Dezember 2021).
- [45] A. Jung, *Funktionale Gestaltbildung: Gestaltbildende Konstruktionslehre für Vorrichtungen, Geräte, Instrumente und Maschinen*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1989.
- [46] G. Pahl, W. Beitz, J. Feldhusen und K.-H. Grote, *Konstruktionslehre: Grundlagen erfolgreicher Produktentwicklung ; Methoden und Anwendung*, 7. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer, 2007. [Online]. Verfügbar unter: <http://swbplus.bsz-bw.de/bsz256268762cov.htm>
- [47] F. Häfele, *Topologievarianten von EtherCAT und deren Einfluss auf die Systemeigenschaften*. [Online]. Verfügbar unter: https://www.ethercat.org/download/documents/atp_122008_etg.pdf (Zugriff am: 29. Dezember 2021).
- [48] NVIDIA Corporation, *Das Jetson Nano 2GB-Entwicklerkit: KI und Robotik in der Praxis erfahren* (Zugriff am: 26. Dezember 2021).
- [49] Beckhoff Automation GmbH & Co. KG, *AM8112-wFyz: AM8112-wFyz Servomotor 0,38NM (M0), F1 (40mm)* (Zugriff am: 26. Dezember 2021).
- [50] OMRON Corporation, *OMRON TM Kollaborative Roboter*. [Online]. Verfügbar unter: https://assets.omron.eu/downloads/brochure/de/v18/i850_tm_collaborative_robot_brochure_de.pdf (Zugriff am: 30. November 2021).
- [51] Universal Robots, *Kollaborierende Roboter von Universal Robots*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.universal-robots.com/de/produkte/> (Zugriff am: 30. November 2021).
- [52] Umbratek, *UTRA SERIES: Light-weight Modular Robots*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.umbratek.com/utra-series-modular-robots> (Zugriff am: 30. November 2021).
- [53] HEBI Robotics, *Robotic Arm Kits*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.hebirobotics.com/robot-arms> (Zugriff am: 30. November 2021).
- [54] A. Böge, *Technische Mechanik: Statik - Dynamik - Fluidmechanik - Festigkeitslehre*, 29. Aufl. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag, 2011. [Online]. Verfügbar unter: <http://swbplus.bsz-bw.de/bsz343193663cov.htm>

- [55] M. Sereinig, W. Werth und L.-M. Faller, „A review of the challenges in mobile manipulation: systems design and RoboCup challenges“, *Elektrotech. Inftech.*, Jg. 137, Nr. 6, S. 297-308, 2020, doi: 10.1007/s00502-020-00823-8.
- [56] R. Bischoff, U. Huggenberger und E. Prassler, „KUKA youBot - a mobile manipulator for research and education“ in *2011 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, Shanghai, China, 2011, S. 1-4, doi: 10.1109/ICRA.2011.5980575.
- [57] *Barrierefreies Bauen - Planungsgrundlagen*, B 1600, Österreichisches Normungsinstitut, Mai. 2005. [Online]. Verfügbar unter: www.on-norm.at
- [58] W. Jakoby, *Projektmanagement für Ingenieure*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2021.
- [59] Raspberry Pi Foundation, *Raspberry Pi 3 Model B+* (Zugriff am: 26. Dezember 2021).

10 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 - Modifiziertes V-Modell nach VDI 2206 [12]	6
Abbildung 2 - Modifizierte Kategorisierung von Robotern [14, S. 131].....	8
Abbildung 3 - Modifizierte Einordnung der Produktstrukturstrategien [17, S. 23]	9
Abbildung 4 - Modifizierte Gliederung der Sensoren für autonome mobile Roboter [31, S. 3]	14
Abbildung 5 - CAD Rendering einer möglichen Konfiguration des <i>Thor Robots</i> [28, S. 1].....	17
Abbildung 6 - Modifizierte Abbildung: Verbinder mit optionaler Drehmomentübertragung [28, S. 2].....	18
Abbildung 7 - WMR: Modularer Roboter mit Reifen [39, S. 42]	19
Abbildung 8 - Wabenroboter: Wabenstruktur und mögliche Konfigurationen [40, S. 151] ...	20
Abbildung 9 - Wabenroboter des Joanneum Research [41, S. 17]	21
Abbildung 10 - Modifizierte schematische Darstellung einer Produktarchitektur [16, S. 81]; [17, S. 11].....	25
Abbildung 11 - Schwachstellenanalyse: Werteprofile der Modulformen	35
Abbildung 12 - Kompatibilität von Modulen bei 90° verbindbaren Male/Female Konnektoren	37
Abbildung 13 - Kompatibilität von Modulen bei 180° verbindbaren Male/Female Konnektoren	38
Abbildung 14 - Kompatibilität bei Modulen mit einem rotierbaren Mechanismus	39
Abbildung 15 - Netzwerktopologie: Baumstruktur des <i>TURBO</i>	40
Abbildung 16 - Funktionsstruktur am Beispiel des <i>TURBO</i>	42
Abbildung 17 - Produktstruktur am Beispiel des <i>TURBO</i>	44
Abbildung 18 - Rendering eines Lenkrollenmoduls	47
Abbildung 19 - Rendering der Antriebsmodulvarianten.....	48
Abbildung 20 - Rendering des Chassis mit Verbinderplatten aus Acrylglas	49
Abbildung 21 - Chassis der Module mit Abdeckungen aus Aluminium	50
Abbildung 22 - Vereinfachtes CAD-Modell zur Massenmittelpunktsberechnung.....	52
Abbildung 23 - Prinzipskizze: Kippen des Roboters auf einer Rampe.....	53
Abbildung 24 - Konfiguration 1: CAD-Modell des Gesamtsystems.....	54
Abbildung 25 - Konfiguration 1: Vereinfachtes Modell zur Schwerpunktsermittlung	55

Abbildung 26 - Konfiguration 1: Schattiertes Modell mit Gesamtschwerpunkt.....	55
Abbildung 27 - Kippen: Skizze mit Bemaßungen.....	56
Abbildung 28 - Konfiguration 1: Diagramme der Kippberechnung	58
Abbildung 29 - Konfiguration 1: Gesamtschwerpunkt bei günstigerer Greifarmposition.....	59
Abbildung 30 - Konfiguration 1 mit günstigerer Greifarmposition: Diagramme der Kippberechnung	60
Abbildung 31 - Konfiguration 2: CAD-Modell des Gesamtsystems.....	61
Abbildung 32 - Konfiguration 2: Schattiertes Modell mit Gesamtschwerpunkt.....	61
Abbildung 33 - Konfiguration 2: Diagramme der Kippberechnung	62
Abbildung 34 - Konfiguration 2: Gesamtschwerpunkt bei günstigerer Greifarmposition.....	62
Abbildung 35 - Konfiguration 2 mit günstigerer Greifarmposition: Diagramme der Kippberechnung	63
Abbildung 36 - Parametrisiertes Entwurfsmodell des <i>TURBO</i>	65
Abbildung 37 - Konfiguration erstellt mit dem Baukastensystem.....	66
Abbildung 38 - CAD-Modell des ersten geplanten Prototyps.....	67
Abbildung 39 - Realisierung der Verbinder im ersten Prototyp durch Ersatzplatten.....	68
Abbildung 40 - Geplanter Belastungsversuch der Verbinderelemente.....	69
Abbildung 41 - Prototyp eines leeren Moduls	69
Abbildung 42 - Modularer Aufbau mit rotierbarem Mechanismus.....	71

11 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 - Modifizierte Anforderungsliste in Anlehnung an Kinzer (Anhang Kapitel 13.1)	29
Tabelle 2 - Paarweiser Vergleich der Modulformen	32
Tabelle 3 - Nutzwertanalyse der Modulformen	34
Tabelle 4 - Vergleich von Roboterarmen zur Abschätzung der Masse [50-53]	51

12 Nomenklatur und Abkürzungen

Formelzeichen	Bezeichnung	Einheit
F	Kraft	N
g	Erdbeschleunigung	m/s ²
h	Höhe	m
I	Massenträgheitsmoment	kg*m ²
I	Strom	A
m	Masse	kg
M	Moment	Nm
n	Drehzahl	min ⁻¹
P	Leistung	W
Q	Elektrische Ladung	Ah
S	Sicherheit	1
t	Zeit	s
U	Spannung	V
v	Geschwindigkeit	m/s
α	Neigungswinkel	Grad, Rad
μ	Reibkoeffizient	1
ω	Winkelgeschwindigkeit	s ⁻¹

Indizes	Bezeichnung
A, B, C	Punkt
H	Haft
K	Kipp
S	Stand
X, Y, Z	Koordinatenachse

Abkürzung	Bezeichnung
A	Oberfläche
CAD	Computer Aided Design
COG	Massenmittelpunkt (Center of Gravity)
GUI	Graphical User Interface
LIDAR	Light Detection and Ranging
PDU	Power Distribution Unit
RMMS	Reconfigurable Modular Manipulator Design
ROS	Robot Operating System
STEP/Step	Standard for the Exchange of Product model data
TURBO	TU Robot
V	Volumen
VDI	Verbund deutscher Ingenieure
WMR	Wheeled modular Robot

13 Anhang

13.1 Anforderungsliste

Nr.	Beschreibung/ Name der Anforderung	Bezeichnung (Variable)	Zahlenwert (mit Toleranz)			Einheit (phys.)	Gewichtung	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, Omnidirektional, 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								
Räumlich								
2.1	Fahrssystem	A1	2,00		3,00	1	mittel → 2	Min: Ebene Bewegung + Drehung Max: 3 Achsen genügen für manche Anwendungen.
2.2	Roboterarm	A2	3,00		7,00	1	hoch ↑ 3	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.
4.2	Roboterarm	y2	+/- 0,1		+/- 10	mm	mittel → 2	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.
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

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	Antriebsdrehmoment	Ma	-	-	Nm	mittel → 2	Ausreichend zu wählen im Hindernisse im Gelände und Steigungen überwinden zu können. Maximale Steigung 6% (entspricht der maximalen Steigung von Rampen iSd Barrierefreiheit); Kanten mit 30mm Höhe.	
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.
8	Tragfähigkeit	m(T)	100,00	-	-	kg	niedrig ↓ 1	Max: Maximalgewicht soll nicht zu groß werden, damit TURBO noch von Menschen transportiert werden kann.
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. Aktorik 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.	
6	Effizienz und Wirkungsgrad					hoch ↑ 3	Max: Überhitzung im Sommer im Freien soll verhindert werden. 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
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 (Bajonettverschluss 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 Baugruppen.
8	Mensch-Machine-Interface						hoch	↑	3	TURBO muss eine möglichst einfach 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									Detaillaufgaben sind definiert und Entwicklung kann in kleineren Schritten ausgearbeitet werden. Vorbereitungen für Robotik Studiengang sind abgeschlossen.
							hoch		33	
							mittel		24	
							niedrig		7	

13.2 Matlab Code der Berechnung

%Von Catia ausgelesene Daten zum Schwerpunkt und Geometrie

CATIACOGx = 0.062687;

CATIACOGz = 0.230958;

R = 0.125; %Radius Antriebsrad

m = 132.5; %Gesamtmasse

IR = 0.005; %Trägheit Räder

g = 9.81; %Erdbeschleunigung

%Rampenneigung

alpha = 0:0.01:12; %Rampenneigung

%Umrechnung der Schwerpunktsabstände

SchwerpunktX = CATIACOGx;

SchwerpunktZ = CATIACOGz + 0.0992;

% GRÜN: Berechnung Kippen um Radaufstandspunkt

%Geometrische Winkel und Abstandsberechnung

L = sqrt(SchwerpunktX^2+(SchwerpunktZ-R)^2);

Chi = asind(sind(alpha)*R/L);

L2 = sqrt(SchwerpunktX^2+SchwerpunktZ^2);

Psi = acosd((L2^2+L^2-R^2)/(2*L2*L));

Gamma = 90 - atand((SchwerpunktZ-R)/SchwerpunktX) - Psi - alpha;

Phi = Gamma + Psi - Chi;

alpha2 = atand((SchwerpunktZ-R)/SchwerpunktX)+alpha;

L3 = sind(alpha2)*L;

L4 = L*cosd(Chi);

%Abrollbewegung

$L6 = 2 \cdot R \cdot \pi \cdot \Phi / 360;$

$L5 = \sin(\alpha) \cdot L6;$

%Höhe die der Schwerpunkt beim Abrollen zurücklegen muss

$hm = L4 - L3 - L5;$

$h = hm \cdot 1000;$ %mm

%Geschwindigkeit welche zum Kippen führt

$v = \sqrt{2 \cdot m \cdot g / (m + I \cdot R / R^2) \cdot hm};$ %m/s

$vkmh = v \cdot 3.6;$ %km/h

%Plot

FS = 20; %FontSize

FS2 = 18;

figure(1)

subplot(2,1,1);

plot(alpha,h,'LineWidth',2, 'Color','b');

xlim([min(alpha) max(alpha)])

xticks([min(alpha):1:max(alpha)])

ax = gca;

ax.FontSize = FS2;

title('Höhendifferenz des Schwerpunktes bei der Kippbewegung', 'FontSize', FS)

xlabel('Rampenneigung [°]', 'FontSize', FS)

ylabel('h [mm]', 'FontSize', FS)

grid on

subplot(2,1,2);

plot(alpha,vkmh,'LineWidth',2, 'Color','b');

```
xlim([min(alpha) max(alpha)])  
xticks([min(alpha):1:max(alpha)])  
  
ax = gca;  
ax.FontSize = FS2;  
title('Kritische Geschwindigkeit', 'FontSize', FS)  
xlabel('Rampenneigung [°]', 'FontSize', FS)  
ylabel('Geschwindigkeit [km/h]', 'FontSize', FS)  
  
grid on
```