

Diplomarbeit

Entwicklung eines Antriebsmoduls für einen modular aufgebauten kooperativen Roboter

ausgeführt um Zwecke der Erlangung des akademischen Grades

Diplom-Ingenieur

eingereicht an der

Technischen Universität Wien

Fakultät für Maschinenwesen und Betriebswissenschaften

unter der Leitung von:

A.o. Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Manfred Grafinger

(Institut für Konstruktionswissenschaften und Produktentwicklung)

von

Ernst Kubr, BSc.

Wien, 28.07.2022

Ernst Kubr

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

Entwicklung eines Antriebsmoduls für einen modular aufgebauten kooperativen Roboter

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.

Wien, 28.07.2022

Ernst Kubr

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich meinen Dank an all jene ausdrücken, die unterstützend bei der Anfertigung dieser Diplomarbeit beteiligt waren.

Zuerst möchte ich mich bei meinen Eltern - Ilse und Hannes - bedanken, deren ungebrochene emotionale und finanzielle Unterstützung mein Studium überhaupt erst ermöglicht haben.

Außerdem gilt mein Dank meiner Freundin Yasmeen, die mir immer die nötige Kraft und Motivation schenkt.

Besonders möchte ich mich bei meinen Projektkollegen, die mir mit Rat und Hilfe bei der Fertigstellung meiner Diplomarbeit zur Seite standen, bedanken. Insbesondere Maximilian Papa, Alexander Kinzer, Philipp Zorn und Manuel Buchberger möchte ich dabei hervorheben.

Kurzfassung

Industrielle Produktion und Logistik stehen zunehmend vor der Aufgabe, den steigenden Anforderungen bezüglich Geschwindigkeit, Kostendruck, Qualität und Innovation gerecht zu werden. Dieser Trend zu größerer Flexibilität und starker Anpassbarkeit unter den Bedingungen von Großserienproduktionsanlagen erfordert Umstrukturierungen im Sinne von Industrie 4.0, wobei Digitalisierung und Automatisierung Kernrollen spielen.

Die dafür eingesetzten automatisierten mobilen Robotersysteme müssen den Flexibilitätsanforderungen ebenso nachkommen wie die stationären. Die Implementierung modularer Strukturen in diesem Bereich, ermöglichen die situationsspezifische Anpassung an sich verändernde Einsatzbedingungen.

In dieser Arbeit werden Konzepte für den Antrieb modularer mobiler Manipulatoren behandelt. Im Rahmen des Projektes *TURBO* der TU Wien wird ein Konzept zum Entwurf und zur Konstruktion gebracht und innerhalb eines Funktionsprototypen getestet. Die Fragen, welchen Funktionsumfang solch ein Antriebsmodul bereitstellen soll, wie sich dieser durch modulare Bauweise anpassbar ausführen lässt, wie die Stärken und Schwächen der unterschiedlichen Konzepte zu bewerten sind und wie sich das Modul in das Gesamtsystem bestmöglich integrieren lässt, sollen beantwortet werden.

Die methodische Entwicklung dieses Antriebsmoduls erfolgt angelehnt an die in VDI Richtlinie 2221 beschriebenen Prozessphasen und die damit verknüpften Aktivitäten.

Abstract

The fields of industrial production and logistics are confronted with increasing demands regarding speed, costs, quality and innovation. The trend towards higher flexibility and increased adaptability within the confines of mass production requires restructuring in accordance with Industry 4.0, wherein digitalization as well as automation play key roles.

Employed automated mobile as well as stationary robot systems must fulfill those demands. Implementing modular structures into these systems enable adaptation to ever changing operating conditions.

This thesis presents a variety of different drive concepts for modular mobile manipulators. Within the Vienna University of Technology's project *TURBO*, one concept is being chosen for design and manufacture, to then be tested by integration into a functioning prototype. Research questions regarding the range of functions, modular adaptability, evaluation of different concepts' strengths and weaknesses and integration of the module into the overall system are being answered.

A methodical approach in accordance with VDI guideline 2221, incorporating the therein-proposed process phases and the development actions linked to it, is used.

Inhaltsverzeichnis

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1 | Einleitung | 4 |
| 1.1 | Motivation | 4 |
| 1.2 | Zielsetzung | 6 |
| 1.2.1 | Forschungsfragen | 6 |
| 1.3 | Methodik | 7 |
| 1.3.1 | Entwicklung - Das V-Modell | 7 |
| 1.3.2 | Konzepterstellung - Der Morphologische Kasten | 9 |
| 1.3.3 | Entscheidungsfindung - die Nutzwertanalyse | 10 |
| 1.4 | Das Projekt TURBO | 10 |
| 2 | Grundlagen | 12 |
| 2.1 | Roboter | 12 |
| 2.2 | Mobiler Roboter | 13 |
| 2.2.1 | Bewegungskonzepte | 13 |
| 2.2.2 | Räder | 18 |
| 2.2.3 | Radkonfigurationen | 19 |
| 2.3 | Fahrerloses Transportsystem | 23 |
| 2.4 | Mobiler Manipulator | 24 |
| 2.5 | Flexible Produktionsumgebung | 25 |
| 2.6 | Modularität | 26 |
| 2.7 | Antrieb | 27 |
| 2.7.1 | Motor | 27 |
| 2.7.2 | Getriebe | 30 |
| 3 | Stand der Technik | 34 |
| 3.1 | Oxford Navigator - Modular Wheeled Mobile Robot | 34 |
| 3.2 | Vierradantriebe | 36 |
| 3.3 | Modulare Konzepte für Antriebe von „all-terrain“ Robotern | 37 |
| 3.4 | Rekonfigurierbare Wabenroboter | 38 |

| | | |
|----------|---|-----------|
| 4 | Methodische Entwicklung eines Antriebsmoduls | 40 |
| 4.1 | Klären der Aufgabe | 41 |
| 4.1.1 | Quantifizierbare Anforderungen | 43 |
| 4.1.2 | Nichtquantifizierbare Anforderungen | 44 |
| 5 | Konzeptphase | 46 |
| 5.1 | Abstraktion | 46 |
| 5.2 | Zerlegung in Teilfunktionen | 47 |
| 5.2.1 | Ebene und räumliche Bewegung | 47 |
| 5.2.2 | Teilfunktionen der ebenen Bewegung | 48 |
| 5.2.3 | Stabilität | 48 |
| 5.3 | Grundlegendes Antriebskonzept - Räder oder Beine | 50 |
| 5.4 | Bewertungskriterien des Antriebsmoduls | 50 |
| 5.5 | Paarweiser Vergleich der Bewertungskriterien | 51 |
| 5.6 | Nutzwertanalyse der grundlegenden Bauarten des Antriebs | 53 |
| 5.7 | Konzepterstellung eines Antriebsmoduls mit Rad | 56 |
| 5.8 | Festlegung der relevanten Merkmale und deren Ausprägungen | 56 |
| 5.8.1 | Motor | 56 |
| 5.8.2 | Getriebe | 57 |
| 5.8.3 | Konfiguration | 58 |
| 5.8.4 | Radaufhängung | 58 |
| 5.8.5 | Radpositionierung | 61 |
| 5.9 | Aufstellung des morphologischen Kastens | 63 |
| 5.9.1 | Konzept A | 64 |
| 5.9.2 | Konzept B | 65 |
| 5.9.3 | Konzept C | 66 |
| 5.10 | Bewertung der Konzepte | 67 |
| 5.11 | Erweiterte Bewertungskriterien | 67 |
| 5.12 | Paarweiser Vergleich der erweiterten Bewertungskriterien | 68 |
| 5.13 | Gewichtete Nutzwertanalyse der drei erstellten Antriebskonzepte | 70 |
| 5.14 | Wahl des Konzeptes | 72 |
| 6 | Entwurfsphase | 73 |
| 6.1 | Gliedern in Module | 73 |
| 6.1.1 | Antrieb | 74 |
| 6.1.2 | Getriebe | 74 |

Inhaltsverzeichnis

| | | |
|----------|--|------------|
| 6.1.3 | Abtrieb | 74 |
| 6.2 | Gestalten der Module | 74 |
| 6.2.1 | Überfahren von Kanten | 75 |
| 6.2.2 | Räder | 80 |
| 6.2.3 | Notwendiges Übersetzungsverhältnis | 81 |
| 6.2.4 | Auswahlkriterien des Motors | 82 |
| 6.2.5 | Auslegung des Riementriebs | 85 |
| 6.2.6 | Riemenspannung & Lagerung | 86 |
| 7 | Tests mit dem Prototypen | 89 |
| 7.1 | Testkonfiguration | 90 |
| 7.2 | Aufbau der Tests | 91 |
| 7.3 | Testergebnisse | 95 |
| 8 | Diskussion und Ergebnisse | 96 |
| 8.1 | Diskussion der Forschungsfragen | 96 |
| 9 | Fazit und Ausblick | 98 |
| 9.1 | Potential des Antriebs | 98 |
| 9.2 | Änderungsvorschläge | 99 |
| | Abbildungsverzeichnis | 101 |
| | Tabellenverzeichnis | 104 |
| | Literaturverzeichnis | 105 |

1 Einleitung

Die industrielle Produktion befindet sich in einer Phase der Umstrukturierung. Durch die Digitalisierung konventioneller Industriebetriebe zielt man auf eine Steigerung des Automatisierungsgrades und der Vernetzung innerhalb der Produktionsketten ab, um auch bei steigendem Kostendruck im industriellen Umfeld wettbewerbsfähig zu bleiben. Für die Produktion führt das zu erhöhten Anforderungen bezüglich Geschwindigkeit, Qualität, Innovation und insbesondere Flexibilität sowie Individualisierungsmöglichkeiten [1]. Der Begriff „Industrie 4.0“ bezeichnet ein Zukunftsprojekt der deutschen Bundesregierung, das diese Aufgaben behandeln soll [2]. Der Zusatz „4.0“ angelehnt an Software-Versionsnummern, verdeutlicht dabei, dass es sich um die vierte Industrielle Revolution handeln soll, in der Digitalisierung eine Kernrolle spielt.

In der Produktion ist für den Trend zu größtmöglicher Flexibilität bis hin zu „Losgröße 1“ die starke Anpassbarkeit unter den Bedingungen von Großserienproduktionsanlagen maßgeblich. Um hochflexibilisierte kundenspezifische Lösungen ohne Wartezeiten anbieten zu können ist ein hoher Grad an Automatisierung notwendig. Rekonfigurierbarkeit von Produktionssystemen ist dabei unabdingbar [3, 16–25].

1.1 Motivation

Der Stellenwert, den Robotik in der Industrie annimmt wird zukünftig weiter an Relevanz gewinnen. Die Nachfrage nach flexiblen Systemen, die dynamisch an Aufgaben angepasst werden können, ist groß. Dies gilt für alle Arten von Robotern, nicht nur für stationäre sondern auch für mobile. Insbesondere im Bereich der Intralogistik spielt die Entwicklung anpassbarer, intelligenter, mobiler Roboter eine zentrale Rolle [4, 101].

Eine modulare Systemarchitektur kann dabei implementiert werden, um der Forderung nach Flexibilität nachzukommen. Der Trend zu Modularität zeichnet sich in auch der Entwicklungsarbeit führender Unternehmen der Branche ab.

1 Einleitung

„Mobile Automatisierungslösungen werden auch in den nächsten Jahren zu den wichtigsten Schlüsselfaktoren für die smarte Produktion und Fördertechnik der Zukunft gehören.

Mobile Roboter werden noch einfacher adaptierbar. Intelligente, mobile Robotersysteme werden durch das Hinzufügen modularer Komponenten noch mehr Anwendungen auf derselben mobilen Plattform ermöglichen und so für nachhaltige Produktivitäts- und Effizienzsteigerungen sorgen.“ [5]

Über industrielle Applikationen hinausgehend, gewinnen Robotersysteme auch in anderen Gebieten weiter an Bedeutung. Informations- und Kommunikationstechnologien sind Fachbereiche, deren kompetente und effiziente Nutzung gegenwärtig und auch zukünftig vieldiskutierte Themen in Bildungsfragen sind [6, S.59]. Empfehlungen zur Instrumentalisierung der Robotik als Lernmittel für ein breites Spektrum an technischer Frühbildung können zu erhöhter Nachfrage an Robotersystemen für Bildungszwecke führen [7]. Die Entwicklung solcher Systeme, die in der Bildung gleichermaßen wie im Industriellen Umfeld einsetzbar sind, kann wertvoll sein.

Weiters sind mobile Roboter im alltäglichen Leben ebenso präsent. In Haushalten zählen einfache Staubsaugerroboter gleichermaßen zu Vertretern wie komplexere Pflegerobotersysteme. Kollaborative Roboter und Mensch-Maschine Interaktion sind nicht nur im Rahmen von Industrie 4.0 aktuell und relevant [8, 1–4]. Individuelle, menschnahe Behandlung ist in der Pflege essentiell. Die Flexibilität einer menschlichen Pflegekraft durch eine Maschine zu imitieren ist eine komplexe Aufgabe. Umso mehr zeigt sich daher die Notwendigkeit, derartige Systeme besonders anpassbar zu gestalten.

Einen neuen Roboter zu entwickeln, der einzelne Tätigkeiten durchführen kann und auf eine bestimmte Anwendung spezialisiert ist, entspricht nicht mehr der heutigen Zeit. An zukünftige Systeme werden vielseitige Ansprüche gestellt. Die Einsatzbereiche lassen sich nicht länger im Vorfeld definieren. Die Nachfrage nach flexiblen, anpassbaren Lösungen im Robotikbereich wird steigen.

Eine modulare Bauweise, bei der die Komponenten des Gesamtsystems voneinander getrennte Einheiten sind, ist ein Weg, die Menge der möglichen Einsatzgebiete groß zu halten.

Jeder mobile Roboter, modular oder nicht, braucht einen Antrieb um sich fortzubewegen. Diese Diplomarbeit beschäftigt sich mit der Entwicklung eines oder mehrerer Bausteine für einen mobilen Roboter, die dessen Bewegung ermöglichen.

1.2 Zielsetzung

Innerhalb dieser Diplomarbeit sollen alle notwendigen Schritte zur Auswahl eines Konzeptes durchgeführt werden, das als Abschluss eine oder mehrere abgeschlossene Baugruppen darstellt, die, entsprechend in ein Gesamtsystem integriert, den Antrieb des physischen Prototypen eines mobilen Roboters bewerkstelligen. Zentral ist dabei die deutliche Abgrenzung von anderen Systemkomponenten. Die Bauweise soll also auf einem Prinzip der Modularität beruhen.

Zu diesen Schritten gehören die Festlegung der notwendigen Komponenten des Antriebsmoduls mit anschließender Entwicklung mehrerer Konzepte. Dabei sollen die Fragen beantwortet werden, welche Antriebe derzeit in vergleichbaren Bereichen eingesetzt werden und wie sie sich aufgrund ihrer jeweiligen Stärken und Schwächen unterscheiden, und welche Eigenschaften ein Antriebsmodul erfüllen muss. Weiters soll im Zuge dessen geklärt werden, wie ein solches Modul prinzipiell aussehen kann.

Die erarbeiteten Konzepte sollen danach verglichen und evaluiert werden, um das beste auszuwählen. Für die Komponenten dieses besten Konzeptes werden dann alle notwendigen (restlichen) Berechnungen durchgeführt um einen Prototypen entwerfen zu können. Nach Anschaffung der für diesen notwendigen Bauteile soll ein physischer Prototyp zusammengebaut werden, mit dem Funktionstests zur Verifikation des Konzeptes und der Berechnungen durchgeführt werden können. Als Ergebnis liegt dann eine erste Version eines Antriebsmoduls vor. Basierend auf den Erkenntnissen, die während der Prototypenerstellungsphase gewonnen wurden, soll eine ausführliche Zusammenfassung mit speziellem Fokus darauf gegeben werden, welche zukünftigen Adaptierungs- und Veränderungsmöglichkeiten bestehen. Dadurch soll ein Vorschlag für eine Weiterentwicklung der Antriebsmodule entstehen, der zusammen mit den erarbeiteten Konzepten, Evaluierungen und Berechnungen, eine Basis für Folgearbeiten bildet.

1.2.1 Forschungsfragen

Zu den Zielen gehört die Suche nach Antworten auf die Fragen:

Welchen Umfang an Funktionen muss ein Antriebsmodul für einen modular aufgebauten mobilen Manipulator besitzen?

Die Definition eines Anforderungsprofils an Funktionen stellt ein Zwischenziel des Entwicklungsprozesses dar. Nur wenn Klarheit darüber herrscht, welche Aufgaben vom fertigen System jedenfalls zu erfüllen sind, kann mit einer sinnvollen Lösungssuche be-

gonnen werden.

Auf welche Art und Weise lässt sich dieser Funktionsumfang an unterschiedliche Einsatzszenarien anpassbar bereitstellen?

Der Wesenskern der Modularität liegt unter anderem in der Anpassbarkeit. Konzeptentwürfe sollen dies jedenfalls berücksichtigen.

Wo liegen die Stärken beziehungsweise Schwächen verschiedener Konzepte modularer Antriebe mobiler Manipulatoren?

Die breitgefächerten Möglichkeiten an Antriebslösungen zeichnen sich durch unterschiedliche Vor- und Nachteile aus. Klarheit darüber zu schaffen, welche Lösungsvarianten in welchem Bereich vorteilhaft sind, soll Teil des Auswahlprozesses sein.

Wie kann ein Antriebsmodul aussehen, damit es in das Gesamtsystem eines modularen mobilen Roboters sinnvoll integriert werden kann?

Die Entwicklung einer modularen Komponente eines Gesamtsystems bedarf der Berücksichtigung der Integrationsfähigkeit. Während den Entwicklungsphasen muss die spätere Zusammenführung mit den restlichen Systemkomponenten bedacht werden.

1.3 Methodik

Der Entwicklungsprozess ist eine Kombination aus Iteration und „Koevolution von Problem und Lösung“ [9]. Bei wachsender Komplexität der Problemstellungen trägt es zur Arbeitserleichterung bei, auf etablierte Methoden der Produktentwicklung zurückzugreifen.

1.3.1 Entwicklung - Das V-Modell

Für die methodische Entwicklung technischer Produkte gibt es zahlreiche anerkannte Modelle [10]. Speziell für die Entwicklung mechatronischer Produkte, also jenen, welche die Domänen des Maschinenbaus, der Elektrotechnik und Elektronik, sowie der Informatik beinhalten, ist eines der etabliertesten, das „V-Modell“. In der Richtlinie 2206 des Vereins Deutscher Ingenieure (VDI) festgelegt, stellt dieses Modell eine Unterstützung bei der Produktentwicklung dar (siehe Abb.:1.1). Es teilt die logische Abfolge des Produktentwicklungsprozesses in drei Teilbereiche: den Systementwurf, den domänen-spezifischen Entwurf und die Systemintegration [11].

Der „Systementwurf“ hat zum Ziel, ein Konzept festzulegen, das die Funktionen des

1 Einleitung

künftigen Produktes beschreibt. Ausgehend von einer Anforderungsliste, die im Rahmen einer vorhergehenden Projektplanungsphase erstellt wurde, werden die wesentlichen Punkte abstrahiert und die Gesamtfunktion in Teilfunktionen zerlegt, die auf die einzelnen Domänen aufgeteilt werden können. Die konkreten fachspezifischen Lösungen, die im Rahmen des „domänenspezifischen Entwurfs“ ausgearbeitet werden, sollen in der „Systemintegration“ miteinander verbunden, und ihr Zusammenwirken untersucht werden. Währenddessen wird der Entwurf fortlaufend geprüft und auf Erfüllung der Anforderungen abgesichert.

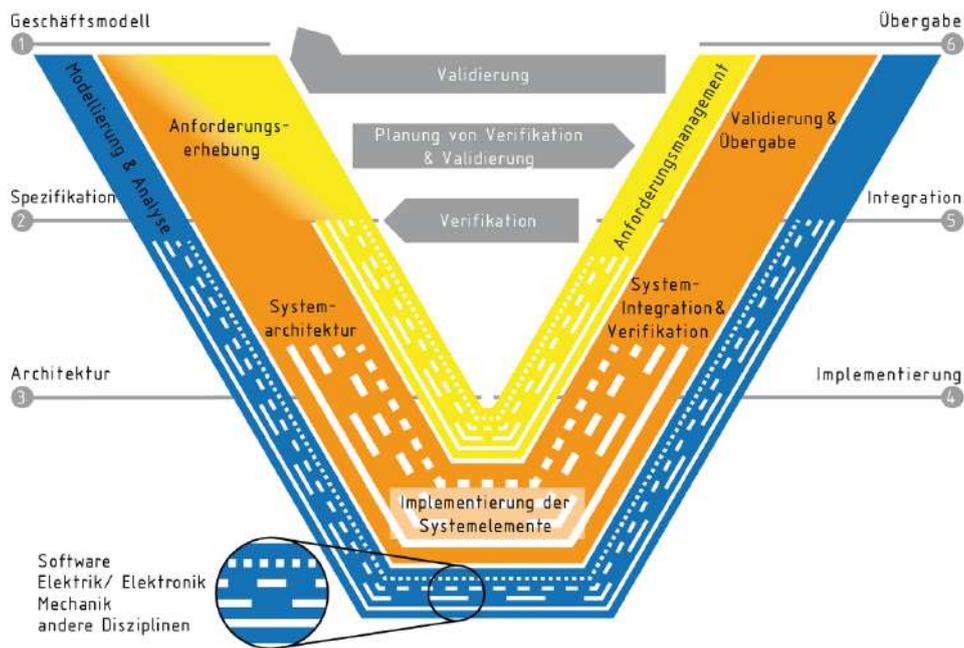


Abbildung 1.1: V-Modell nach VDI 2206 [12]

Ein Vorgehen nach dem V-Modell eignet sich besonders für komplexe Produkte, die fachlich übergreifende Kompetenzen in der Entwicklung erfordern. Da die vorliegende Aufgabe der Entwicklung eines Antriebsmoduls für einen modularen Roboter jedenfalls der Mechatronik zugeordnet werden kann, soll die Methodik angelehnt an die im V-Modell beschriebenen Schritte erfolgen.

Das V-Modell beschreibt die übergeordnete Struktur der Entwicklung, nicht aber das detaillierte Vorgehen innerhalb der einzelnen Schritte. Um auch hier methodisch zu arbeiten, sollen weitere Konzepte zum Einsatz kommen, die den Vorgang unterstützen.

1.3.2 Konzepterstellung - Der Morphologische Kasten

Die technische Konzeptentwicklung ist ein kreativer Prozess. Unter Berücksichtigung der Anforderungen und Spezifikationen lässt sich der zu erstellende Entwurf in Unterbereiche aufteilen, die - für sich - unterschiedlich ausgeprägt sein können. Es liegt dann eine Vielzahl an möglichen Kombinationen von Lösungen vor. Durch sinnvolle und kreative Auswahl von Sets an Ausprägungen von Elementen der strukturiert zerlegten Problemstellung, können sich innovative und zielführende Ansätze ergeben. Dieses Prinzip des „morphologischen Kastens“ ist eine Kreativitätstechnik, die auf den Physiker Franz Zwicky (1898 - 1974) zurückgeht [13]. Die Methode eignet sich besonders für multidimensionale, nicht einfach quantifizierbare Probleme und wird unter anderem bei der Entwicklung neuer Produkte, der Identifizierung von Maßnahmen zur Risikoverminderung oder für den Entwurf verschiedener Szenarien bei der Strategieentwicklung eingesetzt. Grundsätzlich ist sie für vielfältige Problemstellungen geeignet. Die Methode kann während der gesamten Projektlaufzeit immer dann eingesetzt werden, wenn kreative Lösungen für konkrete Probleme gefunden werden sollen [14]. Durch Eintragen der einzelnen Merkmale mit ihren verschiedenen Ausprägungen in einer Tabelle, ergibt sich ein anschauliches Hilfsmittel zu deren Kombination.

Diese Methode soll als Werkzeug dienen, um mehrere Konzepte für modulare Antriebslösungen zu kreieren.

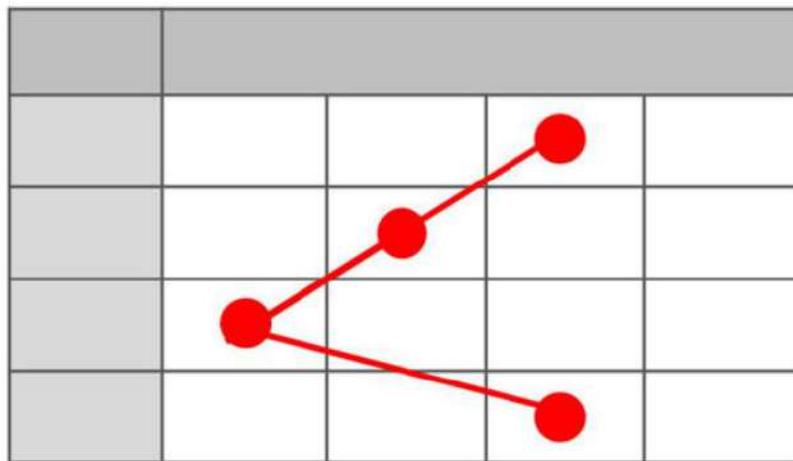


Abbildung 1.2: Schema des morphologischen Kastens [14]

1.3.3 Entscheidungsfindung - die Nutzwertanalyse

Um zu einer Entscheidung zu kommen, welches der so entstandenen Konzepte zur endgültigen Ausarbeitung gelangen soll, wird eine Bewertungsmethode eingesetzt. Zur Bearbeitung von Problemstellungen, deren Kriterien komplex und vielseitig sein können, wurden Entscheidungstheorien entwickelt. Eine solche ist die „Nutzwertanalyse“, die im deutschsprachigen Raum durch Zangemeister [15] bekannt wurde. Sie beschreibt ein Vorgehen zur Analyse von komplexen Alternativen in der Entscheidungsfindung und findet vor allem bei komplexen Produkten mit hoher Anzahl an Bewertungskriterien Einsatz [9]. Die Grundlage bildet dabei eine additive Wertefunktion, die jeder Alternative einen numerischen Wert abhängig von ihren Attributausprägungen zuordnet [16]. Der Bewertungsverlauf wird hierbei in übersichtlicher Weise in die Zeilen und Spalten einer Bewertungsmatrix (siehe Abb.:1.3) eingetragen [9, 318f]. Schlussendlich liegt für jede Alternative ein errechneter Gesamtwert vor, anhand dessen letztlich eine Entscheidung getroffen werden kann.

| Bewertungskriterium | | | Eigenschaftsgrößen | | Variante V1 | | | ... | Vn |
|---------------------|----------------------|-----------------|-----------------------|---------|-------------------|-----------------|---|-----|----|
| ID | Benennung | Gew | Benennung | Einheit | Eigenschaftsgröße | Maßzahl | Wertungszahl | | |
| Z ₁₁₁₁ | Betriebsfestigkeit | 0,1 | Ertragbare Lastspiele | - | 900.000 | 9 | 0,9 | | |
| Z ₁₁₁₂ | Schwingungsverhalten | 0,23 | Erste Eigenfrequenz | Hz | 88 | 8 | 1,84 | | |
| ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | | |
| Z _n | | g _{Kn} | | | e _{1n} | m _{1n} | W _{1n} | | |
| | | | | | | | Nutzwert G _{w1} = Σw _{li} | | |

Abbildung 1.3: Auszug aus einer Bewertungsmatrix einer Nutzwertanalyse [9]

1.4 Das Projekt TURBO

Im November 2020 entstand im Zuge eines Strategiemeetings der Pilotfabrik der TU Wien in Kooperation mit den Instituten für Managementwissenschaften, Fertigungstechnik sowie Konstruktionswissenschaften und Produktentwicklung die Idee, einen mobilen Manipulator zu entwickeln. Das Projekt soll die Stärken und Kompetenzen dieser Institute vereinen und zugleich industrierelevant sein. Kern des Vorhabens, und innovativer Gedanke dahinter, ist eine modulare Bauweise, die einzelne Komponenten so voneinander

1 Einleitung

trennt, dass Rekonfigurierbarkeit besteht. Der Projekttitel „TURBO“ ist eine Zusammensetzung aus „TU“ und „ROBOT“. Neben der industriellen Bedeutung liegt starkes Augenmerk auch auf dem Einsatz des Projektes zu Bildungs- und Forschungszwecken. Wie zuvor bereits erwähnt, stellt die Robotik einen domänenübergreifenden Fachbereich dar, der Informatik, Mechanik und Elektrotechnik beinhaltet. Die Entwicklung beziehungsweise die Weiterentwicklung des Roboters eignet sich daher auch gut für Zwecke der Lehre an der Technischen Universität Wien.

Seit Begründung der Projektidee wurden mehrere Arbeiten unterschiedlicher Umfänge ausgeschrieben. Aufgrund des Wachstums des Projektumfangs verlängert sich die Liste sowohl studentischer- als auch wissenschaftlicher Mitarbeiter der TU Wien stetig. Bereits veröffentlicht ist unter anderem eine Diplomarbeit von P. Zorn [17], die das Gesamtkonzept dieses mobilen Manipulators behandelt. Neben der Erstellung eines Antriebkonzepts sind weitere wichtige Problemstellungen unter anderem die Schnittstellen zwischen den Modulen sowie die Konzeptionierung eines Roboterarms, der ebenfalls modular aufgebaut sein soll.

Die Ergebnisse der hier vorliegenden Arbeit sollen einen wichtigen Beitrag zum ersten Prototypen des TURBO liefern, beschränken sich aber keinesfalls auf dieses Projekt und sollen Relevanz für die Gesamtheit der mobilen Robotik haben.

2 Grundlagen

Das Verständnis der vorliegenden Problemstellung erfordert vorab Kenntnis der technischen Hintergründe. Die wesentlichen Begriffe und das notwendige Grundlagenwissen soll in diesem Kapitel erörtert werden. Dabei wird nicht zu stark ins Detail gegangen, auf entsprechende weiterführende Literatur aber verwiesen. Dieses Kapitel stellt eine Hilfe für den/die LeserIn dar, der/die sein/ihr Fachwissen über die, der mobilen Robotik zugrunde liegenden, Konzepte und Begriffe auffrischen möchte.

2.1 Roboter

Einen Startpunkt zur Definition eines Roboters gibt die VDI-Richtlinie 2860 von 1990:

„Ein Roboter ist ein frei und wieder programmierbarer, multifunktionaler Manipulator mit mindestens drei unabhängigen Achsen, um Materialien, Teile, Werkzeuge oder spezielle Geräte auf programmierten, variablen Bahnen zu bewegen zur Erfüllung der verschiedensten Aufgaben.“ [18]

Die moderne Robotertechnik begann in den frühen 1970er Jahren, als die ersten Roboter in den Fabrikhallen der USA und Japan auftauchten. Ihre Hauptaufgabe besteht darin, Arbeitskräfte von monotonen und gefährlichen Tätigkeiten zu entlasten [19]. Robotik *„gilt als die bedeutendste theoretische und technische Revolution seit der Atomphysik, mit unabsehbaren Folgewirkungen auf die gesellschaftliche Entwicklung dieses Jahrhunderts“* [20, S.VII].

Ein Roboter ist also eine Maschine, die auf Basis von Sensoren und Aktoren, physisch mit der Außenwelt interagiert. Während sich die Aufgaben von Robotern anfänglich auf sich wiederholende Tätigkeiten beschränkt haben, werden an moderne Systeme höhere Anforderungen gestellt. Immer mehr in den Fokus rückt dabei die Interaktion mit Menschen. Die Trennung der Arbeitsbereiche von Menschen und Robotern geht zurück, was folglich unter anderem sicherheitstechnische Aufgaben mit sich bringt. Durch andauernde Forschung und Entwicklung werden moderne Robotersysteme intelligenter, vielseitiger und

robuster. Der Roboter, und die Vernetzung von Robotern untereinander, sind zentrale Bestandteile von Industrie 4.0.

2.2 Mobiler Roboter

Als *mobile* Roboter bezeichnet man solche, die sich eigenständig von einem Ort zum anderen bewegen können, ohne dabei externe Unterstützung von menschlichen Bedienern zu benötigen. Im Unterschied zu den meisten industriellen Robotern, die sich nur in einem begrenzten Arbeitsbereich bewegen können, haben mobile Roboter die spezielle Fähigkeit, sich frei in einem definierten Umfeld fortzubewegen, um ihre Aufgaben zu bewältigen. Landroboter werden dabei unterteilt in „wheeled mobile robots (WMRs)“ und „legged mobile robots (LMRs)“. Mobile Roboter mit Rädern (WMRs) sind die am weitest verbreiteten, da sie sich aufgrund ihrer relativ niedrigen mechanischen Komplexität und ihres vergleichsweise niedrigen Energiebedarfs für viele typische Anwendungen eignen. Mobile Roboter mit Beinen (LMRs) finden dagegen eher in nichtstandardisierten Arbeitsumgebungen Anwendung, wo Hindernisse wie Stiegen, Gräben oder Schuttberge zu überqueren sind und wo unebener, instabiler Untergrund vorliegt. Typischerweise sind Systeme mit zwei, drei, vier oder sechs Beinen interessant. Mobile Roboter beinhalten auch die Untergruppe der *mobilen Manipulatoren* [21].

Die VDI-Definition aus 2.1 lässt sich nicht direkt auf die mobilen Roboter übertragen. Sie bezeichnet eher Handhabungsroboter aus der Automatisierungstechnik, wie etwa Schweiß- oder Lackierroboter der Automobilfertigung. Hierbei wird der Arbeitsbereich zusammen mit dem Roboter und seiner Programmierung gestaltet. Die Umgebung ist vollständig bekannt und kontrolliert. Die Arbeitsschritte die ein Schweißroboter auszuführen hat und die Bahn, entlang derer er sich bewegt sind vorab bekannt [22].

Ein mobiler Roboter unterscheidet sich davon insofern, als seine Aktionen von seiner aktuellen Umgebung abhängig sind. Deren Aussehen ist im Detail erst zum Zeitpunkt der Bewegungsausführung bekannt. Daher müssen solche Roboter ihre Umgebung mit Sensoren erfassen, die so erhaltenen Daten auswerten und entsprechend *reagieren* [22].

2.2.1 Bewegungskonzepte

Flurgebundene mobile Roboter lassen sich in die zwei Kategorien Wheeled-Mobile-Robots und Legged-Mobile-Robots unterteilen. Dieser Abschnitt soll deren Anwendungs-

gebiete und Aspekte beleuchten und die damit zusammenhängenden mechanischen Aufgaben kurz vorstellen.

Legged Mobile Robots (LMRs)

Eine Fortbewegung mittels Beinen wird durch eine Serie an punktförmigen Kontakten zwischen dem Roboter und dem Untergrund charakterisiert. Der wesentliche Vorteil gegenüber einem Antrieb mit Rädern besteht in der Anpassungsfähigkeit und Manövrierfähigkeit in unwegsamem Gelände (siehe Abb. 2.1). Nachdem nur eine Reihe an Punktkontakten notwendig ist, spielt die Beschaffenheit des Untergrundes keine Rolle, solange eine angemessene Bodenfreiheit gewahrt werden kann. Zusätzlich ist ein auf Beinen schreitender Roboter in der Lage, einen Spalt beziehungsweise einen Graben zu überqueren, solange seine Reichweite größer ist als dessen Breite [23, Kap.2.2].

Dabei sind unterschiedliche Bein Konfigurationen möglich. Nachdem LMRs von der Natur inspiriert sind, ist es naheliegend, die biologisch erfolgreichen Systeme bezüglich der Anwendung für Roboter zu analysieren. Säugetiere und Reptilien haben oft vier Beine, während Insekten über sechs oder mehr verfügen. Die Fähigkeit auf nur zwei Beinen zu gehen, zeigt sich in einigen Spezies, allen voran im Menschen, der so weit fortgeschritten ist, dass sogar das Springen auf einem einzelnen Bein möglich ist. Diese außergewöhnliche Manövrierfähigkeit verlangt jedoch hochkomplexe aktive Regelung und Kontrolle um das Gleichgewicht zu halten.

Im Kontrast dazu stehen Lebewesen mit einer höheren Anzahl an Beinen. Während Kinder Monate brauchen bis sie das Stehen und Gehen erlernen, können Insekten und Spinnen sich direkt nach dem Schlüpfen fortbewegen, da die Balance auf ihren sechs beziehungsweise acht Beinen einfacher zu halten ist als auf den zwei des Menschen. Vierbeinige Tiere, wie zum Beispiel das Reh, das einen im Vergleich zu vierbeinigen Reptilien hohe gelegenen Massenmittelpunkt aufweist, benötigen einige Minuten um stehen zu können und dann einige weitere, um das Gehen zu erlernen [24].

Darüber hinaus kann auch der Aufbau und die Komplexität eines einzelnen Beines stark variieren. Das menschliche Bein hat mehr als sieben Hauptfreiheitsgrade in Kombination mit weiterer Beweglichkeit der Zehen. Mehr als fünfzehn verschiedene Muskelgruppen sorgen für die Bewegung von acht komplexen Gelenken [25].

Im Fall der mobilen Roboter ist generell mindestens der Freiheitsgrad zwei für Bewegung erforderlich, um ein Bein anzuheben und zu verschwenken. Üblicher ist die Erweiterung

um einen dritten Freiheitsgrad für komplexere Manöver. Durch Implementierung weiterer Gelenke und Antriebe, kann die Manövrierfähigkeit gesteigert werden, sowohl im Bezug auf das Terrain, das überwindbar ist, als auch die Fähigkeit mehrere Gangarten auszuüben. Der größte Nachteil zusätzlicher Gelenke liegt im erhöhten Energiebedarf, der komplexeren Steuerung und der Steigerung der Masse, was die Leistungs- und Kraftanforderungen an die Bestehenden Aktoren erhöht [23].

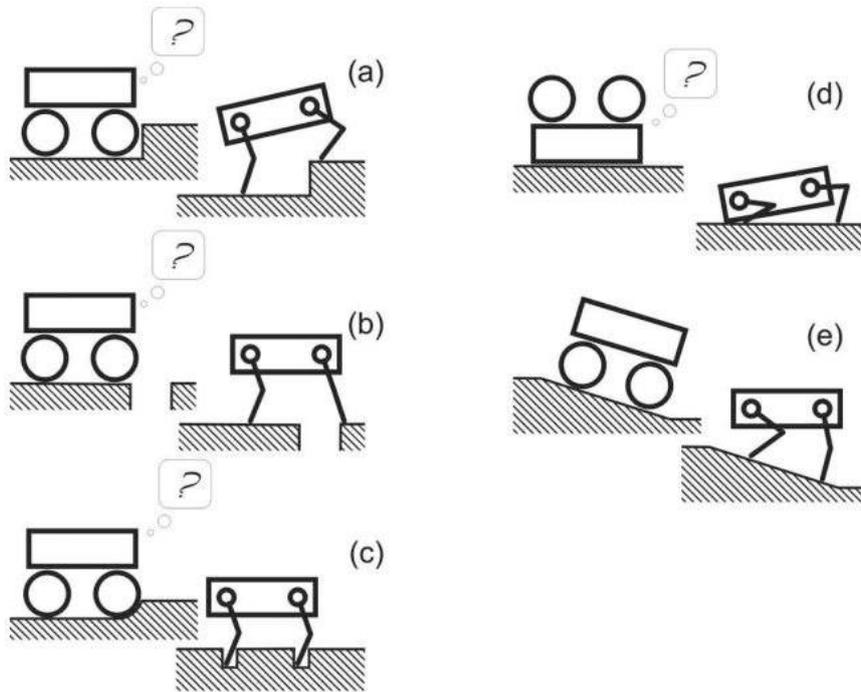


Abbildung 2.1: LMRs sind besonders geeignet, wenn schroffes Gelände überquert werden soll, das Stufen (a), Spalte (b) sowie sandige oder erdige Abschnitte (c) beinhaltet, welche für rädergebundene Systeme unüberwindbar sein können. Darüber hinaus sorgt die hohe Anzahl an Freiheitsgraden für die Fähigkeit des Roboters, aus einer umgekippten oder umgefallenen Position wieder aufzustehen (d), beziehungsweise die Nutzlast auf abschüssigem Gelände horizontal zu halten (e) [23, S.18].

Wheeled Mobile Robots (WMRs)

Das Rad ist mit Abstand der am häufigsten eingesetzte Bewegungsmechanismus in der mobilen Robotik beziehungsweise in vom Menschen erschaffenen Fahrzeugen allgemein.

Der Mechanismus ist sehr effizient und dabei mechanisch relativ einfach aufgebaut. Balanceprobleme wie bei LMRs sind meist kein Thema, da Roboter auf Rädern fast immer so konzipiert werden, dass alle Räder zu jedem Zeitpunkt Bodenkontakt bewahren. Daher reichen üblicherweise drei Räder aus, um Stabilität zu gewährleisten. Wenn mehr als drei Räder verwendet werden, muss bei Fahrt auf unebenem Terrain ein Radaufhängungssystem implementiert werden, um den Bodenkontakt aller Räder zu wahren [23, Kap.2.3].

Während in einer kontrollierbaren Umgebung wie einer Fabrikshalle oder industriellen Montagestraße bestimmte Annahmen bezüglich der Bodenbeschaffenheit gemacht werden können, kann bei Einsatzgebieten, die keinen Normen unterliegen und wo Unebenheiten nicht auszuschließen sind, nicht auf die Aufhängung verzichtet werden. Die Ebenheit von Böden unterliegt in der DIN 18202 vorgeschriebenen Toleranzwerten (siehe Abb. 2.2). Flurförderfahrzeuge werden im allgemeinen unter Berücksichtigung dieser Umgebungsbedingungen ausgelegt. Darüber hinaus stellen Hersteller Fahrerloser Transportfahrzeuge in vielen Fällen noch höhere Anforderungen an die Bodenbeschaffenheit, insbesondere an die Ebenheit. Bleibt der Einsatzort also auf solche Bedingungen beschränkt, können auch ungefederte Systeme mit vier oder mehr Rädern betrieben werden.

Forschungsfragen im Bereich der mobilen Roboter mit Rädern beschäftigen sich im Gegensatz zu jenen der Legged-Mobile-Robots vielmehr mit Problemen der Traktion - also der Übertragung der Zugkraft auf den Untergrund - der Stabilität, der Manövrierfähigkeit und der Steuerung. Die Räder müssen ausreichend Zugkraft übertragen können um die Bewegung des Roboters über das gewünschte Terrain zu ermöglichen. Die Radkonfiguration muss entsprechende Manövrierfähigkeit erlauben und die Steuerung des Roboters zulassen [23].

Der Raum an möglichen Radkonfigurationen in der mobilen Roboterantriebstechnik ist sehr groß. Es ist sinnvoll, zuerst den Aufbau des Rades im Detail zu diskutieren, bevor auf die möglichen Anordnungen - die Konfigurationen - der Räder eingegangen wird, da die verschiedenen Radtypen sich aufgrund ihres spezifischen Aufbaus stark unterscheiden.

Tabelle 3 — Grenzwerte für Ebenheitsabweichungen

| Spalte | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|--------|---|--|--|----------------|-----------------|-------------------|
| | | Stichmaße als Grenzwerte in mm bei Messpunktabständen in m | | | | |
| Zeile | Bezug | bis 0,1 | 1 ^a | 4 ^a | 10 ^a | 15 ^{a,b} |
| | | 1 | Nichtflächenfertige Oberseiten von Decken, Unterbeton und Unterböden | 10 | 15 | 20 |
| 2a | Nichtflächenfertige Oberseiten von Decken oder Bodenplatten zur Aufnahme von Bodenaufbauten, z. B. Estriche im Verbund oder auf Trennlage, schwimmende Estriche, Industrieböden, Fliesen- und Plattenbeläge im Mörtelbett | 5 | 8 | 12 | 15 | 20 |
| 2b | Flächenfertige Oberseiten von Decken oder Bodenplatten für untergeordnete Zwecke, z. B. in Lagerräumen, Kellern | 5 | 8 | 12 | 15 | 20 |
| 3 | Flächenfertige Böden, z. B. Estriche als Nutzestriche, Estriche zur Aufnahme von Bodenbelägen, Bodenbeläge, Fliesenbeläge, gespachtelte und geklebte Beläge | 2 | 4 | 10 | 12 | 15 |
| 4 | Wie Zeile 3, jedoch mit erhöhten Anforderungen | 1 | 3 | 9 | 12 | 15 |
| 5 | Nichtflächenfertige Wände und Unterseiten von Rohdecken | 5 | 10 | 15 | 25 | 30 |
| 6 | Flächenfertige Wände und Unterseiten von Decken, z. B. geputzte Wände, Wandbekleidungen, untergehängte Decken | 3 | 5 | 10 | 20 | 25 |
| 7 | Wie Zeile 6, jedoch mit erhöhten Anforderungen | 2 | 3 | 8 | 15 | 20 |

^a Zwischenwerte sind Bild 6 und Bild 7 zu entnehmen und auf ganze Millimeter zu runden.
^b Die Grenzwerte für Ebenheitsabweichungen der Spalte 6 gelten auch für Messpunktabstände über 15 m.

Abbildung 2.2: Auszug aus DIN 18202 - Ebenheitstoleranzen für Böden im Hochbau

2.2.2 Räder

In der mobilen Robotik eingesetzte Radtypen lassen sich in drei Gruppen unterteilen: Standardräder, Lenkrollen und Spezialräder (siehe Abb. 2.3). Da sich diese voneinander stark unterscheiden hat die Wahl des Rades große Auswirkungen auf die Kinematik des Roboters.

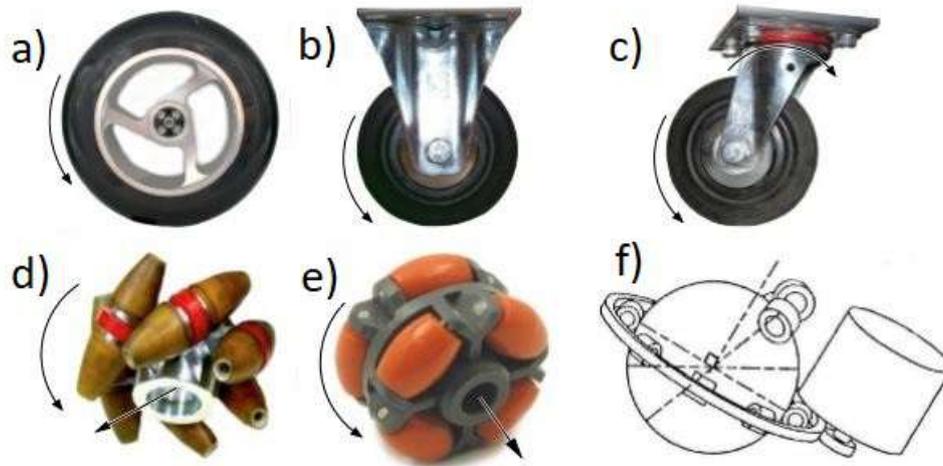


Abbildung 2.3: Räder mobiler Roboter [22]: a) Standard-Rad b) Ein-Freiheitsgrad Lenkrolle c) Zwei-Freiheitsgrad Laufrolle d) Mecanum-Rad e) Omni-Wheel f) Ball-Rad für omnidirektionalen Antrieb [26]

Standardräder sowie Lenkrollen (auch Castor-Wheels genannt) haben eine Hauptrotationsachse und damit eine bevorzugte Bewegungsrichtung. Um diese zu ändern, müssen sie sich um eine vertikale Achse, die durch den Aufstandspunkt verläuft, drehen. Das ist bei Standardrädern und Ein-Freiheitsgrad Lenkrollen abhängig vom Laufflächenmaterial mit relativ geringem Energieaufwand möglich. Zwei-Freiheitsgrad Lenkrollen drehen sich dabei allerdings durch eine Achse, die zum Aufstandspunkt versetzt ist, wodurch bei der Lenkung eine Reaktionskraft auf das Fahrwerk wirkt [23]. Mecanum-Räder sowie Omni-Wheels besitzen passive Rollen entlang ihres Umfangs, wodurch sie mehr als eine bevorzugte Bewegungsrichtung aufweisen. Die einzige angetriebene Achse ist die durch den Mittelpunkt verlaufende. Diese Radtypen bewegen sich mit geringem Reibungswiderstand in mehrere Richtungen und werden in so genannten omnidirektionalen Konfigurationen eingesetzt, die die Bewegung des Roboters in jede Richtung zulassen. Das sphärische Ball-Rad wird zumeist durch aktive Rollen, die mit der Oberfläche des kugelförmigen Radkörpers in Kontakt stehen, angetrieben, sodass es relativ zum Unter-

grund in jegliche Richtung rotieren kann. Eine weitere, in [27] vorgestellte, Ausführung des kugelförmigen Rades verwendet zwei Halbkugeln, die unabhängig voneinander passiv um eine gemeinsame Achse rotieren können, und um eine dazu 90°versetzte, aktiv angetrieben werden (siehe Abb.2.4).

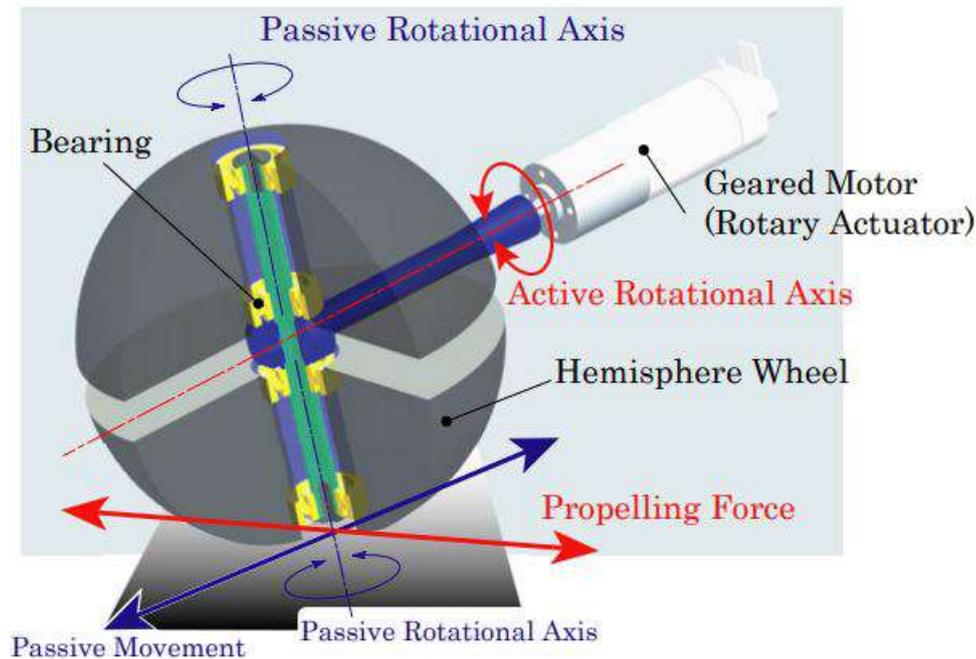


Abbildung 2.4: Struktur des „Omni-Ball“ [27]

Unabhängig davon, welche Kombination von Rädern verwendet wird, führt eine größere Anzahl an Rädern zu kinematischer Überbestimmtheit. Das bedeutet, dass bei unebenem Boden unter Umständen nicht alle Räder Kontakt zum Untergrund haben, was insbesondere dann zu Problemen führt, wenn sie unabhängig voneinander angetrieben sind [22]. Eine der einfachsten Lösungen die nötige Flexibilität zu gewährleisten besteht darin, das Rad selbst verformbar zu gestalten. Durch Anwendung weicher Materialien als Laufflächenbelag oder verformbarer Luftreifen, kann eine primitive Form der Federung gewährleistet werden. Bei stark unebenem Untergrund reicht diese Lösung allerdings nicht aus und ein Radaufhängungskonzept wird benötigt.

2.2.3 Radkonfigurationen

Im Gegensatz zu Fahrzeugen, die sich in einer hoch standardisierten Umgebung bewegen - im Falle von PKWs etwa das Straßenverkehrsnetz - beschränkt sich der Einsatzbereich

mobiler Roboter nicht immer auf solche. Abhängig von der Beschaffenheit des Untergrundes und den Bedingungen am Betriebsort, sind andere Räderanordnungen vorteilhaft. Die Art und Weise, in der die Räder eines mobilen Roboters angeordnet sind, hängt stark mit der Wahl der Radtypen zusammen und muss in Kombination damit ausgewählt werden. Es besteht eine Vielzahl an Möglichkeiten, die zur Verfügung stehenden Typen an Rädern in Antriebskonzepten zu positionieren. Einige der am häufigsten eingesetzten zeigt Abbildung 2.5.

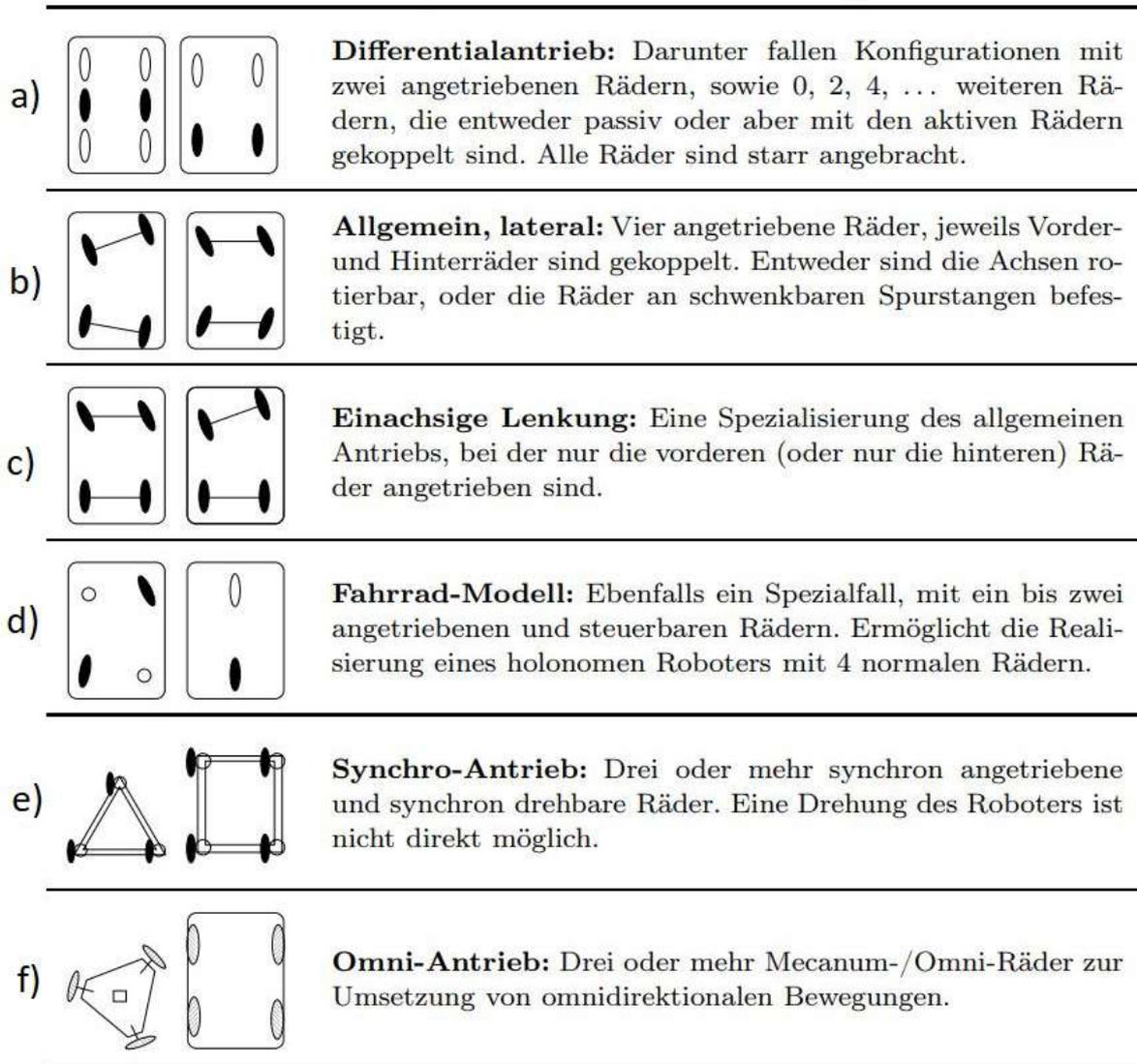


Abbildung 2.5: Einige gebräuchlichsten Radkonfigurationen (Auszug aus [22])

Der bei FTFs der Logistik weitverbreitete Differentialantrieb a), erreicht durch einzeln angetriebene Räder eine hohe Manövrierfähigkeit. Rotieren beide Antriebsachsen in die-

selbe Richtung, bewegt sich der Roboter vorwärts. Drehen sie in dieselbe Richtung aber unterschiedlich schnell, fährt er eine Kurve. Rotieren sie gegengleich, dreht sich das Fahrzeug am Stand. Um statische Stabilität zu gewährleisten, werden oft zusätzlich drehbare Stützrollen (vgl. Abb. 2.3 c)) eingesetzt.

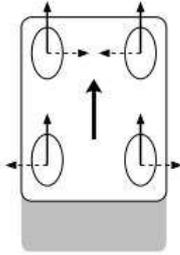
Gekoppelte Achsen b) und c) sind in nahezu allen Kraftfahrzeugen vertreten. Die Achsschenkellenkung (auch Ackermannantrieb - in 2.5 c) links), ist dabei bei Weitem die häufigste. Der Momentanpol des Fahrzeugs (der Punkt, um den das Fahrzeug rotiert) befindet sich im gemeinsamen Schnittpunkt der Radachsen. Während sich die Achsschenkellenkung bei Kraftfahrzeugen aufgrund des einfachen Aufbaus und des Bedarfs an lediglich einem einzigen Antriebsmotor etabliert hat, ist sie für die hohen Anforderungen an die Manövrierfähigkeit mobiler Roboter, insbesondere im Inneneinsatz, selten geeignet.

Antriebsräder, die um eine vertikal durch den Aufstandspunkt verlaufende Achse drehbar gelagert werden d), stellen eine der einfachsten Möglichkeiten dar, einen holonomen (omnidirektionalen) Antrieb zu realisieren. Mit einer Änderung der Fahrtrichtung geht dabei immer eine mechanische Rotation des gesamten Antriebsrades einher, was das Reaktionsvermögen beeinträchtigt und das Antwortverhalten auf Steuerungsbefehle verlangsamt.

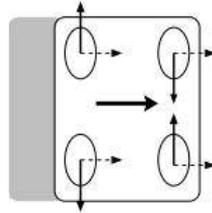
Um die Traktion zu verbessern können mehrere Antriebsräder eingesetzt, und durch einen Riemen synchron gegenüber dem Fahrwerk verdreht werden e). Üblich ist dann auch der gemeinsame Antrieb der Räder durch einen Motor, der mittels eines weiteren Riementriebs die Leistung auf die Antriebsräder verteilt. Werden die Räder unabhängig voneinander angetrieben und gelenkt, lässt sich der Roboter auch im Stillstand orientieren. Eine solche Antriebskonfiguration ist auch unter dem Titel „Swerve-Drive“ bekannt.

Abbildung 2.5 f) zeigt Konfigurationen mit speziellen, omnidirektionalen Rädern (vgl. Abb. 2.3 d) und e)). Jedes Rad verfügt über einen eigenen Antrieb. Durch Rotation in verschiedene Richtungen kann das Fahrzeug sofort in jede beliebige Richtung fahren. Wie die Drehrichtung von Mecanum-Rädern die Fahrtrichtung beeinflusst, wird in Abbildung 2.6 verdeutlicht.

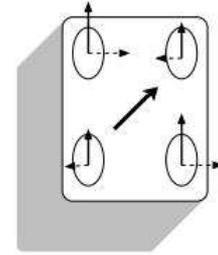
Die in 2.5 dargestellten Varianten unterscheiden sich in ihrer Stabilität, Manövrierfähigkeit und Steuerbarkeit, wobei sich die Manövrierfähigkeit und Steuerbarkeit üblicherweise negativ proportional zueinander verhalten. Das heißt eine Antriebskonfiguration



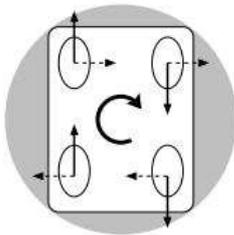
(a) *Geradausfahrt*: gleiche Drehrichtung aller Räder.



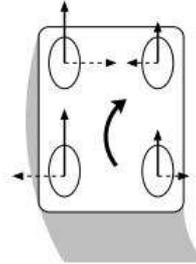
(b) *Seitwärtsfahrt*: Gegenläufige Bewegung benachbarter Räder.



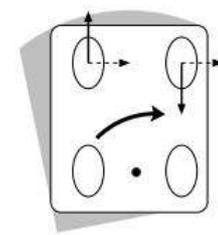
(c) *Diagonalfahrt*: Gleiche Bewegung zweier diagonaler Räder.



(d) *Drehung*: Gegenläufige Drehrichtung beider Seiten bei gleicher Geschwindigkeit.



(e) *Kurvenfahrt*: Geringere Geschwindigkeiten der Räder auf einer Seite.



(f) *Drehung um Achsenmittelpunkt*: Gegenläufige Bewegung der Räder einer Achse.

Abbildung 2.6: Antriebskonzept mit Mecanum-Rädern (Abbildung aus [22]) Die kleinen Pfeile zeigen die Drehrichtung der Räder, die gestrichelten die seitlichen Kräfte an den Rollen. Die mittigen, großen Pfeile stellen die resultierende Bewegungsrichtung des Fahrzeugs dar. Beliebige Bewegungen werden durch Überlagerung der dargestellten Manöver realisiert.

die Bewegung in mehreren Richtungen erlaubt, bedarf einer entsprechend aufwändigen Steuerung. Das verdeutlicht etwa das Beispiel der Geradausfahrt. Während bei der Einachsigen Lenkung c) nur die lenkbaren Räder fixiert werden müssen, und die angetriebene Achse vorwärts rotieren muss, um geradeaus zu fahren, bedarf es beim Differentialantrieb a) der synchronen Rotation beider Antriebsräder. Dabei müssen die beiden Motoren, die mit den angetriebenen Rädern verbunden sind, mit exakt dem selben Geschwindigkeitsprofil drehen, was eine erheblich komplexere Steuerung erfordert. Noch gravierender erscheint dieser Zusammenhang zwischen Manövrierfähigkeit und Steuer-

barkeit im Falle eines omnidirektionalen Antriebs, wie etwa der Konfiguration mit 4 Mecanum-Rädern f). Hier sind es sogar vier Achsen, die mit der selben Geschwindigkeit laufen müssen. Darüber hinaus haben omnidirektionale Konfigurationen üblicherweise einen höheren Freiheitsgrad der Räder. Das erhöht die Komplexität der Steuerung zusätzlich durch Schlupf und Verringerung der Genauigkeit [23].

Daher ist der Einsatz von Antrieben mit hoher Manövrierfähigkeit nur dann sinnvoll, wenn diese auch tatsächlich benötigt wird. Neben dem erhöhten Aufwand der Steuerungsarchitektur, fallen auch höhere Kosten durch die größere Anzahl an Antriebskomponenten (Motor, Getriebe etc.) an. Welches Antriebskonzept das richtige ist, hängt daher stark von der jeweiligen Situation ab.

2.3 Fahrerloses Transportsystem

Definitionen für die Begriffe „Fahrerloses Transportfahrzeug“ (FTF) und „Fahrerloses Transportsystem“ (FTS) werden in der VDI-Richtlinie 2510 gegeben. Demnach sind Fahrerlose Transportfahrzeuge (FTF) über einen eigenen Antrieb verfügende, flurgebundene Fördermittel die automatisch gesteuert werden. Sie dienen dem Transport von Materialien und dem Ziehen von Fördergütern unter Zuhilfenahme passiver Lastaufnahmemittel [28].

Dieselbe Richtlinie unterscheidet darüber hinaus zu Fahrerlosen Transportsystemen (FTS), die als innerbetriebliche Fördersysteme zum Materialtransport innerhalb und außerhalb von Gebäuden definiert werden. Ein FTS besteht aus den Komponenten:

- einem oder mehreren Fahrerlosen Transportfahrzeugen
- einer Leitsteuerung
- Einrichtungen zur Standortbestimmung und Lageerfassung
- Einrichtungen zur Datenübertragung
- Infrastruktur und peripheren Einrichtungen“

Als FTS bezeichnet man also die Einrichtung, die eine Flotte an fahrerlosen Transportfahrzeugen koordiniert. Im Unterschied zu einem autonomen mobilen Roboter, kann ein FTF nicht selbstständig agieren sondern benötigt eine zentrale Steuereinheit.

Die Definitionen stammen aus den 1990er Jahren. Seither haben FTS stark an Bedeutung zugenommen und immer mehr Anbieter solcher Systeme präsentieren neue Produkte. Diese tragen oft Bezeichnungen, die streng genommen nicht der VDI-Definition entsprechen, weshalb in den Jahren 2012/20 eine überarbeitete Version der Richtlinie 2510 veröffentlicht wurde, in der auf eine Definition von FTF verzichtet wird. Hierin wurde der Definitionsbereich auch auf Systeme für Dienstleistungsaufgaben, wie Überwachung oder Reinigung - auch in öffentlichen Bereichen - erweitert.

Ullrich et al. [29] gibt einen detaillierten Überblick über die Geschichte, Technologie, Anwendungsgebiete und Zukunft der Fahrerlosen Transportsysteme.



Abbildung 2.7: FTS in der Versuchshalle des Fraunhofer IML [30]

2.4 Mobiler Manipulator

Unter der Bezeichnung „mobiler Manipulator“ versteht man üblicherweise die Kombination aus einer selbstfahrenden Basis und einem darauf aufgesetzten Roboterarm.

Dabei dient die Basis nicht immer allein dazu, den Manipulator von einem Arbeitsplatz zum nächsten zu befördern, sondern kann auch den Roboterarm durch Repositionierung unterstützen, anstatt ihn lediglich an eine feste Position zu transportieren. Deshalb werden hohe Anforderungen an die Manövrierfähigkeit der mobilen Plattform gestellt.

Während die Vorteile der Unabhängigkeit und des erheblich gesteigerten Funktionsum-

fangs des Roboterarms durch Möglichkeit der räumlichen Navigation zuerst überwiegend erscheinen, entstehen durch die Kombination der Systeme mobile Plattform & Roboterarm auch einige Limitierungen, da sich die beiden Komponenten gegenseitig behindern. Dazu gehören unter anderem der Umstand, dass der Arm für präzise Arbeit eine große, stabile Basis benötigt, wohingegen die Manövrierfähigkeit der Basis steigt, je kleiner und leichter diese ist. Weiters stellt die Mobilität eines schweren, mit Werkzeugen ausgestatteten Roboterarmes ein großes Sicherheitsrisiko in der Interaktion mit Menschen dar, wodurch sich neue Gefahrensituationen ergeben, was höhere Anforderungen und Kosten der Sicherheitstechnik mit sich bringt.

Die Lösung dieser und weiterer Problemstellungen ist aktuelles Thema der Forschung in der mobilen Robotik.



Abbildung 2.8: Mobiler Manipulator „CHIMERA“ von Joanneum Research, bestehend aus den zwei Subsystemen mobile Plattform „MiR 100“ und Roboter „UR10“

2.5 Flexible Produktionsumgebung

Produktionsabläufe werden im Rahmen von Industrie 4.0 in zunehmendem Ausmaß digitalisiert. Eine organisationsübergreifende Vernetzung aller Systeme und Maschinen der Wertschöpfungskette ist dafür notwendig. Diese vernetzte Produktion ermöglicht die

Realisierung moderner Konzepte wie Losgröße 1 und Just-In-Time-Production [31].

Losgröße 1 bezeichnet eine kundenspezifische Sonderanfertigung. Die zu produzierende Anzahl an Produkten (Losgröße) wird auf 1 gesetzt, also auf eine Individualfertigung reduziert. Just-In-Time (bedarfssynchrone Produktion) bezeichnet eine Strategie, bei der das in der Produktion benötigte Material genau zu dem Zeitpunkt und in der Menge angeliefert wird, in der es gerade benötigt wird.

Darüber hinaus unterstützt die vernetzte Produktion die Verbesserung der Servicequalität und die Verfügbarkeit der Produktionsanlagen. Außerdem ermöglicht es die Anwendung der Predictive Maintenance, die für effizientere Wartung sorgt, indem datenbasierte Methoden eingesetzt werden, mit denen der Status der Produktionsanlagen analysiert werden kann um vorherzusagen, zu welchem Zeitpunkt Wartungsarbeiten durchgeführt werden sollten [31].

Eine vernetzte Produktion verlangt hochgradig flexible und anpassbare Systeme sowie Maschinen, um auch in dynamischen Umgebungen zuverlässig produzieren zu können [31].

2.6 Modularität

Die Modulbauweise (auch Baukastenprinzip) stellt eine Produktstrukturstrategie dar, bei der das Produkt aus individuellen Modulen zusammengesetzt wird. Durch die Kombination einzelner Module wird das Ziel verfolgt, die Erstellung verschiedener Produktvarianten zu ermöglichen [32]. Das soll für Flexibilität und Anpassungsfähigkeit sorgen und ebenso durch Möglichkeit des Outsourcing in der Entwicklung, Standardisierung der Herstellung und einfachere Wartung die Kosten senken.

Dabei ist Modularität eine graduelle Eigenschaft, die mit den Eigenschaften Kommunalität, Funktionsbindung, Entkopplung, Kombinierbarkeit und Schnittstellenstandardisierung beschrieben werden kann (vgl.[33]). Funktionen des Gesamtsystems werden zerlegt, strukturiert und auf die Module aufgeteilt. Zwischen den einzelnen Modulen befinden sich Schnittstellen, über die sie gekoppelt sind. Diese sollen im Sinne einer hohen Modularität so einheitlich wie möglich gestaltet werden, um die Variantenvielfalt zu maximieren.

2.7 Antrieb

Bei der Bewegung eines mobilen Roboters wirken physikalisch bedingte Widerstände, die je nach Bauart variieren können. Damit der Bewegungszustand eines Fahrzeugs geändert werden kann, muss es beschleunigt werden. Dafür ist das Wirken einer Kraft notwendig - es muss also mechanische Arbeit verrichtet werden. Dafür wird üblicherweise ein Motor eingesetzt. Von der Vielzahl an entwickelten Motoren ist im Inneneinsatz der Elektromotor bei weitem am Verbreitetsten. Im Outdoorbereich werden außerdem Verbrennungsmotoren eingesetzt, die allerdings meist dieselhydraulisch oder dieselekttrisch arbeiten. Sie treiben das Fahrzeug nur indirekt an, indem ein Hydrauliksystem mit Druck versorgt, beziehungsweise ein Generator angetrieben wird, der dann seinerseits elektrische Energie für den Antrieb mit Elektromotor bereitstellt [29]. Die für die Robotik interessanten Motorvarianten werden in Kapitel 2.7.1 vorgestellt.

Um die an der Motorwelle verfügbare Drehzahl, beziehungsweise das verfügbare Drehmoment auf die für die Bewegung notwendigen Werte zu wandeln, kann eine Getriebeübersetzung erforderlich sein. Kapitel 2.7.2 gibt einen Überblick der Möglichkeiten hierzu.

2.7.1 Motor

Die in der Robotik dominante Arbeitsmaschine ist der Elektromotor. Er verfügt über essentielle Eigenschaften, die ihn gegenüber anderen Motorvarianten hervorheben. Elektromotoren arbeiten emissionsfrei, was sie für den Betrieb im Innenbereich ideal macht. Sie haben auch im Teillastbetrieb einen hohen Wirkungsgrad, was besonders in mobilen, batteriebetriebenen Anwendungen wichtig ist. Das Drehmoment wird kontinuierlich abgegeben, sie sind platzsparend (hohe Leistungsdichte) und haben niedrige Wartungskosten.

Innerhalb der Gruppe der Elektromotoren gibt es unterschiedliche Bauweisen und Funktionsprinzipien. Drei der für die Robotik wichtigsten sind der Gleichstrommotor, der bürstenlose Gleichstrommotor und der Schrittmotor.

Das zugrunde liegende Prinzip beruht bei allen Elektromotoren auf der Erzeugung von Magnetfeldern und der Nutzung deren anziehender und abstoßender Kräfte. Alle drei Varianten bestehen aus einem stillstehenden Stator und einem drehbar gelagerten Rotor. Sowohl Stator als auch Rotor sind mit Magneten ausgestattet, die sich gegenseitig so anziehen beziehungsweise abstoßen, dass daraus eine Drehbewegung des Rotors resultiert.

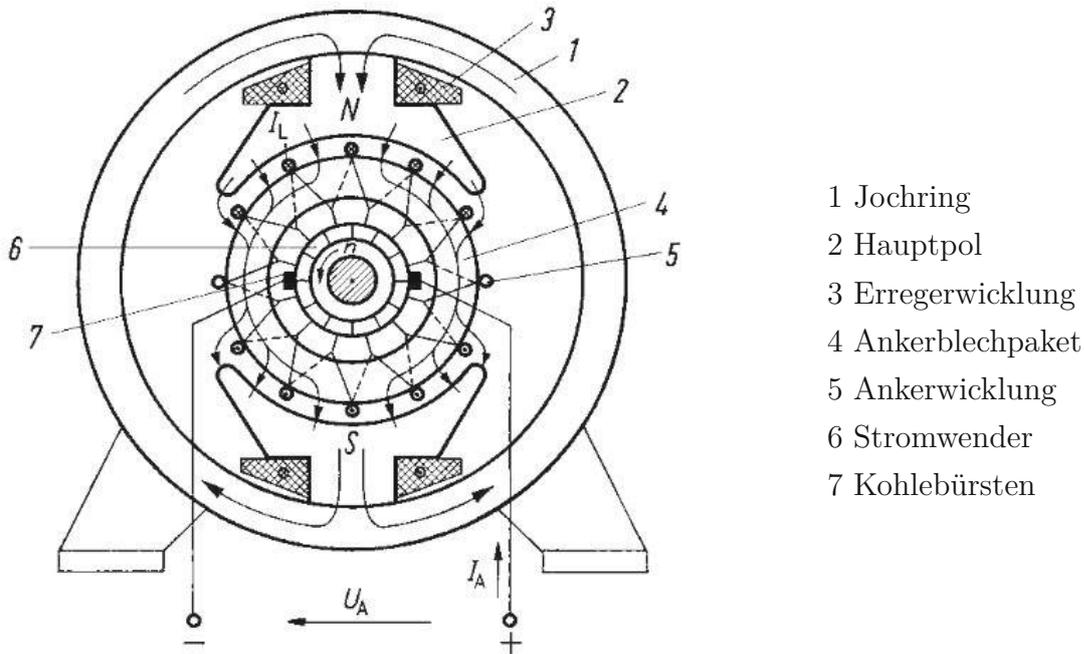


Abbildung 2.9: Prinzipieller Aufbau einer Gleichstrommaschine [34]

Im Falle eines Gleichstrommotors besteht der Stator aus mehreren Magneten, die entweder als Permanentmagnete (permanentenerregter Gleichstrommotor) oder als Elektromagnete (elektrisch erregter Gleichstrommotor) ausgeführt sein können. Sie erzeugen ein Magnetfeld, das auch Erregerfeld genannt wird. Auf dem Rotor sind Spulen platziert, die von elektrischem Strom durchflossen werden. Durch die Lorentzkraft erfährt der Rotor ein Drehmoment. Die Wicklungen des Rotors werden dabei über einen „Kommutator“ angeschlossen, der mit Schleifkontakten ausgestattet ist. Dadurch wechselt während der Drehung die Polung der Rotorwicklung so, dass immer die sich quer zum Erregerfeld bewegendenden Wicklungen durchflossen werden. Durch den mechanischen Kontakt der Schleifkontakte (Bürsten) kommt es selbst bei verschleißarmen Materialien zu Abnutzung, was einen wesentlichen Nachteil von Gleichstrommotoren gegenüber anderen darstellt.

Im Unterschied zum Gleichstrommotor, wird der Rotor bei Synchronmotoren von einem magnetischen Drehfeld im Stator mitgenommen. Er läuft dabei mit einer Wechselspannung synchron mit, was bedeutet, dass die Drehzahl von der Frequenz der Wechselspannung

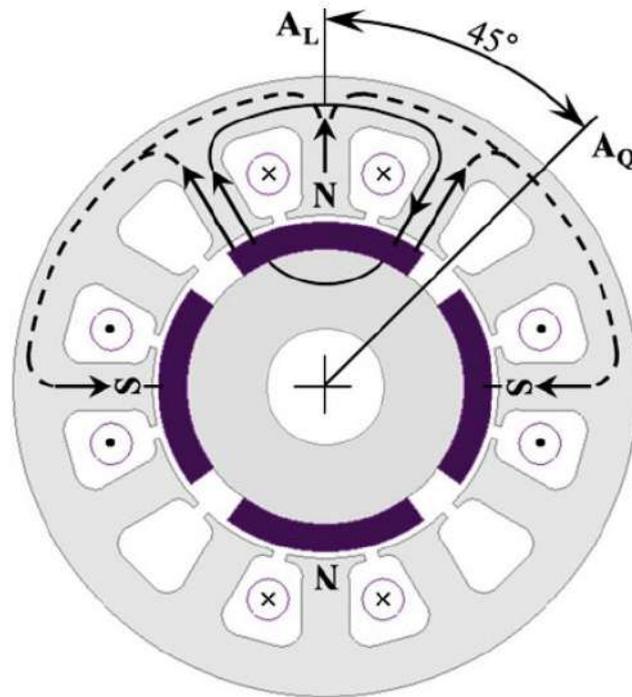


Abbildung 2.10: Vereinfachte Schnittzeichnung eines vierpoligen elektronisch kommutierten Gleichstrommotors (BLDC). A_L momentane Läuferachse, A_Q momentane Achse des Ständer-Querfeldes, schwarz Dauermagnete [34]

nung abhängt. Wird der Rotor als Permanentmagnet ausgeführt und das Drehfeld über eine gleichstromgespeiste Regelschaltung gesteuert, spricht man von einem „bürstenlosen Gleichstrommotor (BLDC)“. Die Notwendigkeit von Schleifkontakten fällt durch den permanenterregten Rotor weg. Der Permanentmagnet wird dabei häufig aus einer Neodym-Eisen-Bor Legierung hergestellt, die sich aufgrund ihrer Kristallstruktur besonders gut eignet. Einer der Rohstoffe, das Neodym, zählt zu den seltenen Erden, deren Abbau negative Umwelteinflüsse verursacht [35]. BLDCs sind in Automatisierungsanwendungen wie der industriellen Robotik weit verbreitet, da sie sich durch ihre Wartungsfreiheit und kompakte Bauform auszeichnen. Obwohl sie im Vergleich zu den bürstenbehafteten Gleichstrommaschinen derzeit noch teurer sind, ist eine Nivellierung der Preise zu bemerken.

Eine weitere Bauform der Synchronmaschine ist der Schrittmotor. Er verfügt über ausge-

prägte Ständerpole, deren Wicklungen zyklisch angesteuert werden, wodurch ein sprungförmig, beziehungsweise schrittweise umlaufendes Magnetfeld entsteht, dem der Läufer immer um einen Schritt folgt. Der wesentliche Vorteil besteht darin, dass durch die diskrete Positionierung, eine zusätzliche Regelung der Läuferstellung entfällt [34].

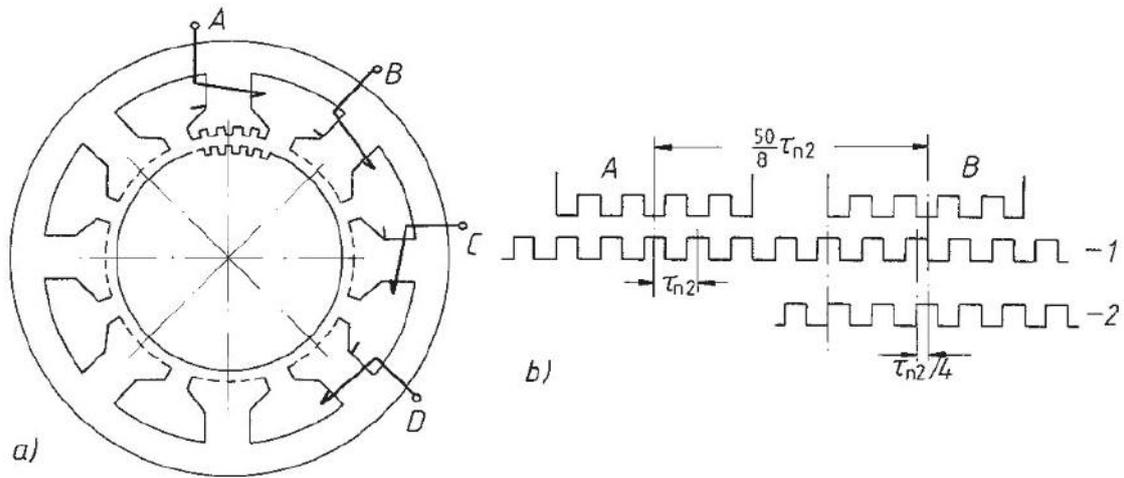


Abbildung 2.11: Schrittmotor mit gezahnten Ständerpolen, Schrittwinkel $\alpha = 1,8^\circ$

a) Aufbau von Ständer und Läufer

b) Läuferzahnstellung vor (1) und nach (2) einem Schritt [34]

Andere Motorbauformen benötigen üblicherweise einen Sensor, der eine Positionsrückmeldung gibt. Der Soll- und Istwert der Position werden dann abgeglichen und eine entsprechende Regelung folgt. Diese Kombination aus einem Motor und einem Sensor zur Positionsbestimmung heißt Servomotor. Die als Servoregler bezeichnete Regelelektronik liegt normalerweise außerhalb des Motors und ihre Kombination mit einem Servomotor trägt den Namen Servoantrieb. Die Regelkreise können basierend auf dem Moment, der Drehzahl oder der Position, beziehungsweise verschachtelt ausgeführt sein, was die Anpassung an unterschiedlichste Anwendungen ermöglicht.

2.7.2 Getriebe

Elektrische Maschinen haben im Unterschied zu Verbrennungskraftmaschinen den Vorteil, dass sie, mit Hilfe der Leistungselektronik, in einem weiten Drehmoment- und Drehzahlbereich betrieben werden können. Dennoch gibt es gewisse technische Grenzen, die

den Betriebsbereich limitieren. Sowohl für die maximale Drehzahl als auch für das maximale Drehmoment existieren obere Grenzen. Bei elektrischen Positionierungssystemen für Robotikanwendungen ist oft das höchste Drehmoment ausschlaggebend. Bei permanenten Synchronmaschinen bezeichnet man das Lastmoment, welches bei Nennspannung den Stillstand der Welle bewirkt als Haltemoment. Wird ein Schrittmotor überhalb des Haltemomentes belastet und so aus dem Statorfeld gedreht, springt er bis zur nächsten magnetischen Ruhelage zurück.

Dieses Haltemoment, das durch den Maximalstrom begrenzt wird, kann vom Motor nicht überschritten werden. Soll ein Betriebspunkt des Antriebs angefahren werden, dessen Drehmoment sich überhalb des Haltemomentes befindet, muss zwischen Motorwelle und Abtrieb ein Getriebe eingesetzt werden. Der Fall, in dem die maximale Drehzahl des Motors nicht ausreicht, kommt bei üblichen Anwendungen und Motorbauweisen eher selten vor.

Das Getriebe wird also eingesetzt, um das Drehmoment auf den benötigten Wert zu wandeln. Dafür können unterschiedliche konstruktive Lösungen zum Einsatz kommen. Die für Antriebe der mobilen Robotik relevanten werden hier vorgestellt.

Nabengetriebe sind bei Antrieben für fahrerlose Transportfahrzeuge weit verbreitet (vgl. Abb. 2.12). Sie werden oft als ein- oder zweistufige Planetengetriebe ausgeführt und zeichnen sich durch Kompaktheit, wegen Integration in das Laufrad aus und werden daher auch oft in Kombination mit dem Laufrad angeboten.

Planetengetriebe sind in der Antriebstechnik nicht nur in Ausführung als Nabengetriebe verbreitet. Auch Varianten mit Abtriebswelle oder Abtriebsflansch sind weitreichend verfügbar und stellen unkomplizierte Komplettlösungen für die Antriebsauslegung dar (vgl. Abb. 2.13). Vorteilhaft erweist sich dabei das Vorhandensein von herstellerseitigen Datenblättern, die Spezifikationen bezüglich der zulässigen Belastungen angeben, was den Rechenaufwand in der Auslegung verringert. Erhältlich sind diese Ausführungen in zahlreichen Übersetzungsverhältnissen und Baugrößen. Problematisch kann sich jedoch die Montage erweisen, da die Befestigungsbohrungen beziehungsweise Eingangswellendurchmesser keiner Normung unterliegen. Einige Getriebehersteller bieten dafür Adapterplatten an, die zwischen Motor und Getriebe verbaut werden. Viele Motorenhersteller der Roboter- und Automatisierungstechnik produzieren zu ihren Motoren kompatible Getriebe und erlauben die Auslegung von Motor-Getriebe Kombinationen in eigenen online Berechnungstools. Derartige Getriebeauslegungen stellen nicht unbedingt die günstigsten Varianten dar, sind aber für Anwendungen, in denen die Minimierung des



Abbildung 2.12: Nabengetriebe für FTF [36]

Volumens der Antriebskomponenten vorrangig ist, eine der praktikablesten Alternativen.

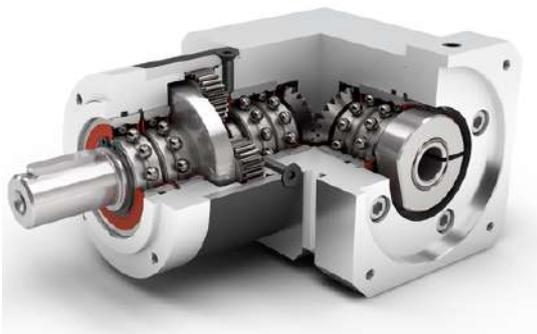
Neben dem Einbau eines vollständigen Getriebes, besteht auch die Möglichkeit eine individuelle Konstruktion zu entwerfen. Mit Komponenten der Antriebstechnik lässt sich eine Vielzahl von Getriebevarianten realisieren. Mitunter kommen dabei Zahnriemen, Keilriemen, Stirnräder, Kegelräder und Schneckengetriebe zum Einsatz. Durch entsprechende Wahl der Komponenten lassen sich nahezu beliebige Übersetzungsverhältnisse erreichen. Abhängig vom zur Verfügung stehenden Bauraum und vom Winkel zwischen Antrieb- und Abtriebsachse sind unterschiedliche Konstruktionen notwendig. Dem preislichen Vorteil und der vergrößerten Flexibilität solch einer individuellen Getriebelösung stehen der Mehraufwand in der Planung, Konstruktion, Berechnung und Montage gegenüber. Einen Einblick in die Möglichkeiten der Getriebetechnik und damit verbundene Berechnungsverfahren gibt [38, Kapitel 16,17,20-24].



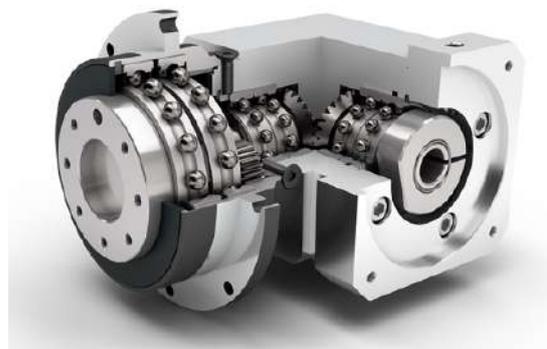
(a) Planetengetriebe mit Abtriebswelle



(b) Planetengetriebe mit Abtriebsflansch



(c) Winkelplanetengetriebe mit Abtriebswelle



(d) Winkelplanetengetriebe mit Abtriebsflansch

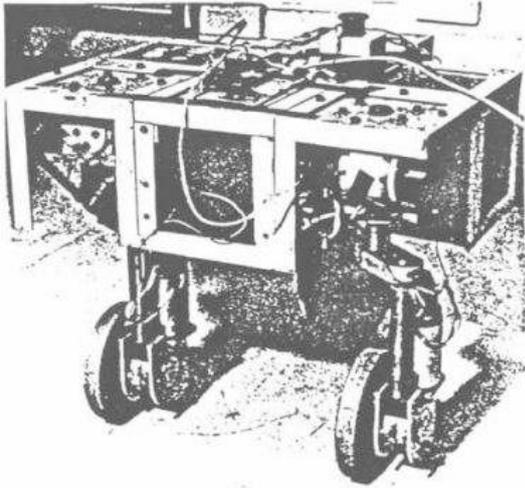
Abbildung 2.13: Unterschiedliche Bauweisen von Planetengetrieben (Neugart GmbH) [37]

3 Stand der Technik

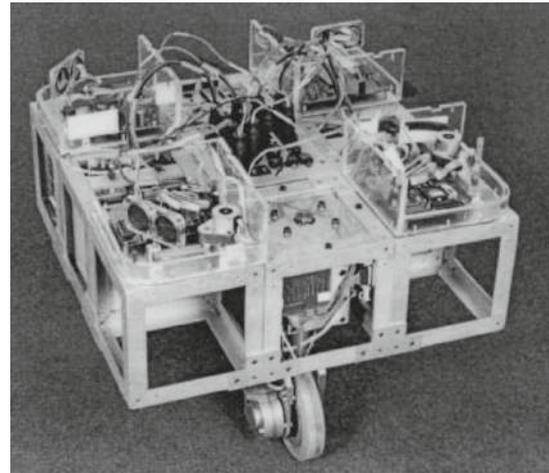
Dieses Kapitel soll einen Überblick über einige vorgestellte Konzepte, modular aufgebauter mobiler Roboter geben, mit speziellem Fokus darauf, wie der Antrieb jeweils ausgeführt ist.

3.1 Oxford Navigator - Modular Wheeled Mobile Robot

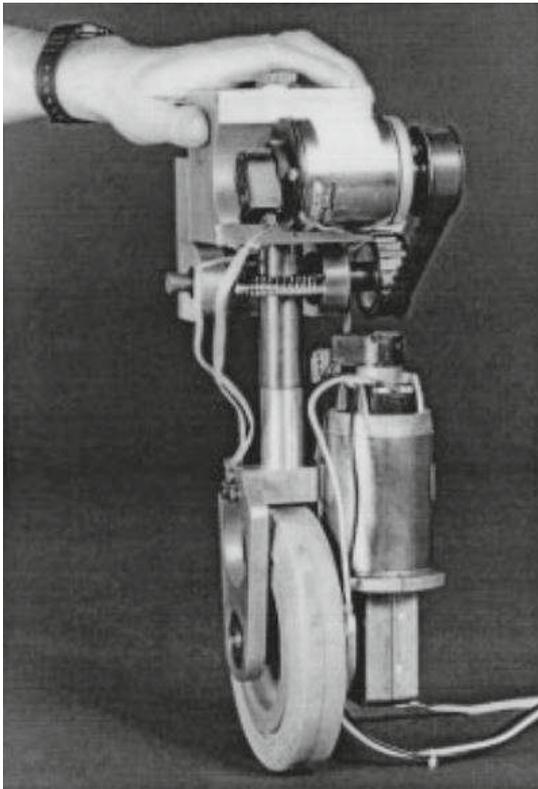
Eines der ersten vorgestellten Konzepte modularer mobiler Roboter entstand bereits in den 1990er Jahren an der Universität Oxford [39]. Durch standardisierte Komponenten wurde ein modulares Fahrzeug aufgebaut, in dem jedes Modul eine spezifische Aufgabe erfüllt, etwa Sensorik oder Antrieb. Die Antriebseinheit war in Form eines Swerve-Drive aufgebaut und war ein Vorreiter zahlreicher Nachfolger. Heutige Swerve-Drive Einheiten unterscheiden sich im Funktionsprinzip kaum von der von Burke und Durrant-Whyte konzipierten Variante (siehe Abb.3.1).



(a) Oxford Navigator JMR 1 - ein in Oxford gebauter modularer mobiler Roboter [39]



(b) Komplette Version des Oxford WMR samt Sensoren [40]



(c) Die Antriebseinheit des Oxford WMR - „Driven and Steered Unit (DSU)“ [40]



(d) Ein modernes serienmäßiges Modul „MK4 Swerve-Drive-Module“ der Firma „Swerve Drive Specialities“

Abbildung 3.1: Modularer Mobiler Roboter mit Swerve-Drive der Oxford University

3.2 Vierradantriebe

Crenanis et al. [41] legten ein Konzept eines vierrädrigen mobilen Roboters vor, bei dem alle Räder über einen eigens gesteuerten Antrieb verfügen. Die Rekonfigurierbarkeit ergibt sich durch die Möglichkeit des Antriebs, Mecanum-Räder anstelle der klassischen Räder aufzunehmen. Der Aufbau beinhaltet eine gemeinsame Chassisplatte, an der die vier Antriebe befestigt sind und dadurch einen fixen, unabänderlichen Abstand zueinander haben.

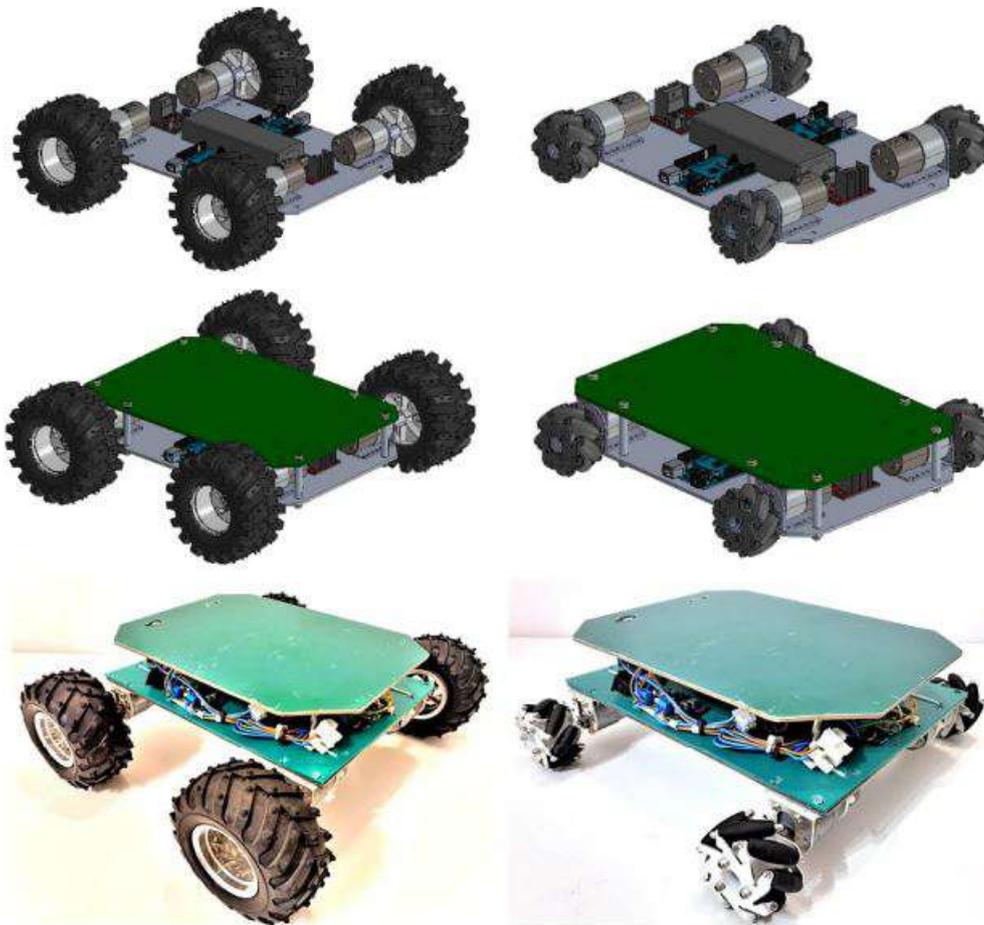
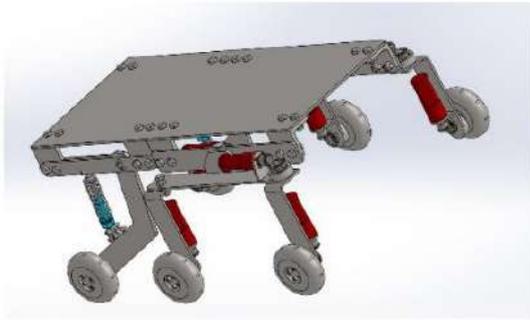


Abbildung 3.2: Mobiler Vierrad-Roboter, entstanden 2021 an der Maschinenbaufakultät der Universität Sibiu [41]

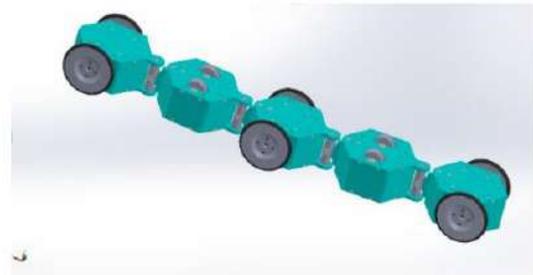
3.3 Modulare Konzepte für Antriebe von „all-terrain“ Robotern

Zwei 2021 vorgeschlagene Konzepte von Pecie et al. [42] behandeln modulare Hybridantriebslösungen. Um den Einsatz mobiler Roboter in unwegsamem Gelände zuverlässiger zu machen, werden hybride Antriebskonzepte in Betracht gezogen, die Räder, Beine und Ketten kombinieren. Es wird zum einen eine Kombination aus Rädern und Beinen vorgestellt, die über aktive und passive Federung verfügt (Abb.:3.3a).

Zum anderen beinhaltet die Veröffentlichung ein Konzept sequentiell angeordneter aktiver oder passiver Module hexagonaler Form, die durch Kugelgelenke verbunden sind. Das System ist dadurch - abhängig von der Konfiguration - in der Lage, Hindernisse verschiedener Größenordnungen zu überwinden (Abb.:3.3b).



(a) Konzept eines Hybridantriebs mit Beinen und Rädern [42]



(b) Konzept eines Antriebs mit hexagonalen Modulen [42]

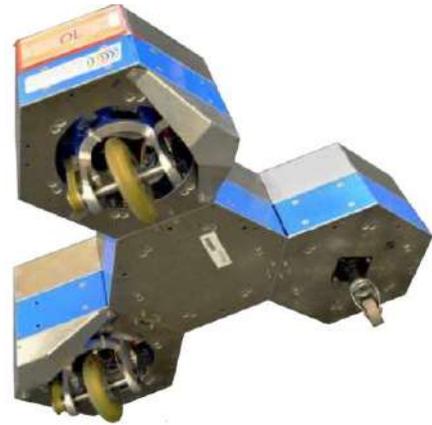
3.4 Rekonfigurierbare Wabenroboter

Zwei weitere Veröffentlichungen im Bereich der modularen mobilen Robotik setzen auf standardisierte Modulformen - wie hier etwa Prismen mit hexagonalen Grundflächen. Der „Mobile Wabenmanipulator“ der steirischen Forschungsgesellschaft Joanneum Research (siehe Abb. 3.4) kann mit verschiedenen Antriebsmodulen betrieben werden, die sich durch ihre Radtypen unterscheiden. Die Radachse befindet sich dabei stets unterhalb der Gehäuseunterkante.

An der Universität Politehnica in Bukarest wurde ein ähnliches Konzept vorgestellt, bei dem die Räder jedoch an den Seitenflächen des hexagonalen Prismas angebracht sind (Abb. 3.5). Durch den im Vergleich zum „Wabenmanipulator“ niedrigeren Schwerpunkt verbessert sich die Stabilität - jedoch auf Kosten der Rekonfigurierbarkeit, nachdem, abhängig vom Raddurchmesser, an den benachbarten Seitenflächen keine weiteren Module angebracht werden können.



(a) Konfiguration mit Mechanum-Rädern [43]



(b) Konfiguration mit zwei angetriebenen, drehbaren Rollen (Swerve-Drive) und einer Stützrolle [44]

Abbildung 3.4: Der Mobile Wabenmanipulator von Joanneum Research



(a) Konfiguration mit Differentialantrieb - Zwei Antriebsräder und zwei Stützrollen



(b) Konfiguration mit Mechanum Rädern



(c) Konfiguration mit Omni-Wheels

Abbildung 3.5: Der Modulare Roboter der Universität Politehnica Bucharest [45]

4 Methodische Entwicklung eines Antriebsmoduls

Die Konzepterstellung eines Antriebsmoduls ist eine Aufgabe, die sowohl logische als auch kreative Komponenten beinhaltet und erfordert methodische Vorgehensstrategien. Im Rahmen der Entwicklung wird eine Vorgehensweise nach dem V-Modell in Anlehnung an die von Pahl [9, S.70] vorgeschlagene Konstruktionsmethodik verwendet, um am Ende ein Produkt zu erhalten, das den Anforderungen und Erwartungen gerecht wird. Die Entwicklung erfolgt strukturell, gemäß den vier *Hauptphasen des Produktentwicklungsprozesses* nach [9] entsprechend Abbildung 4.1.

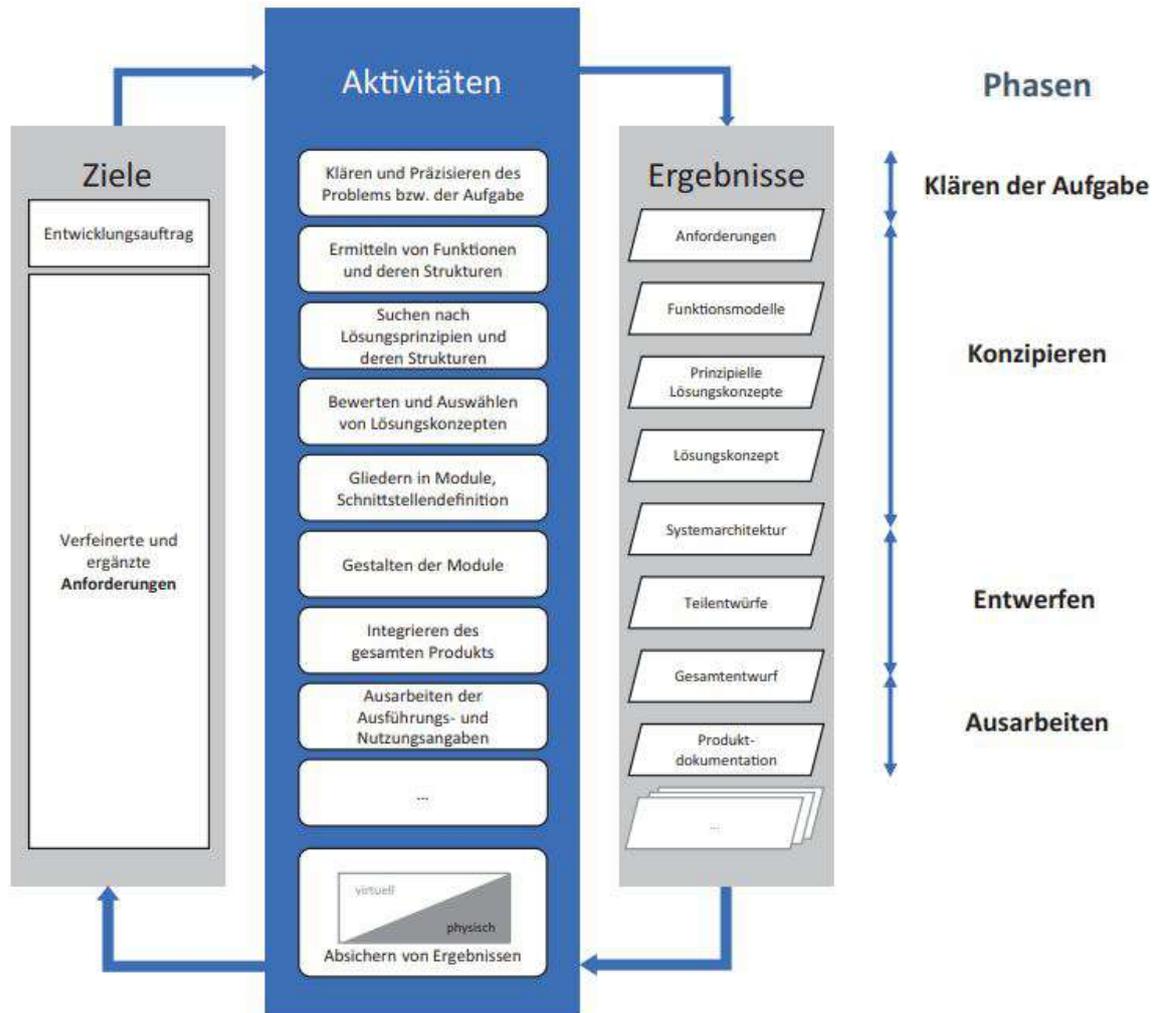


Abbildung 4.1: Vorgehensmodell des Produktentwicklungsprozesses nach [9]

4.1 Klären der Aufgabe

Die Festlegung dieser Anforderungen sowie das Aufzeigen von Rand- und Anfangsbedingungen erfolgt in der ersten Phase der Produktentwicklung (siehe Abb.4.1) - dem *Klären der Aufgabe*. Sie bildet die Basis der nachfolgenden Entwicklungs- und Konstruktionsarbeiten. Das Ergebnis ist die Festlegung einer Liste, die quantifizierbare Aussagen über Gesamt- und Teilziele des Produktes macht. Diese Anforderungsliste muss stets auf dem neuesten Stand gehalten werden, da sie für die Konzeption der weiteren Arbeiten von zentraler Bedeutung ist [9, S.67].

Je detaillierter die Ziele und je enger die Wertebereiche der quantifizierbaren Auslegungs-

größen gesetzt werden, desto kleiner ist der Raum der möglichen Lösungen. Zusätzliche Anforderungen können im Laufe der Entwicklung hinzugefügt werden. Die Adaption von bestehenden ist ebenfalls möglich.

Für das Projekt der Entwicklung eines neuen modularen mobilen Manipulators, für den im Rahmen dieser Arbeit ein Antriebsmodul konzipiert wird, entstand in der Planungsphase eine Anforderungsliste. Die darin verzeichneten Ziele wurden bewusst so gewählt, dass die Kreativität der Konstrukteure nicht gehemmt wird, aber dennoch ein Produkt entstehen kann, das den Vorstellungen bezüglich Größe und Funktionsumfang weitestgehend entspricht. Anhand eines Auszugs der Werte aus dieser Anforderungsliste, die für die Entwicklung des Antriebs von Bedeutung sind (siehe Tabelle 4.1), sollen nun die aufgelisteten Größen diskutiert werden. Diese sind, insbesondere für den Prototypenbau, keineswegs als unantastbar zu verstehen, sondern vielmehr als Richtwerte, die möglichst genau, aber ohne Kompromittierung beziehungsweise Einschränkung der Konstruktionsfreiheit, eingehalten werden sollten.

| | |
|-------------------------|---------------------------------|
| Geschwindigkeit | 1.5 m/s |
| Beschleunigung | 1 m/s^2 |
| Eigengewicht | 40 kg |
| Tragfähigkeit | 100 kg |
| Überfahrbare Stufenhöhe | 20 mm |
| Maximalsteigung | 6 % |
| Modulabmessungen | Würfel mit Kantenlänge 160 mm |

Tabelle 4.1: Vorläufige Anforderungen an den Antrieb - Auszug aus der Anforderungsliste des Projekts TURBO der TU Wien

4.1.1 Quantifizierbare Anforderungen

Die *Geschwindigkeit* beschreibt die Strecke, die der Roboter pro Sekunde zurücklegen können soll. Sie stellt ebenso eine Bedingung für die Auslegung des Antriebsstrangs dar, wie eine Obergrenze aus Gründen der Sicherheit. Zu hohe Geschwindigkeiten können bei mobilen Robotern insbesondere dann leichter zu Unfällen führen, wenn sie in einer Umgebung mit Menschen eingesetzt werden. Ob der Wert von 1.5 m/s nur auf ebener Strecke oder auch auf Steigungen erreicht werden muss, wurde vorab nicht festgelegt.

Die *Beschleunigung* stellt eines der wesentlichen Kriterien für die Dimensionierung der Komponenten des Antriebs dar. Neben dem Steigungswiderstand ist der Beschleunigungswiderstand eine der wesentlichen Kräfte, die dem Antrieb entgegenwirken. Weitere Erläuterungen bezüglich der Widerstände und deren Auswirkungen folgen im Zuge der Antriebsauslegung in Kapitel 6.

Ebenso wie der Wert der Geschwindigkeit, stellt auch die Beschleunigung einen Wert dar, der aus sicherheitstechnischen Gründen nicht überschritten werden soll. Obwohl steuerungsseitig eine Obergrenze für kinematische Größen gesetzt werden kann, kann es dennoch aus Gründen der Kosten und Kompaktheit ratsam sein, in der Auslegung nicht zu weit überhalb dieser Werte abzu zielen.

Der Betrag der Beschleunigung beschränkt sich hierbei auf positive Werte, das heißt auf Erhöhen der Geschwindigkeit. Für das Verzögern ist aus Sicherheitsgründen eventuell zusätzlich ein Bremssystem vorzusehen.

Das *Eigengewicht* des Roboters ist zwar nicht ausschließlich vom Antrieb abhängig, stellt aber jedenfalls einen wichtigen Wert für die Berechnungen in der Auslegung dar. Hierbei ist anzumerken, dass insbesondere dieser Wert stark von der tatsächlichen Ausführung der Module des Roboters abhängt. Er wurde deshalb konservativ geschätzt. Aus dynamischer Sicht ist eine geringe Masse vorteilhaft, da sowohl der Beschleunigungswiderstand als auch - im Falle von Rädern - der Rollwiderstand linear damit wächst. Hingegen ist für die Genauigkeit eines eventuell aufgestzten Roboterarms eine stabile Basis von Vorteil. Diese negative Interaktion der Subsysteme mobiler Manipulatoren hat zur Folge, dass ein sinnvoller Kompromiss in der Gesamtmasse getroffen werden muss.

Die *Tragfähigkeit* bezeichnet die Masse der zusätzlichen Beladung, die zusammen mit dem Eigengewicht, das Gesamtgewicht des Roboters ausmacht. Zu berücksichtigen sind dabei, dass die, sowohl im Stillstand als auch in der Bewegung, wirkenden Kräfte von der Struktur des Roboters aufgenommen werden müssen. Die resultierende Gewicht-

kraft muss über die mit dem Untergrund in Kontakt stehenden Bauteile in den Boden eingeleitet werden können, ohne dass dabei ein Bauteil versagt. Zusätzlich wirkt sich die Gesamtmasse, wie erwähnt, stark auf die Bewegungswiderstände aus.

Die Fähigkeit der Überwindung von Stufen mit einer vorgegebenen maximalen *Kantenhöhe* stellt eine der interessantesten Anforderungen an den Roboter dar. Unterschiedliche Bewegungskonzepte müssen im Bezug auf dieses Kriterium analysiert werden. Kanten stellen naturgemäß Probleme für mobile Roboter mit Rädern dar, während andere Konzepte - etwa mit Beinen oder Ketten - besser dafür geeignet sind.

Die maximale *Steigung* bedeutet, dass auch Niveauunterschiede überwunden werden müssen. Neben dem auftretenden Steigungswiderstand, der seine Ursache in der Gewichtskraft hat, können geneigte Ebenen für manche Konzepte Stabilitätsprobleme verursachen beziehungsweise kann eine Neigung des Roboters eventuell den Funktionsumfang einschränken. Wie gut unterschiedliche Konzepte für eine Bewegung auf ansteigendem Untergrund geeignet sind, kann ein Entscheidungskriterium sein.

Im Zuge der Erstellung eines Gesamtkonzeptes für den mobilen Manipulator [17], fiel die Wahl der Modulform auf eine Kombination aus Würfeln und Quadern, wobei die quaderförmigen Module geometrisch zwei aneinandergereihten Würfeln entsprechen. Diese Module sollen ein Baukastensystem darstellen, das aufgrund der vereinheitlichten Moduldimensionen stark rekonfigurierbar ist.

Die *Herstellungskosten* stellen wie bei fast allen technischen Produkten ein Kriterium dar. Für den Prototypenbau sind dabei primär die Anschaffungskosten der Bauteile relevant, da Fertigungsmöglichkeiten intern vorhanden sind. Als Projekt mit hoher studentischer Beteiligung bestehen Sponsoringverträge mit kooperierenden Unternehmen und sind auch zukünftig weiter in Aussicht zu stellen. Wann immer möglich und sinnvoll, soll auf Komponenten zurückgegriffen werden, die über diese Quellen erhältlich sind.

4.1.2 Nichtquantifizierbare Anforderungen

Zusätzlich zu diesen numerisch quantifizierbaren Anforderungen, bestehen noch einige weitere Anforderungen an den Roboter als Gesamtsystem, beziehungsweise den Antrieb, die von Bedeutung sind.

Die *Modularität* ist der übergeordnete Grundgedanke und definiert die Systemarchitektur. Bei hoher Modularität werden die Abhängigkeiten der einzelnen Komponenten

gering gehalten und die Interaktionen über standardisierte Schnittstellen koordiniert. Das Konzept und die Konstruktion des Antriebsmoduls darf dies nicht beeinträchtigen. Es muss möglich sein, die Anzahl und Positionierung der Antriebsmodule innerhalb der Gesamtkonfiguration zu variieren.

Eine gute *Wartbarkeit* des Systems bedeutet, dass alle Komponenten, insbesondere jene, die als fehleranfällig gelten, gut zugänglich sind, um einen raschen, unkomplizierten Austausch oder Reparatur zu ermöglichen. Das heißt einerseits, dass in der Konstruktion auf die Positionierung der Bauteile zu achten ist, und andererseits, dass schon bei der Auswahl der verwendeten Komponenten die Verfügbarkeit und Einfachheit der Montage bedacht werden muss. Außerdem ist das Vorhandensein von Ersatzteilen sowie gegebenenfalls technischen Kundendienstleistungen für eine leichte Wartbarkeit zuträglich.

Ein breites *Anwendungsgebiet* für ein weites Spektrum an Einsatzszenarien ist einer der Kernpunkte jedes modularen Systems. Die Vielseitigkeit und Anpassbarkeit des Antriebs haben großen Einfluss auf die Anzahl an Orten, an dem der Roboter eingesetzt werden kann. Bei jeder Entscheidung, die bei der Entwicklung getroffen wird, muss überlegt werden, wie sie sich auf dieses Kriterium auswirkt. Im speziellen muss die Verwendung von Komponenten, die schwer austauschbar, aber für die Funktion essenziell sind vermieden werden, wenn sie nur für eine bestimmte Einsatzumgebung konzipiert sind.

Eine hohe *Zuverlässigkeit* sorgt dafür, dass das System besser nutzbar ist. Sie gibt an, wie verlässlich ein technisches Produkt die ihm zugewiesene Funktion erfüllt und kann auch als niedrige Ausfallwahrscheinlichkeit aufgefasst werden. Demnach soll im Sinne einer hohen Zuverlässigkeit auf Konstruktionen oder Bauteile verzichtet werden, die funktional nicht robust sind.

5 Konzeptphase

Die Konzeptionsphase folgt auf das Klären der Aufgabenstellung und erfolgt durch das Abstrahieren auf das Wesentliche, das Ermitteln der Funktionen sowie der Suche nach möglichen Lösungsprinzipien. Diese werden anschließend beurteilt und mittels eines Verfahrens bewertet und aufgrund dessen wird das zu verfolgende Konzept ausgewählt.

5.1 Abstraktion

Sinn der Abstraktion ist es, den Wesenskern der Aufgabe zu identifizieren. Durch Weglassen von Vorfixierungen wird der Lösungsraum erweitert. Man sieht vom Individuellen ab, und versucht das Allgemeingültige und Wesentliche zu ermitteln. Erst dann wird die Gesamtfunktion und die problemkennzeichnenden Bedingungen erkennbar [9, S.234].

Im Falle der vorliegenden Aufgabe ist die Frage zu stellen, was denn tatsächlich der Kern des zu lösenden Problems ist. Eine Formulierung könnte lauten:

Die Erstellung eines in vorgegebener Form eingebetteten Systems, das die Bewegung eines damit verbundenen Roboters ermöglicht.

Durch eine solch allgemeine Beschreibung wird klar, dass sich mögliche Lösungen nicht auf das Bekannte beschränken müssen. Eine Bewegung von A nach B kann auf zahlreiche verschiedene Arten bewerkstelligt werden. Naheliegenderweise denkt man dabei zuerst an Räder und Motoren, weil aufgrund der Erfahrung solche Systeme in den Sinn kommen. Sieht man aber über diesen dogmatischen Ansatz hinaus, ist zu erkennen, dass auch weitere Möglichkeiten existieren. Es könnten mittels aus dem Antriebsmodul an die Decke abgeschossenen Haken Seile gespannt werden, an denen der Roboter sich schwingend fortbewegt. Möglich könnte auch der Einsatz eines Rückstoßantriebs sein, der durch den Ausstoß eines Arbeitsmediums eine Reaktionskraft erzeugt. Der Antrieb könnte durch Beine, oder auch ein einzelnes, springendes Bein, ausgeführt sein. Der Roboter könnte kriechen, rollen, fliegen, gehen, krabblen, rutschen. Die Lösungsansätze

können zahlreiche Formen annehmen.

Obwohl sich bei näherer Betrachtung klarstellen mag, dass viele Lösungen, aus unterschiedlichen Gründen, nicht zweckmäßig sein können, ist es dennoch von Vorteil, das Problem zu abstrahieren, um technisch oder wirtschaftlich gute Lösungen nicht bereits zu Beginn des Konzipierens auszuschließen.

5.2 Zerlegung in Teilfunktionen

Die formulierte Gesamtfunktion, die Bewegung eines Roboters zu ermöglichen, kann in Teilfunktionen zerlegt und strukturiert werden, um einen besseren Überblick zu gewinnen. Erst wenn klargestellt ist, welche Funktionen vom System zu erfüllen sind, kann eine sinnvolle Bewertung erfolgen. Durch weiterfolgende Unterteilung der aufgestellten Teilfunktionen ergibt sich ein hierarchisches System. Die Komplexität der Aufgabe soll sich dabei in jedem Schritt reduzieren.

5.2.1 Ebene und räumliche Bewegung

Aus der Kinematik weiß man, dass sich die allgemeine Bewegung eines starren Körpers im Raum in einen translatorischen und einen rotatorischen Anteil zerlegen lässt. Sowohl der translatorische als auch der rotatorische Anteil lassen sich wiederum in jeweils drei uniaxiale Bewegungen unterteilen, sodass sich der Freiheitsgrad $f = 6$ ergibt. Reduziert man das Problem auf die ebene Bewegung verbleiben zwei translatorische und ein rotatorischer Freiheitsgrad $f = 3$. Die Komplexität der ebenen Bewegung ist also weitaus geringer als jene der räumlichen. Der Unterschied zwischen räumlicher und ebener Bewegung hat in der Praxis allerdings noch weitreichendere Folgen. Erfolgt die Bewegung auf stabilem Untergrund, können mehrere verschiedene Antriebskonzepte angewendet werden. Die zur Bewegung notwendigen Kräfte auf den Roboter sind Reaktion auf die auf den Boden aufgebracht. Das Fahrzeug stößt sich also am festen Untergrund ab, im Unterschied zur räumlichen Bewegung, in dem das umgebende Medium ein Fluid - die Luft - ist.

Im Weiteren werden nur Konzepte der ebenen Bewegung verfolgt.

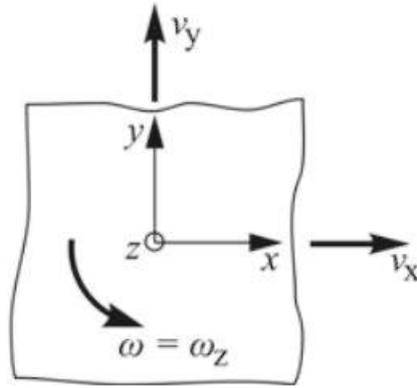


Abbildung 5.1: Freiheitsgrade eines starren Körpers in der Ebene [46]

5.2.2 Teilfunktionen der ebenen Bewegung

Die ebene Bewegung basiert auf der translatorischen Bewegung entlang zweier Achsen und der Rotation um eine zu diesen beiden normal stehenden Drehachse entsprechend Abbildung 5.1. Um manövrierfähig zu sein muss ein Roboter alle drei dieser Bewegungen ausführen können. Die Art und Weise in der diese gleichzeitig ausgeführt werden können bestimmt den Grad der Manövrierfähigkeit. Können die Beträge der Geschwindigkeiten v_x , v_y und ω unabhängig voneinander eingestellt werden, erreicht die Manövrierfähigkeit ein Maximum und der Antrieb ist omnidirektional.

5.2.3 Stabilität

Unabhängig davon, welches Antriebsprinzip gewählt wird, kommt dem Antrieb die Aufgabe zuteil, den Kontakt mit dem Untergrund herzustellen. Die Funktionen die dabei erfüllt werden müssen bestehen darin, die äußeren Kräfte, die auf den Roboter auch im Stillstand wirken, in den Boden einzuleiten. Diese Kräfte haben ihre Ursachen unter anderem im Eigengewicht, dem Gewicht der Zuladung, Reaktionskräften aufgrund der Beschleunigung eines aufgesetzten Roboterarms und dessen Traglast und der Kollision mit Objekten. Wie in Kapitel 2 beschrieben, sind für statische Stabilität zumindest drei Aufstandspunkte notwendig. Fahrwerke mit nur zwei Rädern sind dann stabil, wenn der Schwerpunkt unterhalb der Radachsen liegt. Nachdem, aufgrund des Roboterarms, die Schwerpunktslage eher höher liegen wird, müssen zumindest drei Punkte in Kontakt mit dem Boden sein. Je weiter diese sich am Rand des Grundrisses des Roboters befinden, desto besser wird die Kippstabilität. Beschleunigt der Roboter kann die resultierende Trägheitskraft zum Kippen führen, wenn die Schwerpunktslage weit oben liegt. Sowohl

5 Konzeptphase

für statische als auch dynamische Stabilität ist es also günstig, wenn der Massenmittelpunkt des Gesamtsystem möglichst tief, und die Aufstandspunkte möglichst weit außen liegen.

5.3 Grundlegendes Antriebskonzept - Räder oder Beine

Die wohl ausschlaggebendste Entscheidung betrifft die Wahl zwischen einer Konzeption des Antriebsmoduls mit Rädern oder mit Beinen. Diese zwei Varianten unterscheiden sich so stark, dass funktionalhierarchisch weiter unten gelegene Entscheidungen zwischen den Systemen nicht mehr objektiv vergleichbar bleiben. Um den Lösungsraum sinnvoll einzuschränken ist es daher ratsam, eine der Möglichkeiten auszuschließen und die andere weiterzuverfolgen. Die Wahl hängt von zahlreichen Faktoren ab. Deshalb soll mit Hilfe der Methode des Paarweisen Vergleichs den, anhand den aus den Anforderungen abgeleiteten relevanten, Kriterien Gewichtungsfaktoren zugeordnet werden, die in Folge unter Einsatz der Methode der Nutzwertanalyse zur Bewertung der zwei Varianten dienen.

5.4 Bewertungskriterien des Antriebsmoduls

Basierend auf den der Planungsphase entnommenen Anforderungen, sowie den zu erfüllenden Funktionen, werden Kriterien aufgestellt, die den Antrieb charakterisieren.

- **Manövrierfähigkeit**
Für die Navigation durch enge Passagen und um Ecken, wie sie im Innenbereich oft auftreten, sowie für die Repositionierung, ist eine gute Manövrierfähigkeit essentiell. Omnidirektionale Antriebe erreichen hier die höchsten Werte.
- **Geländegängigkeit**
Zum Überwinden von Stufen und Kanten, sowie bei der Bewegung auf unebenem, instabilem oder abschüssigem Untergrund sind geländegängige Konzepte vorteilhaft.
- **Einfachheit**
Eine geringe Komplexität des Aufbaus zur Erfüllung einer Funktion hat weitreichende positive Folgen bezüglich der Kosten, Wartbarkeit und Steuerung
- **Modularisierbarkeit**
Wenn sich das System dafür eignet durch Austausch oder geringfügigen Umbau den Funktionsumfang anzupassen oder zu erweitern, indem es in standardisierte Module aufgeteilt wird, ist die Modularisierbarkeit gegeben.

- **Skalierbarkeit**

Um die Antriebsleistung und damit den Funktionsbereich zu erweitern, soll es möglich sein, multiple gleiche Module einzusetzen. Ob und wie einfach das möglich ist, gibt die Skalierbarkeit an.

5.5 Paarweiser Vergleich der Bewertungskriterien

Um festzulegen, welche Gewichtung jedem der einzelnen Kriterien zukommt, wird ein Paarweiser Vergleich angewendet. Dabei werden immer jeweils zwei Kriterien gegenübergestellt und entschieden, welches der beiden höhere Relevanz hat. Durch Summation der so gewonnenen Gewichte, ergibt sich für jedes der charakteristischen Merkmale eine Gewichtung, mit der folglich eine Bewertung durchgeführt werden kann. Tabelle 5.2 zeigt den Paarweisen Vergleich und die erhaltenen Gewichtungen.

Zu Abbildung 5.2: Beim Paarweisen Vergleich wird ein Kriterium einer Zeile mit jenen in den Spalten verglichen. Hat es eine höhere Wichtigkeit, erhält es den Wert 1, ist es weniger wichtig den Wert 0. Bei Unklarheit oder gleich hoher Bedeutung wird der Wert 0.5 zugewiesen.

Der Manövrierfähigkeit ist ähnliche Wichtigkeit wie der Geländegängigkeit zuzuordnen. Beide Eigenschaften sind bis zu einem gewissen Grad erforderlich. Ein einfacher Aufbau reduziert Aufwand und Kosten in der Planung, Konstruktion, Fertigung und Steuerung und hat daher ähnliche Relevanz wie die Manövrierfähigkeit. Die Möglichkeit, das Antriebsmodul durch teilmodularen Aufbau anzupassen ist von zentraler Bedeutung und deshalb wichtiger als Manövrierfähigkeit und Geländegängigkeit. Ebenso ist die Skalierbarkeit, also die Möglichkeit der Implementierung mehrerer Module zur Erhöhung der Leistung, einer der Kernpunkte und somit der dem Umfang der Fähigkeit zu manövrieren sowie der Fähigkeit, unwegsames, unebenes Gelände zu überwinden überzuordnen. Ein zu komplexer Aufbau auf Kosten der Modularisierbarkeit und Skalierbarkeit wäre hinderlich, weshalb diesen Kriterien vergleichbare Bedeutung zur Einfachheit zukommt. Die Möglichkeit, den Antrieb durch Verbauung zusätzlicher Module zu stärken ist von höherer Bedeutung als die Anpassbarkeit durch Modularisierung.

Zu erkennen ist, dass die Anpassbarkeit in Form von Austausch einzelner Komponenten innerhalb des Antriebs, sowie die Sinnhaftigkeit des Einsatzes mehrerer Antriebsmodule von größter Bedeutung sind, ebenso wie der Verzicht auf zu komplexe Konstruktionen.

| | Manövrierfähigkeit | Geländegängigkeit | Einfachheit | Modularisierbarkeit | Skalierbarkeit | Gewichtung | relative Gewichtung |
|---------------------|--------------------|-------------------|-------------|---------------------|----------------|------------|---------------------|
| Manövrierfähigkeit | | 0.5 | 0.5 | 0 | 0 | 1 | 0.1 |
| Geländegängigkeit | 0.5 | | 0 | 0 | 0 | 0.5 | 0.05 |
| Einfachheit | 0.5 | 1 | | 0.5 | 0.5 | 2.5 | 0.25 |
| Modularisierbarkeit | 1 | 1 | 0.5 | | 0 | 2.5 | 0.25 |
| Skalierbarkeit | 1 | 1 | 0.5 | 1 | | 3.5 | 0.35 |
| | | | | | | 10 | 1 |

Abbildung 5.2: Paarweiser Vergleich der Bewertungskriterien

Die Kriterien der Manövrierfähigkeit und Geländegängigkeit sind ihnen, im Bezug auf den Vergleich der Konzepte, untergeordnet.

5.6 Nutzwertanalyse der grundlegenden Bauarten des Antriebs

Um eine fundierte Entscheidung bezüglich der Weiterverfolgung eines Konzeptes mit Rädern beziehungsweise eines mit Beinen zu treffen, wird eine Nutzwertanalyse durchgeführt, um die beiden Varianten zu vergleichen. In späterer Folge können für das gewählte System zur weiteren Konkretisierung weitere Vergleiche und Analysen angestellt werden. Je nachdem wie zufriedenstellend ein Konzept ein Kriterium erfüllt, wird ein Wert zwischen 0 und 10 zugewiesen, wobei 0 bedeutet, dass das Kriterium gar nicht erfüllt werden kann, und 10, dass ein Kriterium perfekt erfüllbar ist. In Abbildung 5.3 sind die so gewonnenen Bewertungspunkte ersichtlich. Es ist darauf hinzuweisen, dass die Fähigkeit, ein Kriterium zu Erfüllen, immer in Betracht zieht, dass unterschiedliche Bauweisen des Konzeptes möglich sind. Das heißt, dass zum Beispiel im Falle eines Konzeptes mit Rädern, die Manövrierfähigkeit, aufgrund der Möglichkeit, omnidirektionale Antriebe einzusetzen hoch ist. Es wird hier generell zwischen den zwei Konzepten Beine und Räder verglichen, nicht zwischen spezifischen Untervarianten dieser.

Ein Antrieb mit Beinen kann sich, bei entsprechend ausgeführter Konstruktion, aus dem Stillstand in verschiedene Richtungen bewegen. Auch eine Reorientierung ist möglich. Zur Vorstellung denke man nur etwa an eine Spinne, die mit ihren acht Beinen in ihrer Bewegung sehr vielseitig ist. Jedoch sind nicht alle Bewegungsrichtungen ohne zuvorige Reorientierung möglich und die Steigerung der Manövrierfähigkeit geht mit stark erhöhtem Konstruktionsaufwand einher.

Demgegenüber zeichnen sich Radfahrwerke in omnidirektionaler Ausführung, etwa mit Mecanum-Rädern, durch ihre nahezu uneingeschränkte Bewegungsfreiheit aus. In derartigen Konfigurationen sind überlagerte Rotation und Bewegung entlang einer beliebigen Bahnkurve realisierbar, weshalb die Gruppe der Radfahrzeuge hier mit dem Maximalwert belegt wird.

Die große Stärke von Robotern mit Beinen besteht zweifelsohne in ihrer Geländegängigkeit. Unebener Untergrund, Stufen oder Spalte stellen keine unüberwindbaren Hindernisse da. Zusätzlich sind manche Beinroboter in der Lage sich im Stillstand auf und ab zu bewegen.

Dies stellt auch gleichzeitig ein Gebiet dar, in dem Räder an ihre Grenzen stoßen kön-

| | Gewichtung | Beine | | Räder | |
|---------------------|------------|-------|------------------|-------|------------------|
| | | Wert | Gewichteter Wert | Wert | Gewichteter Wert |
| Manövrierfähigkeit | 0.1 | 8 | 0.8 | 10 | 1 |
| Geländegängigkeit | 0.05 | 10 | 0.5 | 3 | 0.15 |
| Einfachheit | 0.25 | 5 | 1.25 | 9 | 2.25 |
| Modularisierbarkeit | 0.25 | 6 | 1.5 | 8 | 2 |
| Skalierbarkeit | 0.35 | 5 | 1.75 | 8 | 2.8 |
| | | 34 | 5.8 | 38 | 8.2 |

Abbildung 5.3: Nutzwertanalyse von Rädern und Beinen

nen. Obwohl durch entsprechenden Einsatz stärkerer Antriebe, größerer Raddurchmesser, weicherer Laufflächenmaterialien mit Profil und Radaufhängungen Möglichkeiten bestehen, die Geländegängigkeit zu verbessern, sind all diese Adaptionen mit zusätzlichem Aufwand und höheren Kosten beziehungsweise konstruktiven Einschränkungen verbunden und erreichen dennoch nicht die Flexibilität, die Beine bieten können. Es wäre allerdings möglich, einen Radantrieb mit Ketten auszustatten, und so ein Kettenfahrzeug zu erhalten, das besser für schroffes Gelände geeignet ist.

Der Einsatz eines Radfahrwerkes hat sich unter anderem deshalb durchgesetzt, weil sein Aufbau relativ einfach ausgeführt sein kann. Die Anzahl der notwendigen Aktuatoren ist im Vergleich zu Robotern mit Beinen niedriger, was die Komplexität stark reduziert. Besonders dann, wenn komplizierte Zusammenhänge zwischen den Bewegungen der angetriebenen Achsen implementiert werden müssen, steigt der Programmieraufwand der Steuerung stark an. Ein Bein eines Roboters benötigt normalerweise zumindest zwei Motoren, während ein (ungelenktes) Rad nur einen benötigt. Für einen Roboter mit drei Beinen wären also sechs Motoren notwendig, während ein omnidirektionaler Antrieb mit Rädern mit lediglich drei möglich ist.

Aus diesen Gründen ist die Bewertung der Einfachheit bei Konzepten mit Rädern deutlich höher als bei jenen mit Beinen.

Im Bezug auf die Modularisierbarkeit besteht bei einer Variante mit Rädern, bei entsprechender Konstruktion, die Möglichkeit, die Laufräder auszutauschen. So kann es möglich sein, dasselbe Antriebsmodul in verschiedenen Konfigurationen einzusetzen. Die Beine eines Roboters können auch modular entworfen werden, etwa durch Austauschbarkeit des Segmentes des Beins, das mit dem Boden in Kontakt ist, um den Einsatz auf verschiedenen Untergründen zu erleichtern.

Sowohl bei Bein- als auch Radrobotervarianten ließen sich Antriebskomponenten modular gestalten, sodass Motor oder Getriebe eventuell als austauschbare Komponenten vorgesehen sein können. Nachdem der Wechsel der Antriebsräder eine unkomplizierte Möglichkeit darstellt, ein Räderfahrwerk zu modularisieren, ist der Wert hier leicht höher angesetzt.

Die Fähigkeit, die Antriebsleistung zu skalieren ergibt sich im Falle eines Fahrwerks mit Rädern dadurch, dass zusätzliche angetriebene Räder direkt linear zur Gesamtleistung beitragen, sofern der Bodenkontakt gewährleistet ist. Einsatz höherer Anzahlen an Beinmodulen erfüllen dieses Kriterium nur bedingt. Ferner verkompliziert sich die Kinematik der Bewegung durch erhöhte Beinzahl zusätzlich.

Zusammenfassend ergibt sich eine deutlich höhere Bewertung der Radkonzepte im Vergleich zu jenen mit Beinen. Aus den oben erörterten Gründen wird daher für die weitere Entwicklung ein Konzept mit Rädern verfolgt. Die modulare Architektur des mobilen Robotersystems lässt jedoch zu, dass in weiterer Folge auch Antriebsmodule mit Beinen konzipiert werden. Insbesondere, wenn der Einsatzbereich auf einen solchen erweitert wird, der für Räder ungeeignetes Gelände, wie etwa hohe Stufen, enthält.

5.7 Konzepterstellung eines Antriebsmoduls mit Rad

Die Varianten, einen Roboter durch Antriebsmodule zu mobilisieren sind vielfältig. Aufgrund der Komplexität soll auch bei der Wahl des endgültigen Konzeptes methodisch vorgegangen werden. Mithilfe der Methode des morphologischen Kastens werden drei Konzepte erstellt, die ihrerseits dann durch eine weitere Nutzwertanalyse bewertet werden. Das beste Konzept wird ermittelt und danach im Detail ausgestaltet.

5.8 Festlegung der relevanten Merkmale und deren Ausprägungen

Für die Anwendung der Methode des morphologischen Kastens muss das System in Teilaspekte getrennt werden, die unabhängig voneinander gewählt werden können. Die Entscheidungen, welche die Wahl der Komponenten beziehungsweise die Funktionsprinzipien betreffen, fortan Merkmale genannt, werden in Tabellenform dargestellt und intuitiv so kombiniert, dass drei unterschiedliche, vergleichbare Konzepte entstehen.

Die Merkmale und ihre unterschiedlichen Ausprägungsmöglichkeiten werden im Folgenden aufgelistet und diskutiert.

5.8.1 Motor

Die verfügbaren Motorvarianten wurden in Kapitel 2.7.1 vorgestellt. Nachdem genaue Positionierung und Navigation ein jedenfalls zu erfüllendes Kriterium darstellen, kommen nur Motoren in Frage, deren Position geregelt werden kann. Das bedeutet, dass entweder Servomotoren oder Schrittmotoren eingesetzt werden können. Als Servomotor können dabei sowohl Gleichstrommotoren als auch elektronisch kommutierte bürstenlose Motoren zum Einsatz kommen.

Ein wesentlicher Unterschied zwischen Schrittmotoren und Servomotoren besteht darin, dass Schrittmotoren nicht zwangsweise Sensorik und Regelkreis zur Positionierung benötigen, nachdem der Rotor dem äußeren Feld exakt folgt. Das reduziert die Kosten und verringert die Anzahl der notwendigen Bauteile. Allerdings dürfen Schrittmotoren deshalb nur unterhalb ihres Haltemoments betrieben werden, da bei Überlast der Rotor aus dem Statorfeld gedreht wird und somit die Information über die aktuelle Position verloren geht. Eine weitere Besonderheit besteht darin, dass Schrittmotoren durch die *National Electrical Manufacturers Association* (NEMA) genormt wurden, was die Verfügbarkeit von Zubehörteilen verbessert und die konstruktive Planung erleichtert.

Die Varianten innerhalb des Merkmals Motor sind also:

- Schrittmotor
- Gleichstrommotor
- Elektronisch kommutierter Motor (BLDC)

5.8.2 Getriebe

Interessante Getriebevarianten wurden in Kapitel 2.7.2 aufgelistet. Der Einsatz eines Getriebes erlaubt die Wandlung an der Motorwelle vorhandener Drehzahl und vorhandenem Drehmoment. Wird darauf verzichtet, muss der Motor in der Lage sein, sämtliche erforderliche Betriebspunkte ohne Übersetzung anzufahren. Wird ein Getriebe eingesetzt, besteht einerseits die Möglichkeit eines Kompletgetriebes und andererseits die der individuellen Auslegung. Deren erhöhter Aufwand steht dabei die größere Variantenvielfalt und die eventuell niedrigeren Kosten gegenüber. Üblicherweise steigt auch der Platzbedarf, weil die verfügbaren Planetengetriebebesätze zumeist gut optimiert und kompakt ausgeführt sind. Winkelversätze von neunzig Grad sind bei beiden Varianten möglich, mit Ausnahme der Riementriebe. Einige Getriebetypen benötigen gegebenenfalls die Einplanung einer zusätzlichen Schmierung.

Mögliche Ausprägungen des Merkmals Getriebe sind:

- Kein Getriebe
- Getriebebesatz (Planetengetriebe)
- Riementrieb

- Zahnradgetriebe

5.8.3 Konfiguration

In welchen Radkonfigurationen der Antrieb ausgeführt werden kann hängt von der Konstruktion der Antriebsmodule ab. Die Notwendigkeit zusätzlicher Lenkantriebe besteht bei den Konfigurationen der allgemeinen einachsigen und zweiachsigen Lenkungen, Swerve-Drive und Synchro-Antrieb. Bei Differentialantrieb und Omni-Antrieben entspricht die Anzahl der notwendigen Antriebe denen der Räder, wobei im Falle eines Differentialantriebs mit nur zwei angetriebenen Rädern zusätzliche Stützräder notwendig werden.

Für die Ausführung der Konfiguration und des Lenkantriebs werden die folgenden Varianten in Betracht gezogen, die in Abbildung 5.4 dargestellt sind:

- Hauptdrehachse angetrieben
- 360° gelenkte Vertikalachse
- < 90° gelenkte Vertikalachse

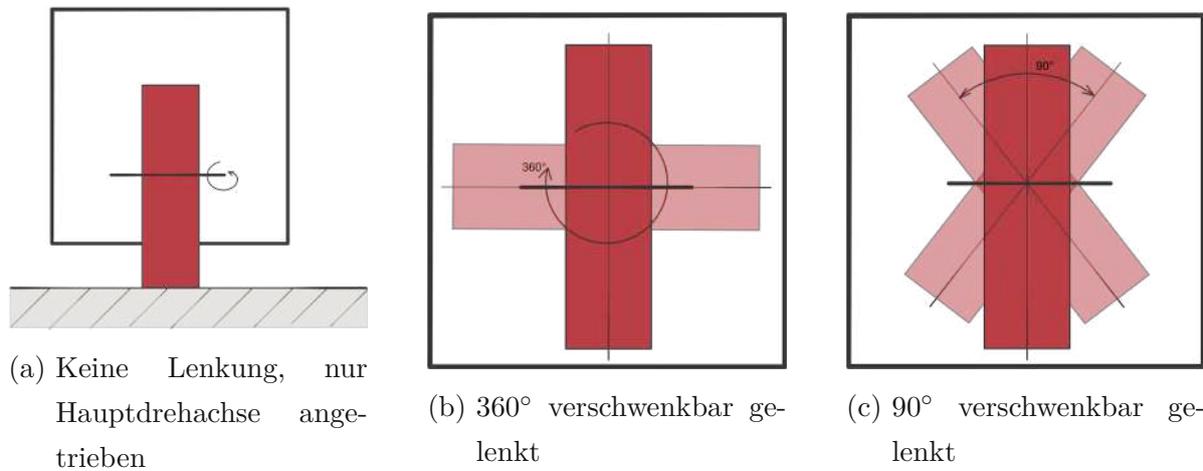


Abbildung 5.4: Konfigurationsvarianten der Lenkung der Antriebsräder

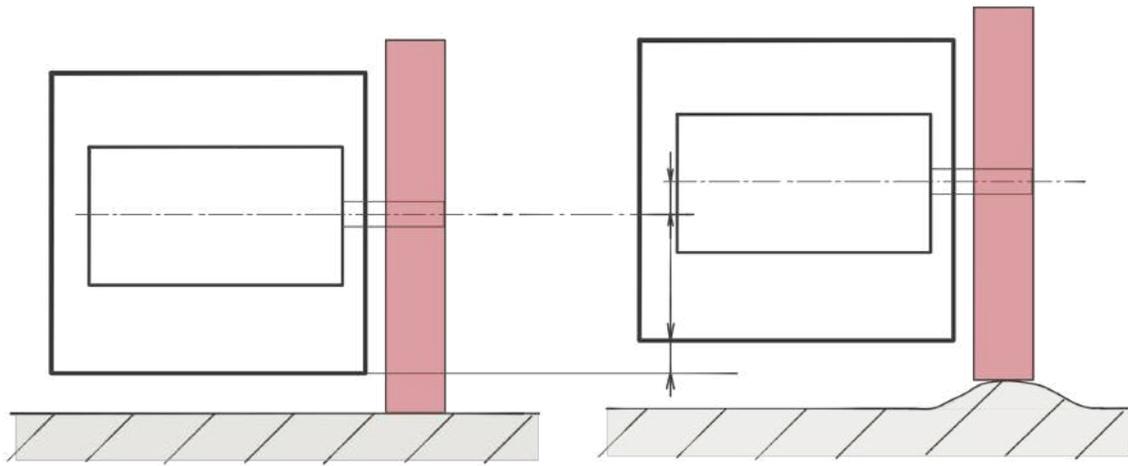
5.8.4 Radaufhängung

Wenn mehr als drei Räder im Fahrzeug verbaut sind, kommt es vor, dass bei unebenem Untergrund der Bodenkontakt verloren gehen kann. Das kann die Präzision des Antriebs

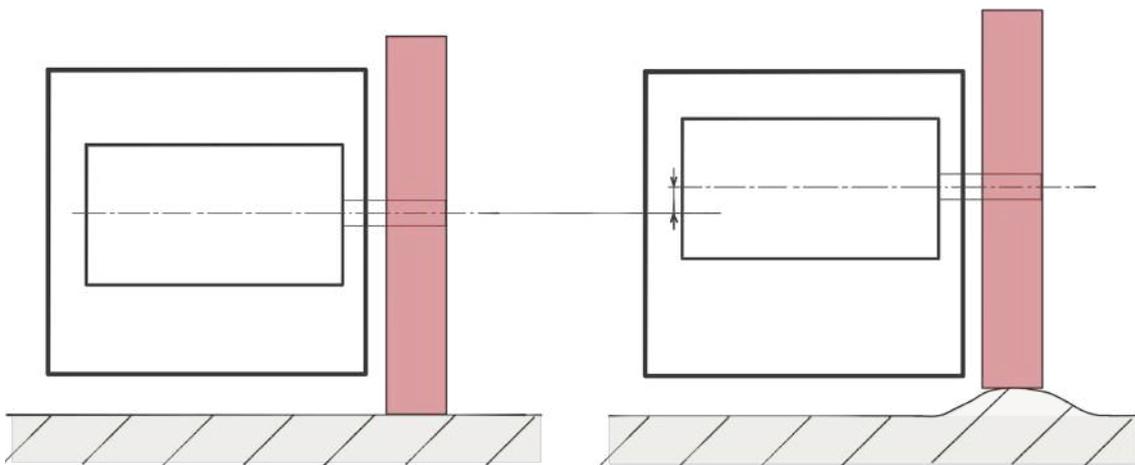
beeinträchtigen und im schlimmsten Fall dazu führen, dass das Fahrzeug bewegungsunfähig wird, wenn zu viele angetriebene Räder den Bodenkontakt verlieren. Um Abhilfe zu schaffen, kann eine Federung konzipiert werden, die für konstanten Kontakt und ruhigere Fahrt sorgt. Sollen die Antriebsräder aufgehängt werden, kann die Bauweise der Einzelradaufhängung eingesetzt werden, um die Komponenten des Antriebsstrangs zur gefederten Masse zählen zu können. Diese komplexe Bauweise ist hauptsächlich bei hohen Geschwindigkeiten und schweren Motoren notwendig. Andere Möglichkeiten belaufen sich auf die Aufhängung des gesamten Antriebs innerhalb des Moduls beziehungsweise dem Einsatz von nicht angetriebenen gefederten Stützrädern und ungefederten Antriebsrädern. Abbildung 5.5 skizziert die betrachteten Varianten.

Bezüglich der Aufhängung werden folgende Möglichkeiten in Betracht gezogen:

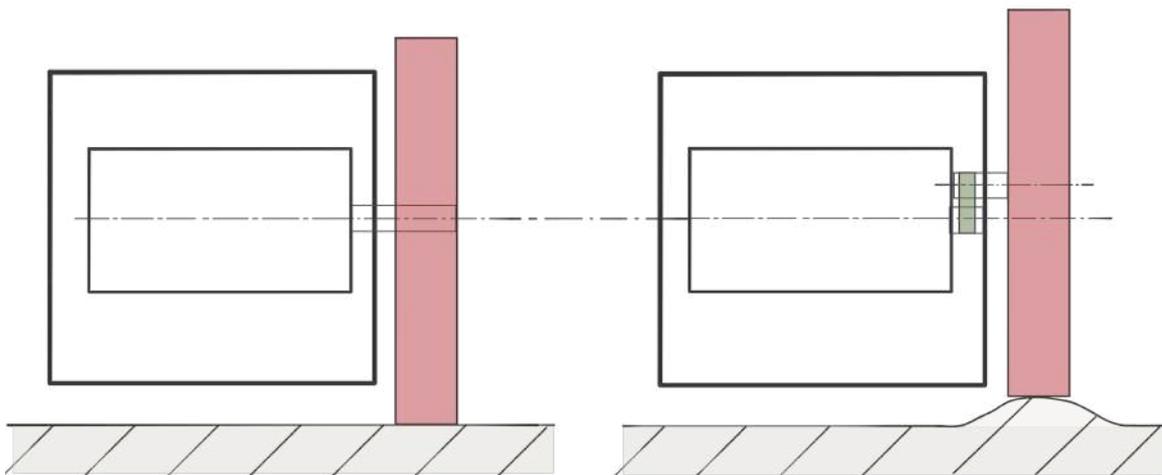
- Keine Aufhängung
- Einzelradaufhängung
- Antriebsaufhängung
- Gefederte Stützräder



(a) Keine Aufhängung



(b) Aufhängung des Antriebs



(c) Einzelradaufhängung

Abbildung 5.5: Möglichkeiten der der Fahrwerksaufhängung

5.8.5 Radpositionierung

Die vorgegebene Modulform ist entweder ein Würfel mit Kantenlänge 160mm oder Quader mit den Dimensionen 160mmx160mmx320mm, wobei allseitig 3mm für die Modulverbindungsplatten abzuziehen sind. Wie das Rad im Antriebsmodul positioniert ist, hat Auswirkungen auf die Konstruktion, den möglichen Raddurchmesser und die dynamischen Eigenschaften. Abbildung 5.6 zeigt die Möglichkeiten der Anordnung eines angetriebenen Rades innerhalb des Moduls. Wesentliches Merkmal ist dabei, ob die zur Rotationsachse des Rades normal stehenden Trägheitshauptachsen innerhalb oder außerhalb des Modulrahmens befindlich sind. Sind sie innerhalb, erhöht das die Modularität weil Antriebsmodule dann auch im Inneren des Grundrisses der Gesamtkonfiguration eingebaut werden können. Jedoch limitiert solch eine Anordnung den Raddurchmesser und die Achsposition und nimmt inneres Bauvolumen des Moduls ein. Entsprechend Abb. 5.6 stehen vier Möglichkeiten zur Auswahl.

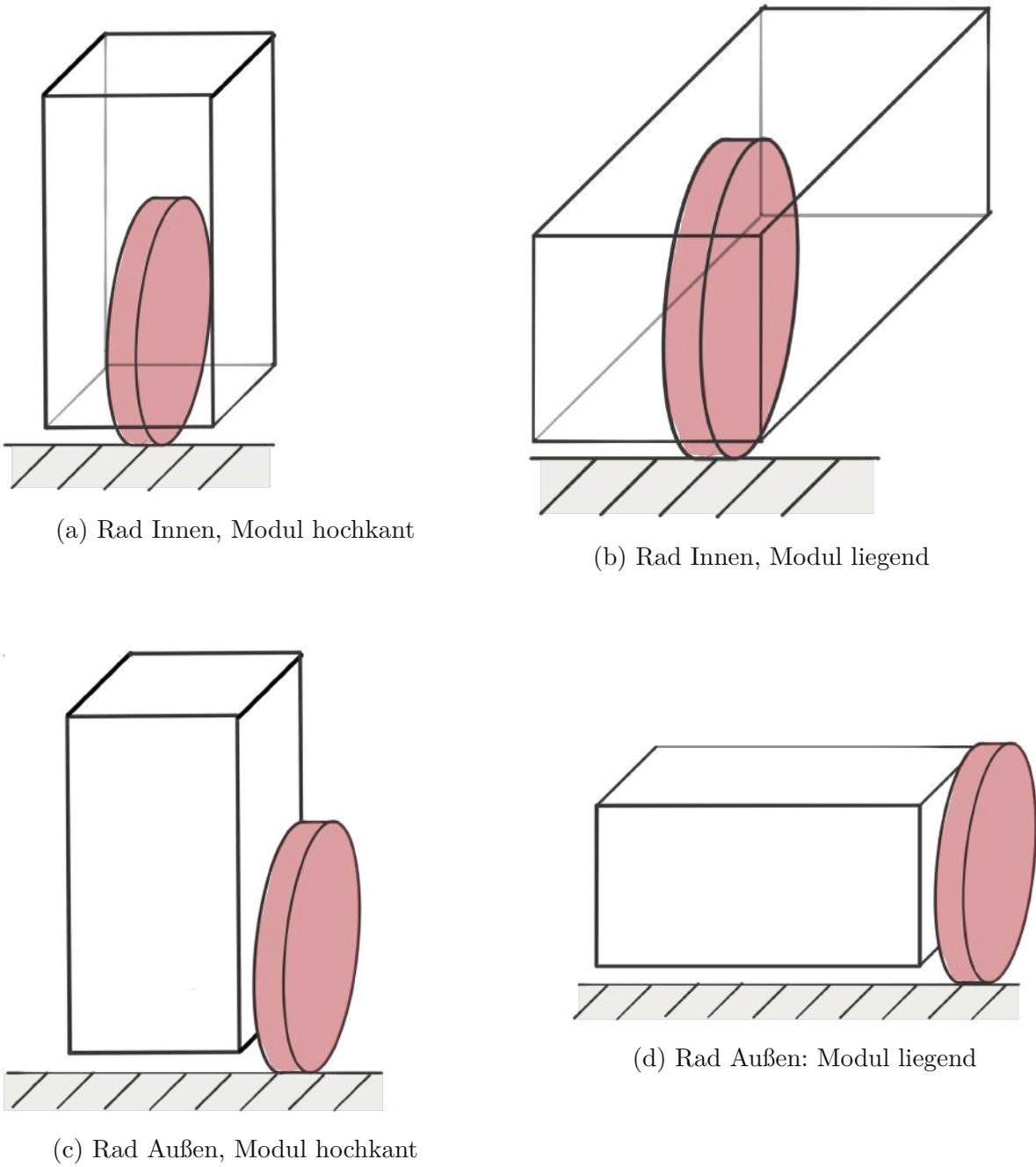


Abbildung 5.6: Varianten der Positionierung des Antriebsrades

5.9 Aufstellung des morphologischen Kastens

Nachdem die Festlegung der einzelnen Merkmale und deren verschiedene Ausprägungsmöglichkeiten erfolgt ist, können diese in übersichtlicher Tabellenform angeordnet werden. In Abbildung 5.7 ist der morphologische Kasten zu sehen. Durch das Kombinieren verschiedener Merkmale können nun kreative Lösungen entstehen. Es sollen drei unterschiedliche Konzepte erstellt werden, die in weiterer Folge behandelt und verglichen werden.

| Ausprägungen Merkmale | Ausprägung 1 | Ausprägung 2 | Ausprägung 3 | Ausprägung 4 |
|--------------------------|---------------------------|--------------------------|---------------------------|--------------------------|
| Motor | Schrittmotor | Gleichstrommotor | BLDC | |
| Getriebe | Kein Getriebe | Getriebebesatz | Riementrieb | Zahnradgetriebe |
| Konfiguration | Hauptachse | 360° Lenkung | <90° Lenkung | |
| Radaufhängung | Keine Aufhängung | Einzelradaufhängung | Antriebsaufhängung | |
| Radpositionierung | Rad Innen, Modul hochkant | Rad Innen, Modul liegend | Rad Außen, Modul hochkant | Rad Außen: Modul liegend |

Abbildung 5.7: Morphologischer Kasten zur Konzepterstellung des Antriebsmoduls

Zur Erstellung dreier Konzepte wird nun aus jeder Zeile des morphologischen Kastens eine Ausprägung gewählt. Dies geschieht intuitiv, ohne allzu starke Bezugnahme auf die Interaktion der Merkmale. Das ist deshalb möglich, weil diese voneinander weitgehend unabhängig sind.

5.9.1 Konzept A

Für das Konzept A wurde gewählt:

- Motor: Schrittmotor
- Getriebe: Getriebesatz
- Konfiguration: 360° Lenkung
- Radaufhängung: Antriebsaufhängung
- Radpositionierung: Rad innen, Achse \perp rechteckige Fläche

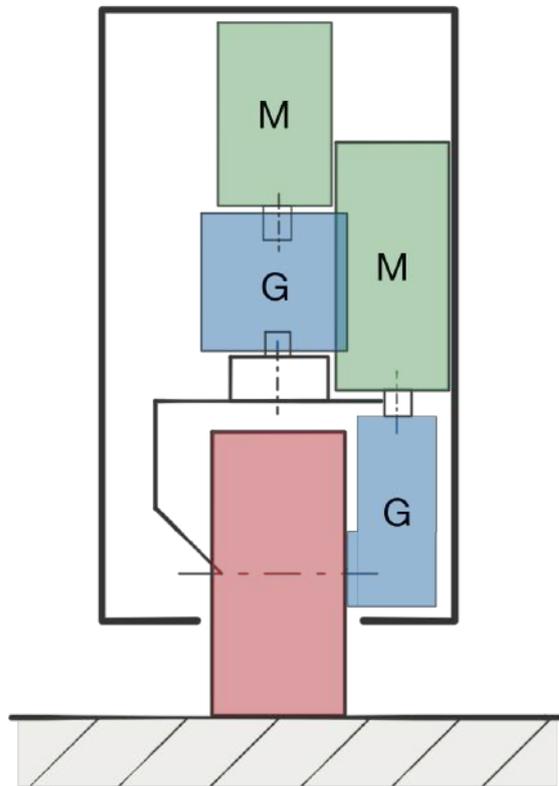


Abbildung 5.8: Konzeptskizze der Variante A

Dieses Konzept setzt auf eine Radpositionierung innerhalb des Moduls. Das schränkt den maximalen Raddurchmesser ein, erlaubt aber eine sehr freie Positionierung des Antriebsmoduls. Das Überfahren von Kanten wird durch eine Aufhängung des gesamten Antriebs innerhalb des Moduls erleichtert. Durch ein gelenktes Antriebsrad eröffnet sich die Möglichkeit, den Antrieb als *Swerve-Drive* auszuführen, was allerdings den Einbau eines zweiten Motors notwendig macht, wodurch sich das Gesamtgewicht und die Komplexität erhöhen, die Manövrierfähigkeit jedoch auch steigt. Zur Übersetzung der vergleichsweise niedrigen Drehmomente von Schrittmotoren werden Planetengetriebesätze implementiert. Diese spiegeln sich zwar in den Gesamtkosten wieder, überzeugen jedoch durch ihre Kompaktheit, die in einem Konzept mit zwei Motoren pro Modul ein wichtiger Faktor sein kann. Die Skizze in Abbildung 5.8 zeigt, wie das Konzept A etwa aussehen könnte.

5.9.2 Konzept B

Das zweite Konzept besteht aus:

- Motor: BLDC
- Getriebe: Riementrieb
- Konfiguration:
Hauptachse
- Radaufhängung:
Keine Aufhängung
- Radpositionierung:
Rad außen,
Achse \perp quadratische
Seitenfläche

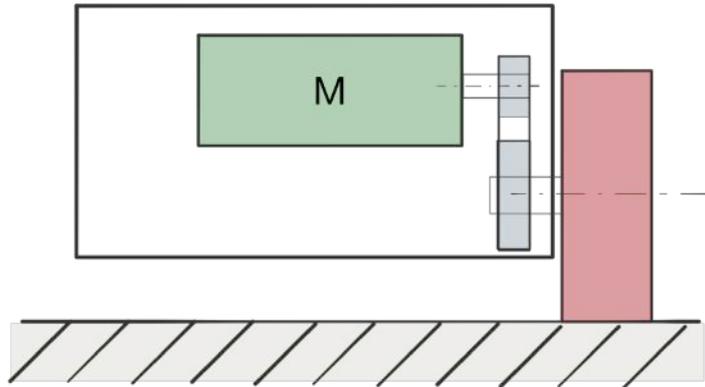


Abbildung 5.9: Konzeptskizze der Variante B

Das Konzept B verzichtet auf gelenkte Antriebsräder. So sind Ausführungen als Differentialantrieb oder Omni-Drive, entweder mit *Omni-Wheels* oder *Mecanum-Rädern* möglich und die Anzahl an Motoren pro Modul bleibt bei 1. Im Falle der Implementierung eines Differentialantriebs würden zumindest zwei Antriebsmodule benötigt werden, beim Antrieb mit Omni-Wheels drei und als Mecanum-Antrieb vier. Wird die Antriebskonfiguration gewechselt müssen die Räder entsprechend ausgetauscht werden, weshalb eine gute Zugänglichkeit der Laufräder vorteilhaft ist, was durch die Positionierung außerhalb des Modulrahmens gewährt ist. Nachdem nur ein Motor pro Modul benötigt wird, ist es im Sinne der Kosten vertretbar, einen elektronisch kommutierten bürstenlosen Motor einzuplanen, da dieser die größte Leistungsdichte der drei Varianten aufweist, und gleichzeitig gutes Überlastverhalten aufweist. Nachdem durch die Radpositionierung und die Konfiguration genügend Bauraum zur Verfügung steht, kann auf ein individuell ausgelegtes Getriebe gesetzt werden, das als Riementrieb ausgeführt wird. Es wird auf eine Radaufhängung verzichtet. Durch die Möglichkeit großer Raddurchmesser und eventuelle zusätzliche gefederte Stützrollen können die dadurch entstehenden etwaigen Komplikationen bei unebener Fahrbahn vermindert werden. Die Abbildung 5.9 stellt dieses Konzept dar.

5.9.3 Konzept C

Für das Konzept C wurde gewählt:

- Motor:
Gleichstrommotor
- Getriebe: Keines
- Konfiguration:
Hauptachse
- Radaufhängung:
Keine Aufhängung
- Radpositionierung:
Rad außen,
Achse \perp quadratische
Fläche

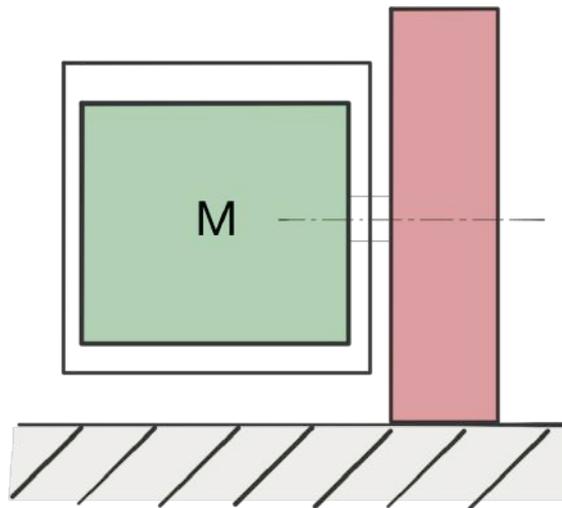


Abbildung 5.10: Konzeptskizze der Variante C

Bei diesem Konzept steht die Minimierung der Komplexität und der Kosten im Vordergrund. Es wurde die verhältnismäßig preiswerteste Motorvariante selektiert und auf Getriebe, Lenkung und Aufhängung verzichtet. Dementsprechend wird ein stärkerer Motor vonnöten sein, um das Anforderungsprofil bestmöglich zu erfüllen, weshalb aus Gründen der bestmöglichen Ausnutzung des Bauraumes auf eine Radpositionierung an der Außenseite der quadratischen Fläche des Modulrahmens gesetzt wird. Durch den einfacheren Aufbau besteht eventuell die Möglichkeit, die kleinere Würfelmodulform für den Antrieb zu verwenden. Die Skizze in Abbildung 5.10 zeigt diesen einfachen Aufbau.

5.10 Bewertung der Konzepte

Die im vorherigen Abschnitt erstellten Konzepte sollen nun analysiert und verglichen werden, um eine fundierte Entscheidung bezüglich des auszuarbeitenden Entwurfs treffen zu können. Analog zum Vorgehen bei der Entscheidung zwischen der grundlegenden Bauweise (Räder vs. Beine) werden mithilfe einer gewichteten Nutzwertanalyse vordefinierten Kriterien Werte zugeordnet, die für jedes der Konzepte einen Gesamtwert ergeben. Das Konzept, welches den höchsten Gesamtwert erreicht wird zur weiteren Auskonstruktion beibehalten, die anderen verworfen.

5.11 Erweiterte Bewertungskriterien

Die Kriterien, die für das Antriebsmodul wichtig sind entsprechend weitgehend jenen aus Abschnitt 5.3. Sie werden in adaptierter Form übernommen und erweitert. Somit sind die für die Wahl des Konzeptes relevanten Kriterien:

- **Manövrierfähigkeit**
Für die Navigation durch enge Passagen und um Ecken, wie sie im Innenbereich oft auftreten, sowie für die Repositionierung, ist eine gute Manövrierfähigkeit essentiell. Omnidirektionale Antriebe erreichen hier die höchsten Werte.
- **Geländegängigkeit**
Zum Überwinden von Stufen und Kanten, sowie bei der Bewegung auf unebenem, instabilem oder abschüssigem Untergrund sind Konzepte vorteilhaft, die den Einsatz größerer Raddurchmesser erlauben, die mit einer Federung ausgestattet sind und bei denen der Einsatz von verformbaren Reifen mit Profil möglich ist.
- **Fertigungsaufwand**
Konzepte, deren Bauteile nicht aufwändig nachbearbeitet oder neu angefertigt werden müssen zeichnen sich durch geringen Fertigungsaufwand aus. Ebenso wirkt sich eine hohe Anzahl an zu bearbeitenden Bauteilen generell negativ auf den Fertigungsaufwand aus.
- **Montageaufwand**
Im Sinne eines einfachen Zusammenbaus und einer unkomplizierten Wartung ist es, insbesondere im Prototypenbau, vorteilhaft, wenn die Konstruktion gut zugänglich ist.

- **Kosten**

Eine Abschätzung der Kosten ist anhand der verwendeten Komponenten möglich. Den wesentlichen Teil der Gesamtkosten des Antriebsmoduls machen die zugekauften Komponenten, insbesondere die Motoren, aus.

- **Modularisierbarkeit**

Wenn sich das System gut dafür eignet durch Austausch oder geringfügigen Umbau den Funktionsumfang anzupassen oder zu erweitern, indem es in standardisierte Module aufgeteilt wird, ist hohe Modularisierbarkeit gegeben. Bei der Bewertung geht hier ebenfalls ein, ob die Radpositionierung die Modularisierbarkeit des Gesamtsystems beeinträchtigt.

- **Skalierbarkeit**

Um die Antriebsleistung und damit den Funktionsbereich zu erweitern, soll es möglich sein, multiple gleiche Module einzusetzen. Ob und wie einfach das möglich ist, gibt die Skalierbarkeit an.

5.12 Paarweiser Vergleich der erweiterten Bewertungskriterien

Analog zum Prozess aus Kapitel 5.3 werden die Kriterien zum Zweck der Gewichtung nun paarweise miteinander verglichen. Die Ergebnisse des Vergleichs stellt Tabelle 5.11 dar. Ist ein Kriterium von höherer Wichtigkeit, erhält es den Wert 1, bei ähnlicher Relevanz den Wert 0,5 und ist es dem Vergleichspartner unterzuordnen den Wert 0. Diese summierten Vergleichswerte ergeben die Gewichtungsfaktoren für die Nutzwertanalyse.

In Erweiterung zu den Kriterien für den Vergleich zwischen Räder- und Beinrobotern wurden die Kriterien des Fertigungs- und Montageaufwandes sowie die Kosten hinzugefügt. Zusätzlich zu den vorherigen Erörterungen, die nach wie vor gültig sind, werden diese nun diskutiert.

Der Aufwand in der Fertigung ist eine Investition, die bei entsprechender Planung zu den einmaligen Kosten eines Antriebsmoduls gezählt werden kann. Zusätzliche Arbeitsgänge für die Bearbeitung der Komponenten haben ihre Berechtigung dann, wenn sich daraus ein wesentlicher Vorteil in den Bereichen der Manövrierfähigkeit und der Skalierbarkeit des Systems ergibt, beziehungsweise, wenn sich durch die Fertigung zusätzlicher Bauteile reduzierte Gesamtkosten ergeben.

| | Manövrierfähigkeit | Geländegängigkeit | Fertigungsaufwand | Montageaufwand | Kosten | Modularisierbarkeit | Skalierbarkeit | Gewichtung | relative Gewichtung |
|---------------------|--------------------|-------------------|-------------------|----------------|--------|---------------------|----------------|------------|---------------------|
| Manövrierfähigkeit | | 0.5 | 1 | 1 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 4 | 0.190 |
| Geländegängigkeit | 0.5 | | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0 | 0 | 2 | 0.095 |
| Fertigungsaufwand | 0 | 0.5 | | 0.5 | 0 | 0.5 | 0 | 1.5 | 0.071 |
| Montageaufwand | 0 | 0.5 | 0.5 | | 0 | 0.5 | 0.5 | 2 | 0.095 |
| Kosten | 0.5 | 0.5 | 1 | 1 | | 0.5 | 0.5 | 4 | 0.190 |
| Modularisierbarkeit | 0.5 | 1 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | | 0 | 3 | 0.143 |
| Skalierbarkeit | 0.5 | 1 | 1 | 0.5 | 0.5 | 1 | | 4.5 | 0.214 |
| | | | | | | | | 21 | 1.00 |

Abbildung 5.11: Paarweiser Vergleich der Bewertungskriterien der Konzepte

Hoher Montageaufwand erweist sich besonders beim Zusammenbau der ersten Prototypen als unerwünscht, da mit Adaptionen und Rekonfiguration der Konstruktion zu rechnen ist. Dauert die Montage besonders lange beziehungsweise erfordert sie den Einsatz spezieller Werkzeuge, verursacht das Verzögerungen und hindert den Entwicklungsprozess. Naturgemäß erhöht sich der Montageaufwand bei Konstruktionen, die aufgrund ihres erweiterten Funktionsumfangs eine höhere Anzahl an Komponenten beinhalten, weshalb die Wichtigkeit des Aufwandes bei der Montage der Relevanz der Manövrierfähigkeit unterzuordnen ist. Weiters sind reduzierte Kosten von größerer Bedeutung als komplizierterer Zusammenbau.

Den Anschaffungskosten der benötigten Bauteile kommt Bedeutung zu. Wird in den frühen Stadien der Entwicklung bereits darauf geachtet, führt das dazu, dass auch spätere Versionen des Antriebsmoduls eine höhere Wahrscheinlichkeit haben, geringe Kosten im Ankauf der Bauteile und der weiteren notwendigen Investitionen zu verursachen. Durch eine Gleichsetzung der Relevanz mit den Kriterien, welche den Funktionsumfang erweitern, wird sichergestellt, dass dennoch keine zu starken Einschränkungen entstehen.

Wie zuvor, stellt die Skalierbarkeit des Antriebs aufgrund der Modulanzahl eines der höchstgewichteten Kriterien dar.

5.13 Gewichtete Nutzwertanalyse der drei erstellten Antriebskonzepte

Nach erfolgter Gewichtung der Bewertungskriterien folgt nun die Analyse der drei Konzepte. Deren Bewertung in den sieben definierten Kriterien erfolgt nach dem Ausmaß, in dem sie diese erfüllen. Lässt sich aus den Möglichkeiten der Auswahl der Konzepterstellungsmethode keine bessere Erfüllung eines Kriteriums erreichen, ist der Wert 10 zuzuordnen. Wird ein Kriterium überhaupt nicht erfüllt, der Wert 0. In Abbildung 5.12 sind die Bewertungen und die sich daraus ergebenden Gesamtwerte aufgeführt.

Das Konzept A erreicht durch die 360° gelenkten Antriebsräder die volle Punktezahl in der Manövrierfähigkeit. Durch die Positionierung des Rades ist der mögliche Durchmesser beschränkt, was die Geländegängigkeit beeinträchtigt. Aufgrund der Notwendigkeit einer Aufhängung und der Lagerung des gelenkten Rades ist der Fertigungs- und Montageaufwand hoch einzuschätzen. Wegen den zwei Motoren ist mit vergleichsweise hohen Kosten zu rechnen. Die Modularisierbarkeit des Gesamtsystems ist durch die Radposition im Inneren erhöht, jedoch muss ein quaderförmiges Modul hochkant verbaut werden, was die Gesamtkonfiguration beeinträchtigen kann. Auf Modulebene ergibt sich die Möglichkeit der Implementierung eines austauschbaren Rades, durch die Limitierung des Durchmessers bleibt die Modularisierbarkeit dennoch beschränkt. Aufskalierung durch Anschluss weiterer Module ist möglich, erweitert den Funktionsumfang aber nur bezüglich der erhöhten Leistung.

Konzept B zeichnet sich durch eine gute Balance zwischen Funktionsumfang und Aufwand aus. Die Manövrierfähigkeit erreicht bei Einsatz von vier Modulen und Mecanum-Antrieb Omnidirektionalität, wenngleich sie im Vergleich zu Konzept A dafür mehr Module benötigt. Nachdem das Antriebsrad außerhalb des Modulrahmens angeordnet ist, ergibt sich die Möglichkeit des Einsatzes großer Raddurchmesser, was das Fahrverhalten bei Stufen verbessert und für entsprechende Geländegängigkeit sorgt. Der Fertigungsaufwand bleibt relativ gering, nachdem beim Getriebe auf Normteile und leicht verfügbare Antriebskomponenten gesetzt werden kann. Werden nur zwei Module für den Prototypenbau gefertigt, sind zusätzliche Stützrollen notwendig, die eigens konzipiert werden müssen, was Fertigung, Montage und Kosten leicht negativ beeinflusst. Besonders zeich-

| | Gewichtung | Konzept A | | Konzept B | | Konzept C | |
|---------------------|------------|-----------|------------------|-----------|------------------|-----------|------------------|
| | | Wert | Gewichteter Wert | Wert | Gewichteter Wert | Wert | Gewichteter Wert |
| Manövrierfähigkeit | 0.190 | 10 | 1.90 | 9 | 1.71 | 9 | 1.71 |
| Geländegängigkeit | 0.095 | 6 | 0.57 | 8 | 0.76 | 8 | 0.76 |
| Fertigungsaufwand | 0.071 | 2 | 0.14 | 8 | 0.57 | 9 | 0.64 |
| Montageaufwand | 0.095 | 2 | 0.19 | 5 | 0.48 | 9 | 0.86 |
| Kosten | 0.190 | 2 | 0.38 | 7 | 1.33 | 5 | 0.95 |
| Modularisierbarkeit | 0.143 | 6 | 0.86 | 8 | 1.14 | 6 | 0.86 |
| Skalierbarkeit | 0.214 | 9 | 1.93 | 10 | 2.14 | 8 | 1.71 |
| | | 37 | 5.98 | 55 | 8.14 | 54 | 7.50 |

Abbildung 5.12: Gewichtete Nutzwertanalyse der drei Konzepte

net sich dieses Konzept beim Kriterium der Skalierbarkeit aus. Durch zusätzliche Module erhöht sich nicht nur die Gesamtleistung, sondern die Manövrierfähigkeit steigt bei der Erhöhung auf vier oder mehr Module auch stark, aufgrund der Möglichkeit der Implementierung eines Mecanum-Antriebes.

Konzept C erreicht durch den hohen Grad der Einfachheit bei Fertigung und Montage hohe Werte. Eingeschränkt werden diese durch die starke Abhängigkeit vom Motor. Nachdem kein Getriebe konzipiert ist, muss ein Motor mit ausreichendem Haltemoment beschafft werden, welcher durch seine Größe Komplikationen beim Einbau verursachen kann. Die Kosten sind aufgrund des Motors ebenfalls nicht unterzubewerten. Wird auf den Einsatz einer höheren Modulanzahl zum Erreichen der notwendigen Antriebskraft-

und Leistung gesetzt, summieren sich die Kosten von Motoren und Steuerungskomponenten entsprechend. Zusätzlich wirkt sich eine hohe Anzahl an Antriebsmodulen negativ auf die Gesamtkonfiguration aus, weil die Fläche steigt, was insbesondere im Inneneinsatz unerwünscht ist.

5.14 Wahl des Konzeptes

Die Konzepte B und C erreichen in der Nutzwertanalyse die höchsten Werte. Das Konzept B ist aufgrund der diskutierten Vorteile leicht zu bevorzugen. Zusätzlich zu den beschriebenen Gesichtspunkten sind beim Vergleich noch die Vorteile eines Getriebes zu beleuchten. Der konstruktive Aufwand macht sich durch die Möglichkeit des Einsatzes kleinerer, preiswerterer Motoren und die Option, größere Raddurchmesser zu verwenden mehrfach bezahlt. Das notwendige Antriebsmoment steigt mit wachsendem Rad, was sich durch Erhöhung der Getriebeübersetzung direkt ausgleichen lässt. Des Weiteren ist es im Blick auf zukünftige Weiterentwicklung des Antriebsmoduls vorteilhaft, die entsprechenden konstruktiven Probleme der Lagerung bereits früh zu lösen. Würde das Konzept C verfolgt werden, wären die Möglichkeiten der fortführenden Verbesserung beschränkt.

Aus diesen Gründen fällt die Wahl somit auf ein Konzept das im grundlegenden Aufbau dem hier erstellten Konzept B weitgehend entspricht.

6 Entwurfsphase

Nachdem in der Konzeptphase ein Lösungskonzept zur Erfüllung des Anforderungsprofils erstellt wurde, ist der nächste Schritt - der Gestaltungsprozess - durch die Beschreibung ihrer geometrischen, stofflichen und konstruktiven Merkmale definiert. Somit wird aus einem Entwurf schließlich ein herstellbares Produkt [9].

Die Gestaltung ist Teil der Produktentwicklung und lässt sich anhand der VDI 2221 in die Schwerpunkte „Gliedern in Module“, „Gestalten der Module“ und „Integrieren des gesamten Produktes“ einteilen. Demzufolge soll das Produkt in Module gegliedert werden, die separat ausgestaltet werden und schließlich zu einem Gesamtsystem zusammengeführt werden. Gestaltungsrelevante Eingangsgrößen beinhalten laut VDI 2221 in erster Linie die aus dem Anforderungsprofil extrahierten Ideen, Wünsche, Visionen, sowie auch bereits detaillierte Anwendungsfälle und Anforderungen zu Funktionen, Schnittstellen und Fertigungsverfahren.

Nachdem kein unmittelbares Vorgänger- oder Referenzprodukt existiert, stellt die Anforderungsliste das zentrale Kriterium für die Gestaltung dar.

6.1 Gliedern in Module

Das gewählte Konzept lässt sich vorerst in drei Unterbaugruppen einteilen. Dazu gehören Antrieb, Getriebe und Abtrieb. Diese sollen, soweit anfangs möglich, getrennt voneinander ausgelegt werden. Die bei der Analyse eines der drei Module ermittelten Randbedingungen bilden neue Entscheidungsgrundlagen für die weitere Ausarbeitung der zwei anderen. So soll iterativ vorgegangen werden, bis der Detaillierungsgrad weit genug fortgeschritten ist, um die Teilsysteme zusammenzufügen. Während des gesamten Gestaltungsprozesses wird CAD Modellierung als Tool zur Visualisierung und als Entscheidungshilfe in Konstruktionsfragen eingesetzt.

6.1.1 Antrieb

Der Antrieb besteht innerhalb des Antriebsmoduls aus einem bürstenlosen elektronisch kommutierten Motor. Die elektronischen Steuerungskomponenten sollen sich in einem anderen, nicht dem Antrieb zuzuordnenden Modul des Roboter-Gesamtsystems befinden. Die notwendigen Kabelkanäle sind über Bohrungen in Modulverbinderplatten realisiert. Die Wahl des Motors hängt von verschiedenen Faktoren ab. Wichtige Kriterien sind unter anderem die Dauer- und Spitzenleistungen und Momente, die Baugröße und die Anschaffungskosten.

6.1.2 Getriebe

Das Getriebe soll als Riementrieb ausgeführt werden. Innerhalb der Riementriebe gibt es verschiedene Unterbauarten, von denen die wichtigsten Vertreter Flachriemen, Keilriemen und Zahnriemen sind. Diese wiederum können jeweils weitere unterschiedliche Formen annehmen. Gestaltungsfragen bezüglich des Getriebes werden also zum einen die Wahl des Riementyps betreffen, andererseits aber auch das Übersetzungsverhältnis, die Anzahl der Getriebestufen und die Lagerung. Zum Getriebe werden alle zur Kraftübertragung notwendigen Bauteile zwischen Motor und Rad gezählt. Also alle Riemenscheiben, Wellen, Lager etc.

6.1.3 Abtrieb

Der Abtrieb erfolgt an der Endstufe des Getriebes, auf der sich das Rad befindet. Welcher Radtyp, Durchmesser, Breite, sowie Felgen- und Laufflächenmaterial gewählt wird, stellen Fragen der Abtriebsauslegung dar. Neben der Konstruktion beziehungsweise der Wahl eines Laufrades, beinhaltet dieses Gestaltungsmodul die Festlegung der Position der Radachse sowie die der Bodenfreiheit zwischen Antriebsmodulrahmen und Untergrund.

6.2 Gestalten der Module

Die Gestaltungsphase zeichnet sich dadurch aus, dass der Detaillierungsgrad der Unterbaugruppen des Produkts stetig zunimmt. Während die folgenden Kapitel im Allgemeinen auf die Entwicklung modularer Roboterantriebe weitgehend übertragbar sind, wird von nun an insbesondere auf den Bau des Funktionsprototypen Bezug genommen.

Um Entscheidungen treffen zu können, welche die Festlegung der relevanten physikalischen Parameter der einzelnen Bauteile ermöglichen, werden vorab einige Auslegungsrechnungen durchgeführt. Diese haben den Sinn, Grenzen für gewisse Parameter zu setzen. Beispielsweise könnte aus einer Berechnung hervorgehen, dass ein bestimmtes minimales Antriebsmoment oder eine bestimmte Radbreite jedenfalls notwendig ist, um eine oder mehrere der Anforderungen zu erfüllen.

Ein guter Ansatz betrefflich der Auslegung besteht darin, die extremen Fahrsituationen zu analysieren. Der Antrieb wird an unterschiedlichen Betriebspunkten eingesetzt, von denen einige ausschlaggebend für die notwendigen Motorspezifikationen, beziehungsweise die Dimensionierung der Bauteile sind.

6.2.1 Überfahren von Kanten

Ein solcher Betriebspunkt besteht sicherlich im Überfahren einer Stufe. Die Vorgabe, Kanten einer Höhe von 20mm überfahren zu können, geht direkt aus der Anforderungsliste hervor. Besteht der Anspruch, Kanten aus dem Stillstand zu bewältigen, also aus einer statischen Position, in der ein oder mehrere Räder die Kante an einem Punkt berühren, ergibt sich so ein mögliches Auslegungskriterium für das maximal notwendige Antriebsmoment. Zusätzlich können noch das Laufflächenmaterial und die Verformbarkeit des Reifens eine Rolle spielen.

Betrachtet man die beschriebene Situation, lässt sich das notwendige Drehmoment folgendermaßen abschätzen:

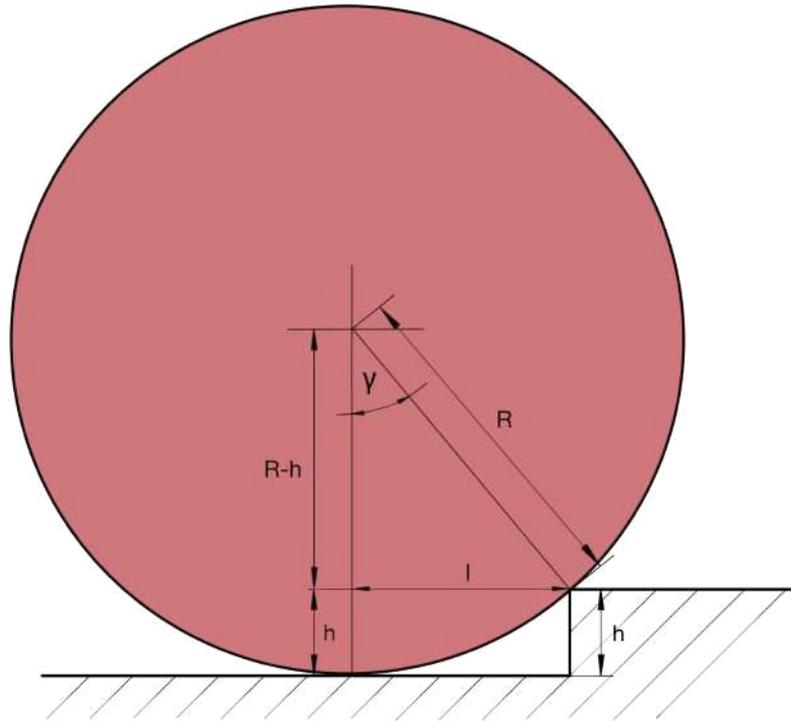


Abbildung 6.1: Geometrie der Auffahrt auf einen Absatz

In Abbildung 6.1 sind die geometrischen Beziehungen zwischen Stufenhöhe und Radgeometrie ersichtlich.

Aus

$$l^2 + (R - h)^2 = R^2$$

folgt

$$l = \sqrt{2Rh - h^2} \quad (6.1)$$

Zum Zeitpunkt an dem ein Antriebsrad an eine Stufe trifft, verschiebt sich der Momentanpol der Rollbewegung vom Aufstandspunkt an der Radstelle im Kontakt mit dem Boden, zur Stufenkante. Betrachtet man nun die Kräfte, die in diesem Moment auf das Antriebsrad wirken (siehe Abbildung 6.2), errechnet sich die notwendige Umfangskraft gemäß

$$\frac{F_U}{l} = \frac{F_G}{R}$$

mit (6.1) zu

6 Entwurfsphase

$$F_U = \frac{\sqrt{2Rh - h^2}}{R} \cdot F_G \quad (6.2)$$

Das notwendige Antriebsmoment pro Modul $M_W = F_U \cdot R$ ergibt sich dann zu

$$M_W = F_{ZW} \cdot \sqrt{2Rh - h^2} \quad (6.3)$$

wobei F_{ZW} die Gewichtskraft gemäß

$$F_{ZW} = \frac{m_{F0}}{n} \cdot g$$

anteilig berücksichtigt, mit m_{f0} der Masse des unbeladenen Fahrzeugs und n als Anzahl der Antriebe. Die Annahme, dass die Summe der Radlasten der Antriebsräder dem Gesamtgewicht des Fahrzeugs entspricht, macht diese Berechnung konservativ.

Soll die Kante aus dem Stillstand überfahren werden, müssen zusätzlich noch die Trägheitskräfte mit einbezogen werden. Die Trägheitsmomente der rotierenden Bauteile werden hierbei über den Faktor $\phi_r = 1.1$ berücksichtigt.

Damit erweitert sich das Antriebsmoment zu

$$M_W = F_{ZW} \cdot \sqrt{2Rh - h^2} + \left(\phi_r \cdot \frac{m_{F0}}{n} \cdot a_{St}\right) \cdot R \quad (6.4)$$

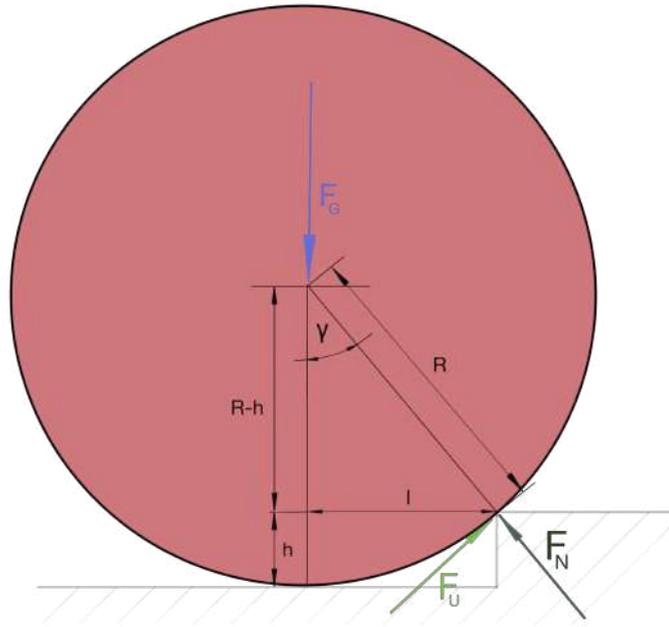


Abbildung 6.2: Kräfte am Antriebsrad bei Auffahrt auf eine Stufe

Damit beim Überfahren einer Kante die Haftung des Laufflächenmaterials am Untergrund gewährleistet ist, muss die Bedingung $F_U \leq \mu \cdot F_N$ erfüllt sein. Entsprechend beträgt die maximal übertragbare Kraft am Berührungspunkt

$$F_U = \mu \cdot F_N \approx \mu \cdot \cos(\gamma) \cdot F_G = \mu \cdot \frac{R-h}{R} \cdot F_G \quad (6.5)$$

wobei $F_G = F_{ZW}$ angenommen wird.

Abbildung 6.3 zeigt das benötigte Antriebsmoment pro Modul (bei $n = 2$) nach (6.4), sowie das übertragbare Moment zur Umfangskraft (6.5) in Abhängigkeit des Antriebsraddurchmessers.

Dieser Vergleich legt nahe, dass Antriebsraddurchmesser $d > 250\text{mm}$ notwendig sind.

Bei einem Durchmesser von $d = 250\text{ mm}$ ergibt sich das notwendige Moment pro Antriebsrad (bei $n = 2$) zu $M_W = 14.7\text{ Nm}$.

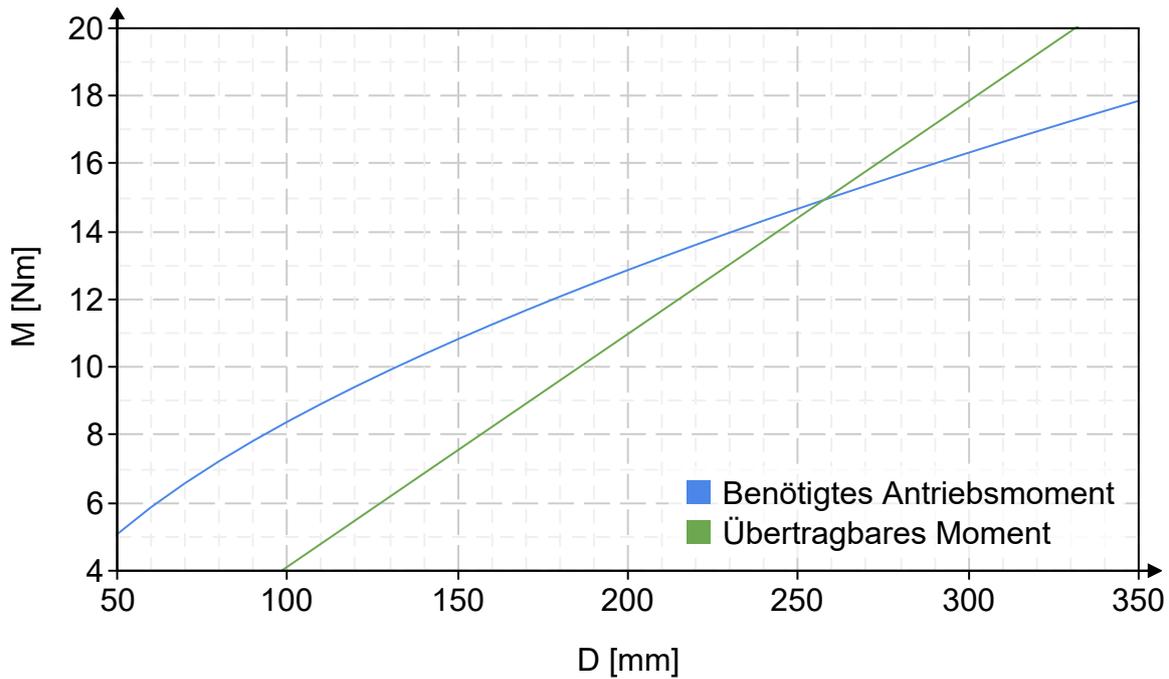


Abbildung 6.3: Vergleich des benötigten und übertragbaren Momentes am Antriebsrad bei Auffahrt auf eine Kante, $m_{F0} = 40 \text{ kg}$, $a_{St} = 0.5 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$, für Materialpaarung Gummireifen-Beton $\mu = 0.7$

Aus den Berechnungen bezüglich des Betriebspunktes des Anfahrens an einer Kante, gehen also gleich zwei wichtige Randbedingungen hervor. Zum einen ein Richtwert für den Raddurchmesser $d \approx 250 \text{ mm}$, und zum anderen das notwendige Drehmoment am Antrieb $M_W \approx 15 \text{ Nm}$.

Nicht nur mechanische Zusammenhänge können aus der Stufenfahrt abgeleitet werden. Auch geometrische Bedingungen ergeben sich in dieser Fahrsituation. So besteht eventuell die Gefahr, dass bei kantenbedingter Schräglage des Chassis, dessen Hinterkante am Boden aufliegt. Um dies zu überprüfen soll eine Skizze mit den geometrischen Zusammenhängen angefertigt, und daraus konstruktive Randbedingungen abgeleitet werden.

Gesucht ist eine Beziehung zwischen Raddurchmesser, Kantenhöhe, Achsabstand und Position der Räder. Abbildung 6.4 veranschaulicht den Zusammenhang. Beim Auffahren auf eine Stufe, darf die hintere Kante des Chassis nicht in Kontakt mit dem Untergrund kommen. Daraus ergibt sich ein Maximalabstand zwischen Radachse und Hinterkante des Fahrzeugs, der von den oben genannten Größen in folgender Weise abhängt.

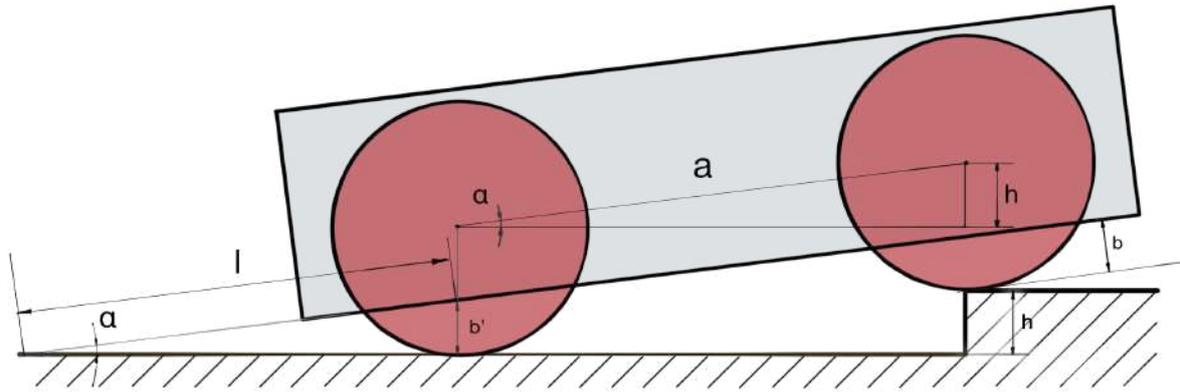


Abbildung 6.4: Überfahren einer Stufe

Nachdem $h \ll a$ gilt (Die Kantenhöhe h beträgt maximal 20mm, während der kleinstmögliche Achsabstand a bei 160mm liegt), kann in hinreichender Näherung angenommen werden, dass auch $b' \approx b$ gilt. Daraus folgt

$$\sin(\alpha) = \frac{b'}{l}$$

und mit $\sin(\alpha) = \frac{h}{a}$ und $b' \approx b$ ergibt sich

$$\frac{h}{a} = \frac{b}{l}$$

Geht man davon aus, dass $b \approx h$ gewählt wird, darf also der Abstand zwischen Hinterachse und Hinterkante des Fahrzeugs nicht größer sein als der Abstand zwischen den beiden Achsen.

Es muss also gelten:

$$l < a$$

6.2.2 Räder

Da das Konzept auf un gelenkte Antriebsräder setzt, besteht die einfachste Möglichkeit - das heißt, diejenige mit der geringsten Anzahl an Antriebsmodulen - darin, einen Differentialantrieb zu implementieren. Für die erste Version des Prototypen wird ein solcher entwickelt. Ein Differentialantrieb besteht im prinzipiellen Aufbau aus zwei Antriebsrädern, die geometrisch auf derselben Achse liegen, aber unabhängig voneinander gesteuert werden können. Um dies mit konstruktiv identischen Antriebsmodulen zu realisieren,

muss die Radachse in der Mittelebene des Moduls liegen. Geht man von einer Bodfreiheit $b > 20 \text{ mm}$ aus, wird die genaue Lage der Achsposition weiter eingeschränkt. Gemäß Abbildung 6.3 kann für den Raddurchmesser der Wert $d = 250 \text{ mm}$ gewählt werden. Entsprechend des jeweiligen Einsatzgebietes, kann es vorteilhaft sein, Luftreifen einzusetzen, wenn deren federnde Eigenschaften erforderlich sind.

Eine andere Variante, die geringere Rollwiderstände aufweist, besteht im Einsatz von Vollgummireifen. Diese zeichnen sich unter anderem durch erhöhte Abriebfestigkeit aus. Um die hohen geforderten Radlasten aufnehmen zu können, wird ein Radkörper aus einer Aluminiumlegierung gewählt. Gegenüber Stahlradkörpern weisen diese eine geringere Masse auf, was sich positiv auf das Trägheitsmoment auswirkt, und sind korrosionsbeständig. Bei der Wahl der Räder muss darauf geachtet werden, dass die vom Hersteller in den Datenblättern angegebenen maximalen Tragfähigkeit ausreichend groß sind.

Um das Drehmoment von der Abtriebswelle auf die Radnabe zu übertragen gibt es mehrere Möglichkeiten. Nachdem die Räder einfach austauschbar sein sollen, wird auf eine unaufwändige Demontage besonderer Wert gelegt. Um den Fertigungsaufwand gering zu halten, wird eine Verbindung mittels Spannsätzen gewählt. Diese sind mit geringem Aufwand lösbar, sichern die Nabe zusätzlich gegen axiale Verschiebung und erfordern abgesehen von den Passflächen keine weiteren Fertigungsschritte an Welle oder Nabe.

6.2.3 Notwendiges Übersetzungsverhältnis

Geht man vom errechneten Drehmoment $M \approx 15 \text{ Nm}$ aus, ergibt sich abhängig vom an der Motorwelle verfügbaren Spitzenmoment die notwendige Getriebeübersetzung. Abbildung 6.5 stellt den Zusammenhang grafisch dar, wobei von einem Wirkungsgrad $\eta_G = 0.9$ ausgegangen wird. Dieser geschätzte Wirkungsgrad berücksichtigt alle Getriebeverluste, die zwischen Motorwelle und Abtriebswelle auftreten.

Innerhalb der Zugmitteltriebe zeichnet sich der Zahnriemen durch schlupffreiheit aus. Besonders bei präzisen Anwendungen kommt er deshalb bevorzugt zum Einsatz. Damit die Positionierungsgenauigkeit nicht beeinträchtigt wird, ist ein konstantes Übersetzungsverhältnis durch die formschlüssige Kraftübertragung des Zahnriemens unabdingbar.

Aus Abb. 6.5 lässt sich ableiten, dass Motorhaltemomente ab $M_H \approx 1.6 \text{ Nm}$ in Frage kommen, damit das notwendige Übersetzungsverhältnis nicht zu hoch wird. Wird ein Motor am unteren Ende dieses Spektrums eingesetzt, wird eventuell eine zweistufige Getriebeübersetzung notwendig.

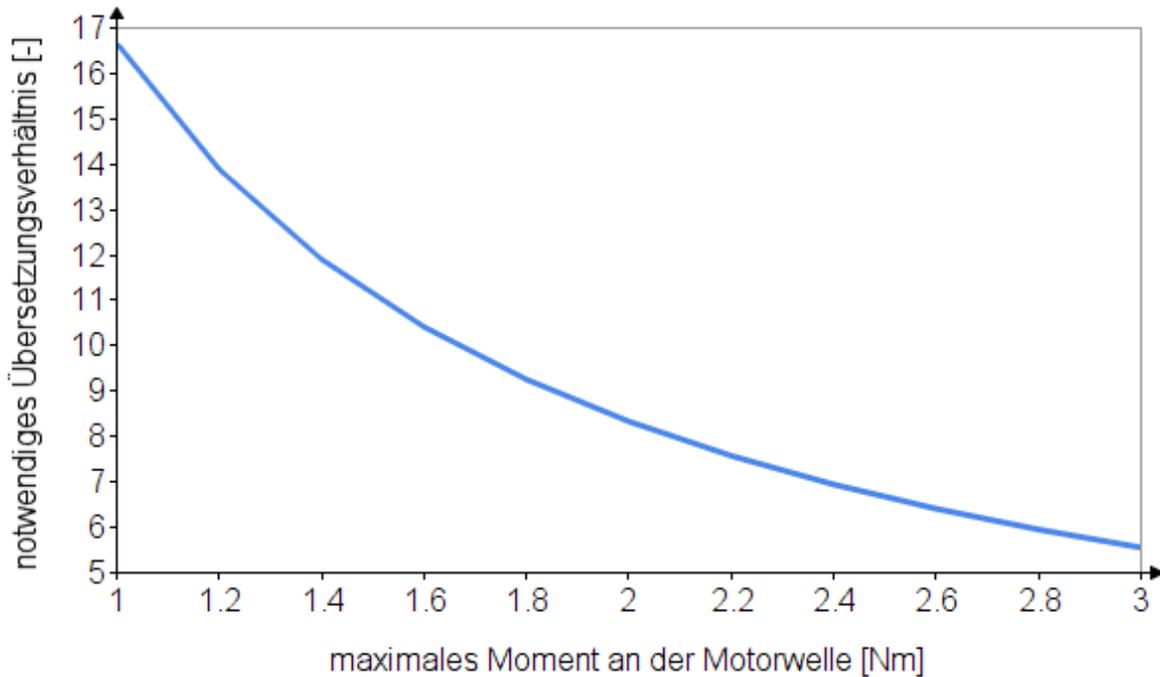


Abbildung 6.5: Zusammenhang zwischen Motor-Haltemoment und notwendigem Übersetzungsverhältnis

6.2.4 Auswahlkriterien des Motors

Ein als Servomotor betriebener elektronisch kommutierter Synchronmotor soll gemäß der Konzeptplanung zum Einsatz kommen. Neben dem ermittelten kleinsten Haltemoment von $M_H > 1.6 \text{ Nm}$ ist zusätzlich der einstellbare Drehzahlbereich relevant. Um die geforderte Maximalgeschwindigkeit $v_{max} = 1.5 \text{ m/s}$ erreichen zu können muss der entsprechende Betriebspunkt dauerhaft angefahren werden können. Es wird davon ausgegangen, dass die Geschwindigkeitsanforderung bei Fahrt in der Ebene gilt, woraus sich mit dem Fahrwiderstand in der Ebene nach 6.6 ein von der Übersetzung abhängiger Betriebspunkt ergibt.

Der Radwiderstand kann gemäß [47, 4.1] als Produkt aus der Aufstandskraft und dem Rollwiderstandsbeiwert berechnet werden. Mit einer Fahrzeugmasse von $m_f = 100 \text{ kg}$ und einem abgeschätzten Rollwiderstandsbeiwert gemäß der Materialpaarung Gummireifen-Beton $f_R = 0.01$ ergibt sich für den Rollwiderstand:

$$F_R = f_R \cdot m_f \cdot g \approx 10 \text{ N} \quad (6.6)$$

Dieser Widerstand ist bei den niedrigen Geschwindigkeiten und bei unbeschleunigter Fahrt in der Ebene dominant und kann daher als Auslegungsgröße für die Drehzahlberechnung herangezogen werden.

Bei einem Raddurchmesser von $d = 250 \text{ mm}$ ergibt sich das Moment an der Abtriebswelle zu

$$M_{0R} = F_R \cdot \frac{d}{2 \cdot n} = 0.6 \text{ Nm} \quad (6.7)$$

Wird jeweils von der minimal notwendigen Übersetzung nach Diagramm 6.5 ausgegangen, folgt aus jedem Motorhaltmoment M_H eine Übersetzung i und ein Motorbetriebspunkt mit der Drehzahl

$$n_0 = \frac{2 \cdot v_{max}}{d} \cdot i \quad (6.8)$$

und dem Drehmoment

$$M_0 = \frac{M_{0R}}{\eta_G \cdot i} \quad (6.9)$$

Diagramm 6.6 stellt diesen Betriebspunkt - die Fahrt in der Ebene mit Zuladung und Maximalgeschwindigkeit - dar.

Bei der Auswahl eines Motors muss also zuerst mit Diagramm 6.5 aus dem Haltmoment eine notwendige Getriebeübersetzung bestimmt werden und danach für die ermittelte Übersetzung mit Hilfe von Diagramm 6.6 der Betriebspunkt der ebenen Fahrt überprüft werden.

Dieser muss für den Motor thermisch unbedenklich dauerhaft ertragbar sein. Andere Betriebspunkte, wie Beschleunigungsmanöver oder Fahrt auf Steigungen sind nur kurzfristig möglich, da kein Kühlsystem für den Motor vorgesehen ist.

Für den Prototypenbau wurde ein vorhandener Servomotor der Firma Beckhoff vom Typ AM8112 herangezogen, anhand dessen wird die Eignungsprüfung für das Antriebsmodul nun durchgeführt.

Aus dem Datenblatt geht ein Haltmoment von 1.36 Nm hervor, woraus sich eine notwendige Übersetzung von $i \approx 12$ ergibt. Der resultierende Motorbetriebspunkt aus Diagramm 6.6 liegt demnach bei $n_0 \approx 1400 \frac{1}{\text{min}}$ und $M_0 \approx 55 \text{ Nmm}$. Die Motorkennlinie

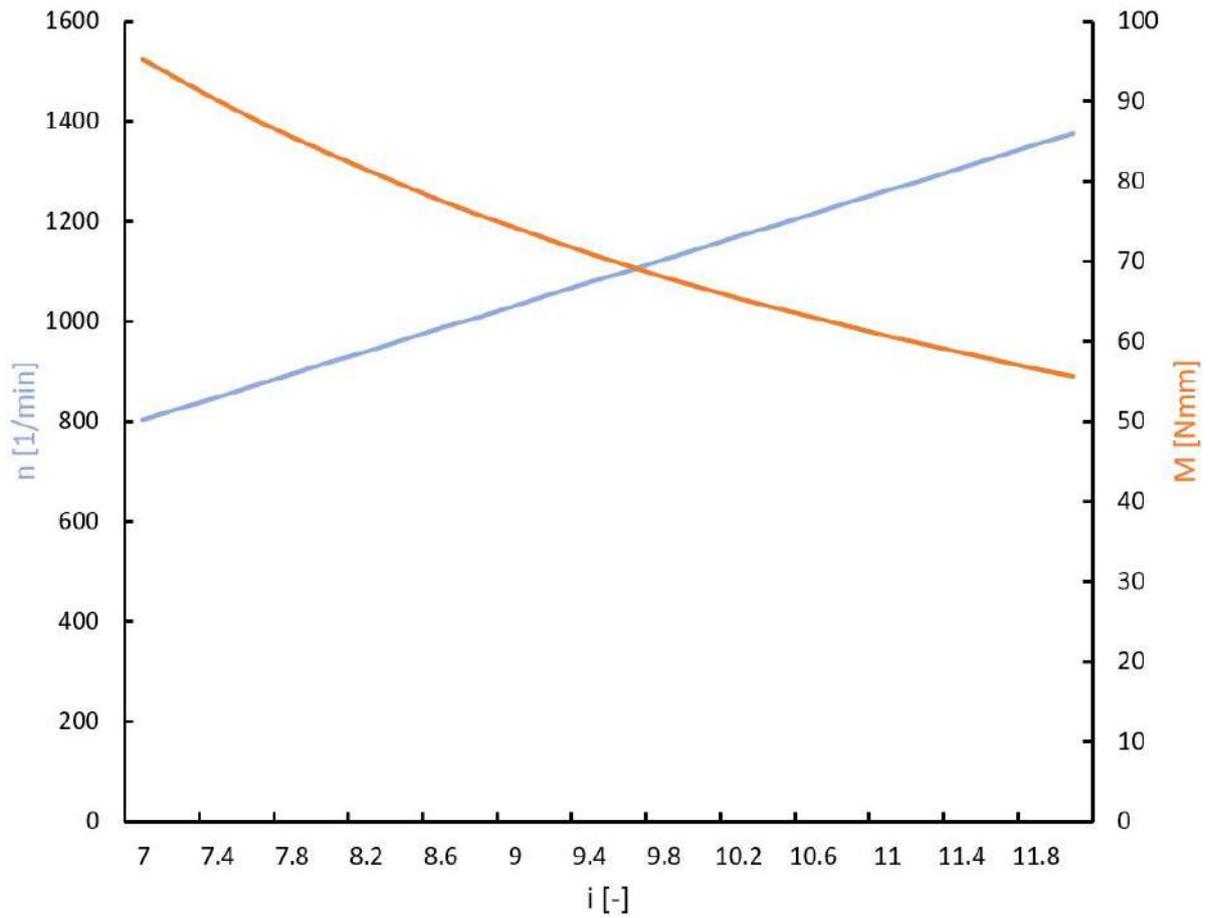


Abbildung 6.6: Vergleich der für den Betriebspunkt notwendigen Drehzahl/Drehmoment Kombinationen

(vgl. Abb. 6.7) zeigt, dass dieser Betriebspunkt nur leicht oberhalb des Nennpunktes des Motors liegt. Der Motor ist also für den Einsatz im Antriebsmodul geeignet.

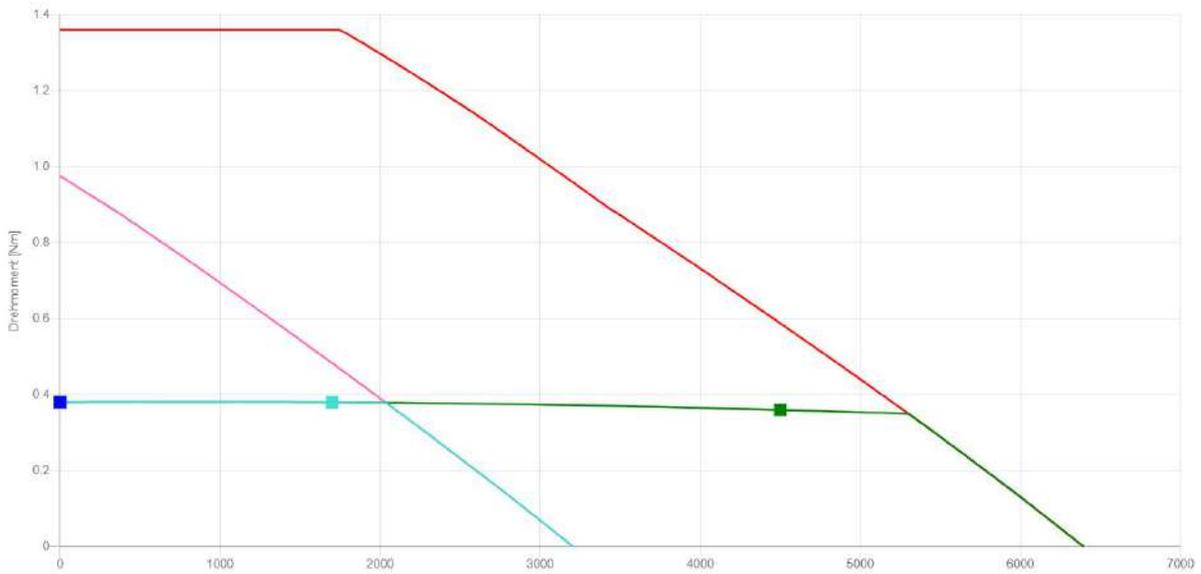


Abbildung 6.7: Kennlinie des Beckhoff AM8112 [48]

6.2.5 Auslegung des Riementriebs

Die Synchronriemenauslegung erfolgt nach [38, Kap.16].

Aufgrund der hohen Zielübersetzung von 12, wird ein zweistufiger Riementrieb ausgelegt. Die Ergebnisse dieser Rechnung (vgl. Tabelle 6.1) führte auf die Wahl folgender Riemenscheiben und Zahnriemen:

| | Zähnezahl | Durchmesser/Riemenlänge |
|------------------------------|-----------|-------------------------|
| Stufe 1: Breite 10 mm | | |
| Riemenscheibe klein | 14 | 22.29 mm |
| Riemenscheibe groß | 60 | 95.52 mm |
| Riemen T5 | 70 | 350 mm |
| Stufe 2: Breite 25 mm | | |
| Riemenscheibe klein | 18 | 28.65 mm |
| Riemenscheibe groß | 48 | 76.42 mm |
| Riemen T5 | 65 | 325 mm |

Tabelle 6.1: Ergebnisse der Auslegungsrechnung des Riementriebs

Durch die Wahl dieser Riemenscheiben ergibt sich für das Übersetzungsverhältnis der ersten Riemenstufe

$$i_1 = \frac{z_2}{z_1} = \frac{60}{14} = 4.286$$

und für die Zweite

$$i_2 = \frac{z_4}{z_3} = \frac{48}{18} = 2.667$$

Daraus folgt die Gesamtübersetzung

$$i = i_1 \cdot i_2 = 11.43$$

6.2.6 Riemenspannung & Lagerung

Die Lagerung der Wellen erfolgt über Gehäuselagereinheiten, die sich besonders deshalb gut eignen, weil die Rahmenkonstruktion der Prototypenmodule aus Aluminiumprofilen mit Nuten besteht. Durch Nutensteine lassen sich Stehlager verschieblich am Rahmen befestigen, was gleichzeitig die Riemenspannung gewährleistet. Die Befestigung des Motors erfolgt mittels einer Montageplatte innerhalb der das Motorgehäuse vertikal verschiebbar befestigt werden kann. Dadurch können die Spannungen der beiden Zahnriemen unabhängig voneinander eingestellt werden. In den Abbildungen 6.8 und 6.9 ist die 3D-CAD-Konstruktion des Antriebsmoduls zu sehen. Abbildungen 6.10 und 6.11 zeigen den fertigen Prototypen.

Damit das System als Differentialantrieb, mit zwei Antriebsmodulen, fahrbar ist, wird ein zusätzlicher Aufstandspunkt benötigt. Dafür werden Lenkrollen eingesetzt, die in verschiedenen Ausführungen bei unterschiedlichen Anbietern verfügbar sind. Um die Geländegängigkeit leicht zu erhöhen, und beim Einsatz mit zwei Lenkrollen besseren Bodenkontakt zu gewähren, wird auf eine gefederte Lenkrollenvariante gesetzt. Diese wird mittels einer Verbinderplatte an einem würfelförmigen Modul befestigt.

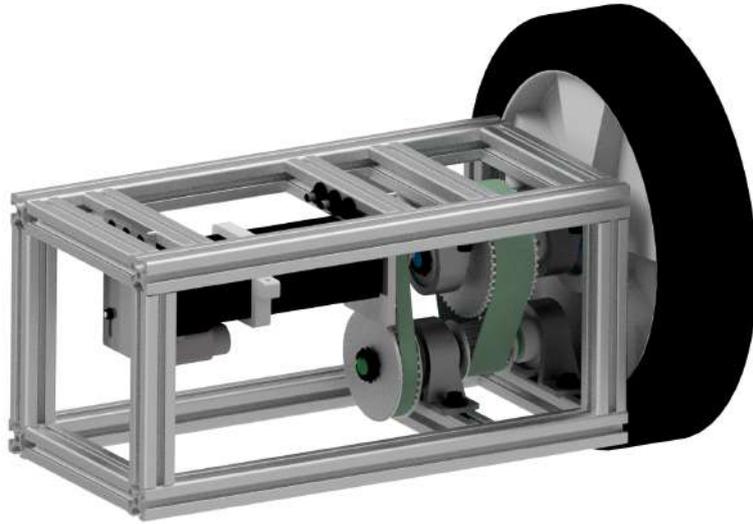


Abbildung 6.8: CAD Modell des Antriebsmoduls

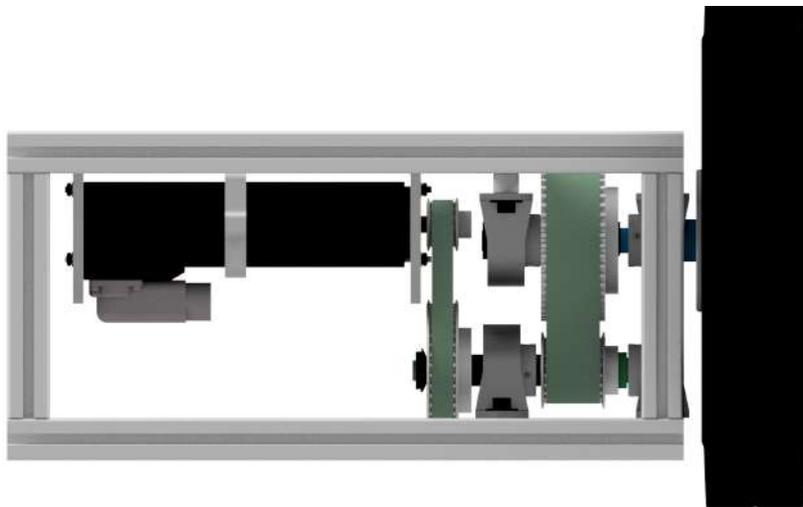


Abbildung 6.9: CAD Modell des Antriebsmoduls in Vorderansicht

6 Entwurfsphase

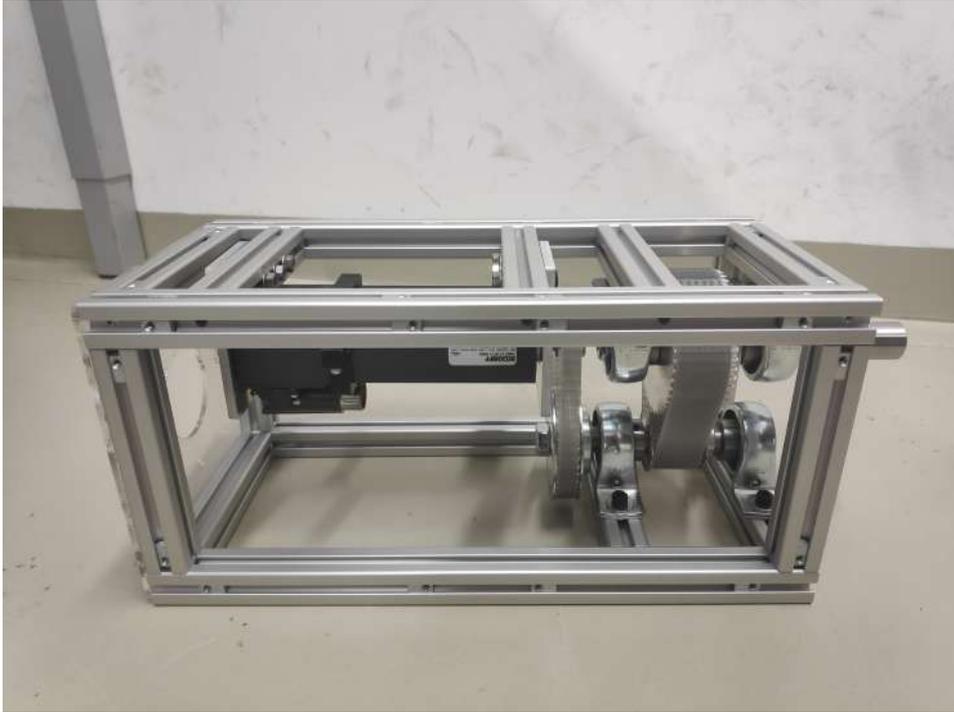


Abbildung 6.10: Fertiger Prototyp des Antriebsmoduls



Abbildung 6.11: Fertiger Prototyp des Antriebsmoduls in Vorderansicht

7 Tests mit dem Prototypen

Um die während der Gestaltungsphase durchgeführten Berechnungen sowie die Annahmen und Bewertungen der Konzeptphase zu verifizieren, ist die Durchführung von Tests zur Überprüfung der Funktionen ein geeignetes Hilfsmittel. Die isolierte Überprüfung des Antriebsmodul ist dabei nicht ausreichend, begründet durch den Fokus, der in der gesamten Entwicklung auf die Fähigkeit des Überfahrens von Kanten gelegt wurde. Nicht ausschließlich als Beweis für eine inhaltlich und methodisch konsistente Vorgangsweise in der Produktentwicklung, sondern vielmehr als Instrument der Fehlersuche und -identifikation, sollen Tests mit dem Prototypen dienlich sein. Obwohl durch strukturierte und physikalisch fundierte Konstruktions- und Konzeptionsarbeit viele Fehlerquellen umgangen werden können, zeigt sich dennoch erst am fertigen Produkt, an welchen Stellen Verbesserungspotential besteht.

Bei der Durchführung von Tests ist es wichtig, dass vorab geklärt wird, *was* genau getestet werden soll [49]. Fast jeder Prototyp erfüllt seine Hauptfunktion in gewisser Weise. Um besonders an den kritischen Stellen Unzulänglichkeiten des Konzepts oder der Konstruktion zu identifizieren, sollten eben diese am Genauesten überprüft werden. Deshalb werden genaue Fragen formuliert, nach deren Antworten durch Funktionstests gesucht werden soll.

Die Erkenntnisse die während dieser Tests gewonnen werden stellen jedoch nicht die einzigen wertvollen Informationen für zukünftige Entwicklungen dar. Jede Auffälligkeit, die während der Gestaltungsphase sowie danach, beim Zusammenbau des Prototypen, Verbesserungspotential aufgezeigt hat, sollte dokumentiert werden. In Kapitel (9) wird insbesondere auf all jene Erkenntnisse eingegangen, die nicht aus den Funktionstests am fertigen Prototypen hervorgegangen sind.

Die Fragen, die jedoch während der Tests beantwortet werden sollen lauten:

- Ist der Roboterantrieb der Testkonfiguration im Stande, aus dem Stillstand Kanten mit einer Höhe von bis zu 20mm zu überwinden?
- Auf einer Ebene mit welcher maximalen Steigung kann der Roboter aus dem Still-

stand beschleunigen?

Die Funktionstests beschränken sich bewusst auf Situationen, in denen die höchsten Antriebsmomente gefordert sind, weil diese für die Auslegung die größte Rolle spielen.

7.1 Testkonfiguration

Um die zwei zusammengebauten Antriebsmodule innerhalb eines fahrbaren Systems zu testen, wurde eine Konfiguration erstellt, die eine möglichst geringe Anzahl an Modulen beinhaltet. Sie besteht aus zwei Antriebsmodulen im Differentialantrieb, zwei gefederten Stützradmodulen, einem Kontrollmodul, das die elektrischen Steuerungskomponenten enthält und Chassismodulen, die die restliche Grundfläche des mobilen Roboters auf eine rechteckige Konfiguration ergänzen. Das Testsystem ist in Abbildung 7.1 dargestellt. Die Konfiguration ließe sich durch das Weglassen eines der Stützradmodule vereinfachen, wurde aber absichtlich mit zweien ausgestattet, um eventuelle Probleme des Bodenkontaktverlustes offenzulegen.



Abbildung 7.1: Testkonfiguration des mobilen Roboters mit zwei Antriebsmodulen als Differentialantrieb

7.2 Aufbau der Tests

Zur Beantwortung der gestellten Funktionsfragen wurden zwei einfache Testaufbauten erstellt.

Für die erste Testserie, die **Kantenauffahrt**, wurden Platten einer Stärke von je 10mm schrittweise aufeinandergelegt, um verschiedene Kantenhöhen zu realisieren. Die Antriebsräder wurden jeweils zu Testbeginn so positioniert, dass sie die Kante je an einer

Linie berühren, entsprechend der Abbildung 7.2. Durch diesen Aufbau kann in sehr guter Näherung jenes Szenario nachgestellt werden, das für die Berechnungen des notwendigen Spitzenmoments ausschlaggebend war. In Abbildung 7.3 ist der Aufbau während einem der Tests zu sehen.

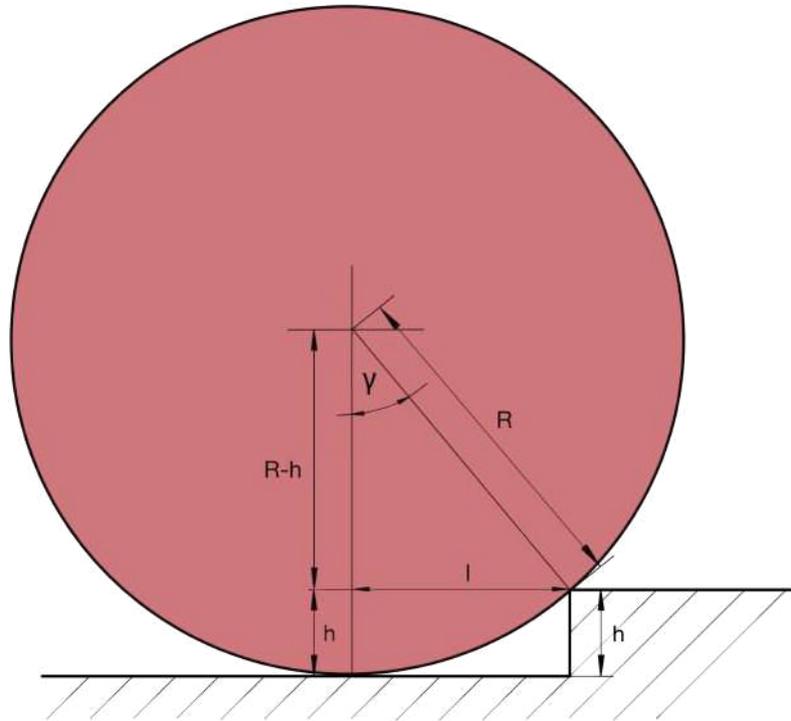


Abbildung 7.2: Prinzipskizze der Funktionstests der Kantenauffahrt

Der zweite Testaufbau zur Durchführung der Testserie **Rampenfahrt**, umfasste eine in unterschiedlichen Höhen durch Aufbau von Normpaletten erstellte Rampe. Deren Steigung wurde dann schrittweise erhöht. Der prinzipielle Aufbau entspricht der Skizze in Abbildung 7.4 und ist in Abbildung 7.5 während der Durchführung einer Testfahrt dargestellt.

Für beide Testserien wurde ein einfaches Programm verwendet, das nach Start eine Repositionierung um eine volle Umdrehung der Antriebsräder durchführt, wobei ein rampenförmiges Geschwindigkeitsprofil hinterlegt (also konstante Beschleunigung) ist. Das Steuerungssystem ist mit mehreren Sicherheitsfeatures ausgestattet, die bei Überschreiten von festgelegten Grenzwerten für Strom, Temperatur, Schleppabstand, etc. die Motorbremse aktivieren und somit weitere Bewegung verhindern.

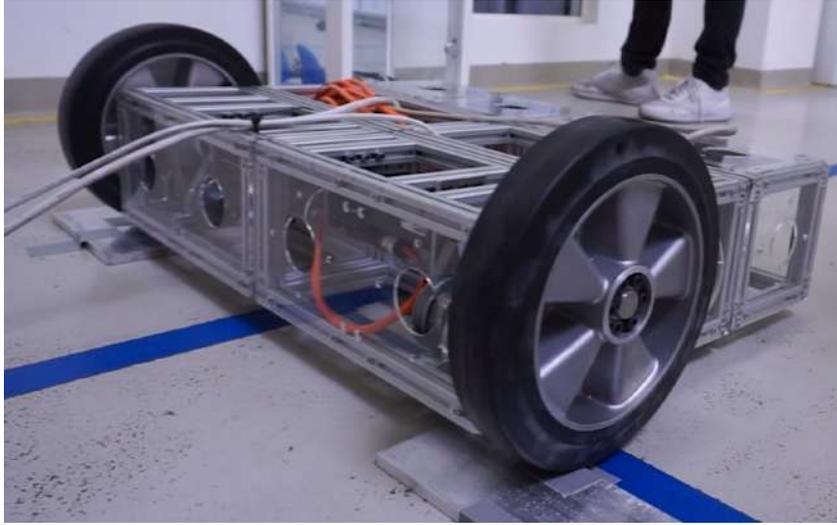


Abbildung 7.3: Funktionstest der Kantenauffahrt

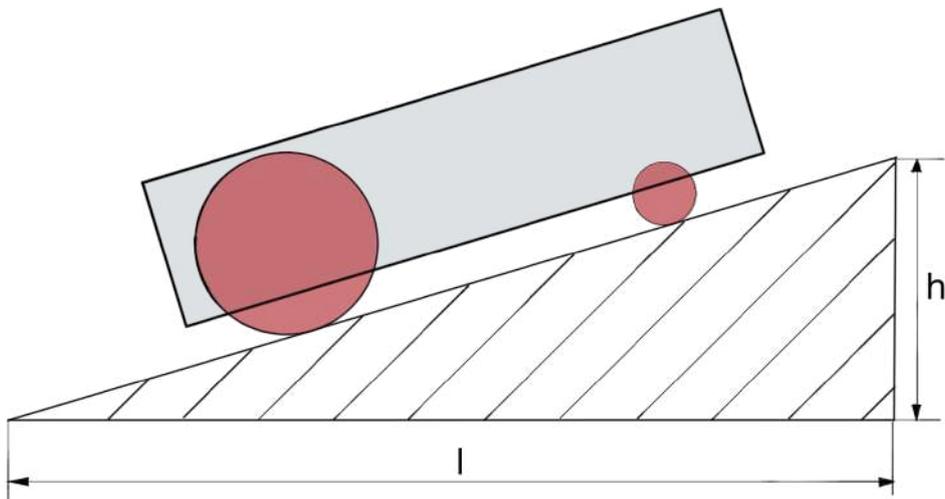


Abbildung 7.4: Prinzipskizze der Funktionstests der Rampenfahrt

7 Tests mit dem Prototypen



Abbildung 7.5: Funktionstest der Rampenfahrt

7.3 Testergebnisse

Versuche am ersten Testaufbau verliefen positiv bis zu einer Kantenhöhe von 20mm. Bei größeren Höhen waren Haftungsprobleme zu bemerken und die Antriebsräder drehten durch. Erfolgte die Beschleunigung bereits leicht vor der Kante, waren auch Kantenhöhen von 30mm bewältigbar.

Diese Resultate decken sich mit den aus Berechnungen zu entnehmenden Erwartungswerten, insbesondere mit der Abschätzung des notwendigen Raddruchmessers und dem daraus resultierenden maximal übertragbaren Moment. Die durch die Betriebssoftware gemessenen Werte für das Drehmoment deckten sich größtenteils mit den aus der Berechnung hervorgegangen. Das Überfahren von Kanten mit einer Anfangsgeschwindigkeit $v > 0$ wurde nicht rechnerisch behandelt und stellte daher nur einen zusätzlichen, undokumentierten Versuch dar.

Die Versuche an der Rampe zeigten, dass die Testkonfiguration selbst die maximale Steigung von 16.8% bewältigen konnte. Das errechnete notwendige Drehmoment pro Antriebsrad ergibt sich bei der Testaufbausteigung mit einer Fahrzeugmasse von $m_F = 30 \text{ kg}$, der eingestellten Beschleunigung von $a = 1 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$ und einem angenommenen Rollwiderstandbeiwert von $f_R = 0.01$ zu $M_S \approx 14 \text{ Nm}$. Dies liegt signifikant unterhalb dem möglichen Spitzenmoment, weshalb die Ergebnisse sich auch hier mit den Erwartungen decken.

Das Anforderungsprofil schreibt eine Maximalsteigung von 6% in vollbeladenem Zustand $m_F = 100 \text{ kg}$ vor. Weitere Tests mit erhöhter Fahrzeugmasse beziehungsweise komplexeren Versuchsaufbauten mit höheren Steigungen könnten auch die Möglichkeit der Erfüllung dieser Vorgabe verifizieren. Aus Sicherheitsgründen wurde von zu großen Rampenhöhen abgesehen, da der Prototyp trotz der kompakten Konfiguration dennoch eine Masse von über 20kg aufweist.

8 Diskussion und Ergebnisse

Das Ergebnis der Arbeit stellt Prototypen, jeweils in Stückzahl zwei, eines Antriebsmoduls und eines Rollenmoduls dar.

Das Antriebsmodul (Modulgröße 160mmx160mmx320mm) besteht aus einem elektronisch kommutierten Motor, der über einen zweistufigen Synchronriementrieb mit der Abtriebswelle verbunden ist, auf der sich, außerhalb des Modulrahmens, ein demontierbares Rad mit Aluminiumfelge und Vollgummireifen befindet.

Das Rollenmodul (Modulgröße 160mmx160mmx160mm) besteht aus einer gefederten, 360° drehbaren Lenkrolle, die mittels einer Verbindplatte am Modulrahmen befestigt ist.

Der Prototypenbau, alle Funktionstests sowie die Erstellung des Testprogramms erfolgten an der Pilotfabrik der TU Wien, Seestadtstraße 27/3, 1220 Wien. Die Modulentwicklung basierte auf ausführlicher Recherche, Konzepterstellung, berechnungsgestützter Gestaltung und CAD-Konstruktion in Autodesk Inventor 2021.

8.1 Diskussion der Forschungsfragen

In diesem Abschnitt sollen die zu Beginn aufgeführten Forschungsfragen aufgegriffen, und auf deren Beantwortung eingegangen werden.

Wie kann ein Antriebsmodul aussehen, damit es in das Gesamtsystem eines modularen mobilen Roboters sinnvoll integriert werden kann?

Die Entwicklung einer modularen Komponente eines Gesamtsystems bedarf der Berücksichtigung der Integrationsfähigkeit. Während den Entwicklungsphasen muss die spätere Zusammenführung mit den restlichen Systemkomponenten bedacht werden.

Welchen Umfang an Funktionen muss ein Antriebsmodul für einen modular aufgebauten mobilen Manipulator besitzen?

Der Funktionsumfang wurde in Form eines Anforderungsprofils, das sich auf eine Prototypenversion bezieht, definiert. Sowohl quantifizierbare Funktionsanforderungen, wie

Zielwerte für Geschwindigkeit oder Maximalhöhe überfahrbarer Kanten, als auch nicht-quantifizierbare Ziele, wie etwa der Grad der Rekonfigurierbarkeit und der Wartbarkeit, wurden dargelegt.

Auf welche Art und Weise lässt sich dieser Funktionsumfang an unterschiedliche Einsatzszenarien anpassbar bereitstellen?

Durch den rekonfigurierbaren Aufbau des Antriebsmoduls bleibt eine hohe Anpassbarkeit des Funktionsumfangs gegeben. Sollten zusätzliche Anforderungen entstehen, besteht die Möglichkeit, durch Umbauarbeiten niedriger Komplexität, das Funktionsprofil zu erweitern beziehungsweise abzuändern. Insbesondere die Wahl der Radpositionierung trägt dazu maßgeblich bei.

Wo liegen die Stärken beziehungsweise Schwächen verschiedener Konzepte modularer Antriebe mobiler Manipulatoren?

Innerhalb der Konzepterstellung und der Aufstellung der relevanten Bewertungskriterien wurden die Vor- und Nachteile verschiedener Antriebslösungen ausführlich behandelt. Ausgehend von Veröffentlichungen auf dem Gebiet der Antriebe der modularen mobilen Robotik und den physikalischen Grundlagen der verwendeten Komponenten, konnte eine Lösung gefunden werden, die deren Stärken nutzt.

Wie kann ein Antriebsmodul aussehen, damit es in das Gesamtsystem eines modularen mobilen Roboters sinnvoll integriert werden kann?

Durch Beachtung der vorgeschlagenen Systemgrenzen bezüglich der Modulform und -größe, ist das entwickelte Antriebsmodul modular und unter Verwendung der einheitlichen Gesamtschnittstellen problemlos integrierbar. Keine zusätzlichen Montagekomponenten oder -werkzeuge sind notwendig. Die nahtlose Integration in das Gesamtsystem ist möglich, weil während der Bewertungsphase der Konzepte Wert auf einen hohen Grad an Modularität, geringen Montageaufwand und breite Anpassbarkeit gelegt wurde.

9 Fazit und Ausblick

Die Modularisierungsstrategie in der Produktentwicklung war zentrales Merkmal dieser Arbeit. Die Möglichkeit einzelne Komponenten in großem Maße unabhängig von vielen anderen Konzeptentscheidungen und Konstruktionsdetails des Gesamtsystems sowie anderer Teilsysteme zu entwickeln brachte viele Vorteile mit sich. Dennoch hat sich gezeigt, dass eine konstruktive und inhaltlich informative Kommunikation mit am Projekt beteiligten Kollegen nicht vernachlässigt werden darf. Beim Separieren der Teilentwicklungen läuft man Gefahr, in wichtigen Fragen aneinander „vorbeizuarbeiten“, was aber durch gutes Kommunikations- und Teammanagement fast immer umgangen werden konnte. Regelmäßige Projektmeetings stellten sich als wichtiges Hilfsmittel heraus, um den Beteiligten einen Überblick über den Gesamtfortschritt beziehungsweise Probleme anderer Teilentwicklungen zu ermöglichen. Die Bedeutsamkeit der Vorabdefinition von klaren Schnittstellen zwischen Modulen und beim Modulentwicklungsprozess stellte sich ebenfalls als essenzieller Bestandteil der Projektplanung in der modularisierten Produktentwicklung heraus.

Durch anlaufende Sponsoringpartnerschaften war das Entwicklungsumfeld dynamisch, Bauteile und Komponenten wurden dadurch nach und nach verfügbar. Dementsprechend war es mehrmals notwendig, Anpassungen an bereits getroffenen Entscheidungen zu treffen, um die neu verfügbaren Bestandteile in das System zu integrieren. Das zeigte, dass detaillierte Entscheidungen stets so spät als möglich getroffen werden sollen, wenn signifikante Änderungen an den Anforderungen und Rahmenbedingungen erwartet werden.

9.1 Potential des Antriebs

Eine der beschreibenden Charakteristiken des entwickelten Antriebsmoduls liegt in der Austauschbarkeit der Räder. Während die erste Prototypenkonfiguration mit nur zwei Antriebsmodulen in Differentialanordnung erstellt wurde, wird es sicherlich ein zukünftiger Schritt sein, andere Antriebskonfigurationen zu testen. Insbesondere omnidirektio-

nale Lösungen, wie der Mecanum-Antrieb, könnten ein nächstes Ziel darstellen.

Weiters wäre es von Interesse, wie sich die Funktion eines mobilen Roboterantriebs ändert, wenn die Leistung durch Einsatz von mehreren Antriebsmodulen skaliert wird. Speziell die Frage des Bodenkontaktes könnte dabei eine Rolle spielen, weil dieser durch die größere Anzahl an Rädern, nicht permanent gewährleistet sein kann. Lösungen mit Luftreifen oder die Implementierung einer Radaufhängung könnten in Frage kommen, um Böden, an die keine Ebenheitsanforderungen gestellt werden können, befahrbar zu machen.

Wie gut sich die jeweiligen Antriebskonfigurationen für den Einsatz in Kombination mit einem Roboterarm, also innerhalb eines mobilen Manipulators, eignen, könnte ebenfalls eine Forschungsfrage zukünftiger Entwicklungsarbeiten darstellen. Ob eventuell ein System von ausfahrbaren Stützfüßen notwendig ist, um hochpräzise Manipulationsaufgaben zu erfüllen oder welche anderen Möglichkeiten dafür in Frage kommen, kann ebenso ein interessantes Thema sein.

Das Potential der Entwicklung des Antriebsmoduls ist also bei Weitem nicht ausgeschöpft.

9.2 Änderungsvorschläge

Die Performance des fertigen Systems, war auf jeden Fall zufriedenstellend. Die geforderten Funktionen wurden wie geplant erfüllt und das Projekt verlief also erfolgreich. Dennoch gab es, wie es im Prototypenbau nicht unüblich ist, einige Punkte, an denen konstruktive Anpassungen sinnvoll sein können.

Einer davon lag in der Montage, insbesondere während das Modul in einer Roboterkonfiguration verbaut war. Da die Spannung der Riemen über horizontale Verschiebung der Zwischenwelle erfolgt, müssen dafür vier Schrauben gelockert werden, was es teilweise schwierig gestaltete, die Lager in der gewünschten Position zu fixieren. Eine Möglichkeit die Riemen einfacher und präziser zu spannen, würde Vereinfachungen in Montage und Wartung mit sich bringen, etwa durch zusätzliche Bauteile als Abstandshalter, oder vorabgesetzte Bohrungen.

Auch die Art und Weise, wie der Motor am Modulrahmen befestigt ist, lässt sich verbessern. Im gegenwärtigen Zustand sind hierbei M3 Gewindestangen und Muttern im Einsatz, die von Hand schwer zu manipulieren sind, insbesondere, wenn das Modul verbaut, und dadurch schwer zugänglich ist. Eine neue Konstruktion, die den Motor stabil

hält, aber Verschiebbarkeit zum Zweck der Riemenspannung zulässt, könnte hierbei Vereinfachungen ermöglichen.

Eine gröbere Anpassung würde darin liegen, eine höhere Getriebeübersetzung zu implementieren. Der zweistufige Riementrieb stößt dabei allerdings aufgrund des limitierten Bauraumes an seine Grenzen. Kompaktere Getriebelösungen könnten eine Alternative darstellen, wenn die Übersetzung, und damit das verfügbare Drehmoment und der damit einhergehende Funktionsumfang im Bezug auf Geländegängigkeit, erhöht werden soll.

Abbildungsverzeichnis

| | | |
|------|--|----|
| 1.1 | V-Modell nach VDI 2206 [12] | 8 |
| 1.2 | Schema des morphologischen Kastens [14] | 9 |
| 1.3 | Auszug aus einer Bewertungsmatrix einer Nutzwertanalyse [9] | 10 |
| 2.1 | LMRs sind besonders geeignet, wenn schroffes Gelände überquert werden soll, das Stufen (a), Spalte (b) sowie sandige oder erdige Abschnitte (c) beinhaltet, welche für rädergebundene Systeme unüberwindbar sein können. Darüber hinaus sorgt die hohe Anzahl an Freiheitsgraden für die Fähigkeit des Roboters, aus einer umgekippten oder umgefallenen Position wieder aufzustehen (d), beziehungsweise die Nutzlast auf abschüssigem Gelände horizontal zu halten (e) [23, S.18]. | 15 |
| 2.2 | Auszug aus DIN 18202 - Ebenheitstoleranzen für Böden im Hochbau . . | 17 |
| 2.3 | Räder mobiler Roboter [22]: a) Standard-Rad b) Ein-Freiheitsgrad Lenkrolle c) Zwei-Freiheitsgrad Laufrolle d) Mecanum-Rad e) Omni-Wheel f) Ball-Rad für omnidirektionalen Antrieb [26] | 18 |
| 2.4 | Struktur des „Omni-Ball“ [27] | 19 |
| 2.5 | Einige gebräuchlichsten Radkonfigurationen (Auszug aus [22]) | 20 |
| 2.6 | Antriebskonzept mit Mecanum-Rädern (Abbildung aus [22]) Die kleinen Pfeile zeigen die Drehrichtung der Räder, die gestrichelten die seitlichen Kräfte an den Rollen. Die mittigen, großen Pfeile stellen die resultierende Bewegungsrichtung des Fahrzeugs dar. Beliebige Bewegungen werden durch Überlagerung der dargestellten Manöver realisiert. | 22 |
| 2.7 | FTS in der Versuchshalle des Fraunhofer IML [30] | 24 |
| 2.8 | Mobiler Manipulator „CHIMERA von Joanneum Research, bestehend aus den zwei Subsystemen mobile Plattform „MiR 100“ und Roboter „UR10“ | 25 |
| 2.9 | Prinzipieller Aufbau einer Gleichstrommaschine [34] | 28 |
| 2.10 | Vereinfachte Schnittzeichnung eines vierpoligen elektronisch kommutierten Gleichstrommotors (BLDC). A_L momentane Läuferachse, A_Q momentane Achse des Ständer-Querfeldes, schwarz Dauermagnete [34] | 29 |

| | | |
|------|---|----|
| 2.11 | Schrittmotor mit gezahnten Ständerpolen, Schrittwinkel $\alpha = 1,8^\circ$ a) Aufbau von Ständer und Läufer b) Läuferzahnstellung vor (1) und nach (2) einem Schritt [34] | 30 |
| 2.12 | Nabengetriebe für FTF [36] | 32 |
| 2.13 | Unterschiedliche Bauweisen von Planetengetrieben (Neugart GmbH) [37] | 33 |
| 3.1 | Modularer Mobiler Roboter mit Swerve-Drive der Oxford University | 35 |
| 3.2 | Mobiler Vierrad-Roboter, entstanden 2021 an der Maschinenbaufakultät der Universität Sibiu [41] | 36 |
| 3.4 | Der Mobile Wabenmanipulator von Joanneum Research | 39 |
| 3.5 | Der Modulare Roboter der Universität Politehnica Bucharest [45] | 39 |
| 4.1 | Vorgehensmodell des Produktentwicklungsprozesses nach [9] | 41 |
| 5.1 | Freiheitsgrade eines starren Körpers in der Ebene [46] | 48 |
| 5.2 | Paarweiser Vergleich der Bewertungskriterien | 52 |
| 5.3 | Nutzwertanalyse von Rädern und Beinen | 54 |
| 5.4 | Konfigurationsvarianten der Lenkung der Antriebsräder | 58 |
| 5.5 | Möglichkeiten der der Fahrwerksaufhängung | 60 |
| 5.6 | Varianten der Positionierung des Antriebsrades | 62 |
| 5.7 | Morphologischer Kasten zur Konzepterstellung des Antriebsmoduls | 63 |
| 5.8 | Konzeptskizze der Variante A | 64 |
| 5.9 | Konzeptskizze der Variante B | 65 |
| 5.10 | Konzeptskizze der Variante C | 66 |
| 5.11 | Paarweiser Vergleich der Bewertungskriterien der Konzepte | 69 |
| 5.12 | Gewichtete Nutzwertanalyse der drei Konzepte | 71 |
| 6.1 | Geometrie der Auffahrt auf einen Absatz | 76 |
| 6.2 | Kräfte am Antriebsrad bei Auffahrt auf eine Stufe | 78 |
| 6.3 | Vergleich des benötigten und übertragbaren Momentes am Antriebsrad bei Auffahrt auf eine Kante, $m_{F0} = 40 \text{ kg}$, $a_{St} = 0,5 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$, für Materialpaarung Gummireifen-Beton $\mu = 0,7$ | 79 |
| 6.4 | Überfahren einer Stufe | 80 |
| 6.5 | Zusammenhang zwischen Motor-Haltemoment und notwendigem Übersetzungsverhältnis | 82 |
| 6.6 | Vergleich der für den Betriebspunkt notwendigen Drehzahl/Drehmoment Kombinationen | 84 |

Abbildungsverzeichnis

| | | |
|------|--|----|
| 6.7 | Kennlinie des Beckhoff AM8112 [48] | 85 |
| 6.8 | CAD Modell des Antriebsmoduls | 87 |
| 6.9 | CAD Modell des Antriebsmoduls in Vorderansicht | 87 |
| 6.10 | Fertiger Prototyp des Antriebsmoduls | 88 |
| 6.11 | Fertiger Prototyp des Antriebsmoduls in Vorderansicht | 88 |
| 7.1 | Testkonfiguration des mobilen Roboters mit zwei Antriebsmodulen als Differentialantrieb | 91 |
| 7.2 | Prinzipskizze der Funktionstests der Kantenauffahrt | 92 |
| 7.3 | Funktionstest der Kantenauffahrt | 93 |
| 7.4 | Prinzipskizze der Funktionstests der Rampenfahrt | 93 |
| 7.5 | Funktionstest der Rampenfahrt | 94 |

Tabellenverzeichnis

| | | |
|-----|---|----|
| 4.1 | Vorläufige Anforderungen an den Antrieb - Auszug aus der Anforderungsliste des Projekts TURBO der TU Wien | 42 |
| 6.1 | Ergebnisse der Auslegungsrechnung des Riementriebs | 85 |

Literaturverzeichnis

- [1] J. Pistorius, *Industrie 4.0 – Schlüsseltechnologien für die Produktion: Grundlagen • Potenziale • Anwendungen*. Springer Berlin Heidelberg, 2020.
- [2] BMBF, “Industrie 4.0,” 2016, [Online; Stand 22. April 2022]. [Online]. Available: <https://www.bmbf.de/bmbf/de/forschung/digitale-wirtschaft-und-gesellschaft/industrie-4-0/industrie-4-0>
- [3] W. Abramowicz, *Business Information Systems : 18th International Conference, BIS 2015, Poznań, Poland, June 24-26, 2015, Proceedings*, ser. Lecture Notes in Business Information Processing 208. Cham: Springer International Publishing, 2015. [Online]. Available: 10.1007/978-3-319-19027-3
- [4] *Handbuch Industrie 4.0: Band 3: Logistik*, 3rd ed. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- [5] KUKA AG., “Zukunft der mobilen Robotik,” 2021. [Online]. Available: <https://www.kuka.com/de-at/future-production/mobile-roboter>
- [6] K. Schäffer and I. Mammes, “Robotik als Zugang zur informatischen Bildung in der Grundschule,” *GDSU-Journal Juli*, vol. 4, pp. 59–72, 2014.
- [7] B. Landwehr, I. Mammes, and L. Murmann, *Technische Bildung im Sachunterricht der Grundschule : Elementar bildungsbedeutsam und dennoch vernachlässigt?*, 1st ed., ser. Forschungen zur Didaktik des Sachunterrichts 12. Bad Heilbrunn: Verlag Julius Klinkhardt, 2021.
- [8] O. Bendel, *Pflegeroboter*, 1st ed. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden : Imprint: Springer Gabler, 2018. [Online]. Available: 10.1007/978-3-658-22698-5
- [9] *Pahl/Beitz Konstruktionslehre: Methoden und Anwendung erfolgreicher Produktentwicklung*, 9th ed. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- [10] U. Lindemann, *Methodische Entwicklung technischer Produkte : Methoden flexibel und situationsgerecht anwenden*, 2nd ed., ser. VDI-Buch. Berlin,

- Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2007. [Online]. Available: 10.1007/978-3-540-37451-0
- [11] B. Bertsche, P. Göhner, U. Jensen, W. Schinköthe, and H.-J. Wunderlich, *Zuverlässigkeit mechatronischer Systeme : Grundlagen und Bewertung in frühen Entwicklungsphasen*, ser. VDI-Buch. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2009. [Online]. Available: 10.1007/978-3-540-85091-5
- [12] “VDI 2206 - Entwicklung mechatronischer und cyber-physischer Systeme,” November 2021.
- [13] J. Schlattmann and A. Seibel, *Aufbau und Organisation Von Entwicklungsprojekten*, ser. Springer Reference Technik, Berlin, Heidelberg, 2017.
- [14] A. Windolph, “Morphologischer Kasten,” 2016, [Online; Stand 11. Mai 2022]. [Online]. Available: <https://www.projektmagazin.de/methoden/morphologischer-kasten>
- [15] C. Zangemeister, *Nutzwertanalyse in der Systemtechnik : eine Methodik zur multidimensionalen Bewertung und Auswahl von Projektalternativen*, 2nd ed. München: Wittemann, 1971.
- [16] F. Eisenführ and M. Weber, *Rationales Entscheiden : mit 59 Tabellen*, 4th ed., ser. Springer-Lehrbuch. Berlin [u.a.]: Springer, 2003.
- [17] P. Zorn, *Systemintegration und Gesamtentwurf eines modular aufgebauten mobilen Roboters*, Wien, 2022.
- [18] *VDI 2860/Montage- und Handhabungstechnik: Handhabungsfunktionen, Handhabungseinrichtungen, Begriffe, Definitionen, Symbole*, ser. VDI-Richtlinien, 1990. [Online]. Available: <https://books.google.at/books?id=Yeb1jgEACAAJ>
- [19] P. Kopacek, “Robotik,” *Elektrotechnik und Informationstechnik*, vol. 130, no. 2, p. 41, 2013.
- [20] M. Haun, *Handbuch Robotik : Programmieren und Einsatz intelligenter Roboter*, 2nd ed., ser. VDI-Buch. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2013. [Online]. Available: 10.1007/978-3-642-39858-2
- [21] S. G. Tzafestas, *Introduction to mobile robot control*, first edition.. ed., ser. Elsevier insights. Waltham, MA: Elsevier, 2014.
- [22] J. Hertzberg, K. Lingemann, and A. Nüchter, *Mobile Roboter : Eine Einführung*

- aus Sicht der Informatik*, ser. eXamen.press. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2012. [Online]. Available: 10.1007/978-3-642-01726-1
- [23] R. Siegwart, I. R. Nourbakhsh, and D. Scaramuzza, *Introduction to autonomous mobile robots*, 2nd ed., ser. Intelligent robotics and autonomous agents. Cambridge, Mass. [u.a.]: MIT, 2011.
- [24] R. M. Alexander, *Principles of animal locomotion*, 2nd ed. Princeton, NJ [u.a.]: Princeton Univ. Press, 2006.
- [25] M. Williams and B. F. Lissner, Herbert R. LeVeau, *Williams Lissner's biomechanics of human motion*, 3rd ed. Philadelphia: Saunders, 1992.
- [26] M. West and H. Asada, "Design and control of ball wheel omnidirectional vehicles," in *Proceedings of 1995 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, vol. 2. IEEE, 1995, pp. 1931–1938 vol.2.
- [27] K. Tadakuma, R. Tadakuma, K. Nagatani, K. Yoshida, S. Peters, M. Udengaard, and K. Iagnemma, "Crawler vehicle with circular cross-section unit to realize sideways motion," 10 2008, pp. 2422 – 2428.
- [28] "Vdi-richtlinie 2510 - fahrerlose transportsysteme (fts)," Oktober 2005.
- [29] G. Ullrich and T. Albrecht, *Fahrerlose Transportsysteme: Eine Fibel - Mit Praxisanwendungen - Zur Technik - Für Die Planung*, 3rd ed. Wiesbaden: Springer Vieweg. in Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, 2019.
- [30] Fraunhofer, "FTS in der Versuchshalle," 2022, [Online; Stand 18. Juli 2022]. [Online]. Available: <https://www.internet-der-dinge.de/en/services.html>
- [31] Fraunhofer IKS, "Flexible Produktion," 2022, [Online; Stand 20. Mai 2022]. [Online]. Available: <https://www.iks.fraunhofer.de/de/leistungen/flexible-produktion.html>
- [32] D. Krause and N. Gebhardt, *Methodische Entwicklung Modularer Produktfamilien: Hohe Produktvielfalt Beherrschbar Entwickeln*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin / Heidelberg, 2018.
- [33] S. Ripperda, *Methodische Unterstützung zur kostenbasierten Auswahl modularer Produktstrukturen*, ser. Produktentwicklung und Konstruktionstechnik. Springer, 2019, vol. 15.

- [34] E. Nolle and R. Fischer, *Elektrische Maschinen: Aufbau, Wirkungsweise und Betriebsverhalten*. München: Hanser, 2021.
- [35] L. Omodara, S. Pitkäaho, E.-M. Turpeinen, P. Saavalainen, K. Oravisjärvi, and R. L. Keiski, “Recycling and substitution of light rare earth elements, cerium, lanthanum, neodymium, and praseodymium from end-of-life applications - a review,” *Journal of cleaner production*, vol. 236, p. 117573, 2019.
- [36] FramoMorat, “Nabengetriebe NG500,” 2022, [Online; Stand 23. Mai 2022]. [Online]. Available: <https://de.framo-morat.com/produkte/nabengetriebe/nabengetriebe-ng500/>
- [37] Neugart GmbH, “Neugart getriebe,” 2022, [Online; Stand 23. Mai 2022]. [Online]. Available: <https://www.neugart.com/de-de/produkte>
- [38] H. Wittel, C. Spura, and D. Jannasch, *Roloff/Matek Maschinenelemente: Normung, Berechnung, Gestaltung*, 25th ed. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden.
- [39] T. Burke and H. Durrant-Whyte, “Modular mobile robot design,” *IFAC Proceedings Volumes*, vol. 26, no. 1, pp. 427–432, 1993, 1st IFAC International Workshop on Intelligent Autonomous Vehicles, Hampshire, UK, 18-21 April. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1474667017493372>
- [40] A. Mutambara and H. Durrant-Whyte, “Estimation and control for a modular wheeled mobile robot,” *IEEE transactions on control systems technology*, vol. 8, no. 1, pp. 35–46, 2000.
- [41] M. Crenganis, C. Biris, and C. Girjob, “Mechatronic design of a four-wheel drive mobile robot and differential steering,” *MATEC Web of Conferences*, vol. 343, p. 8003, 2021.
- [42] R. F. Pecie, M. O. Tătar, and C. Rusu, “Studies on mobile robots for all types of terrain,” *MATEC Web of Conferences*, vol. 343, p. 8015, 2021.
- [43] Joanneum Research, “Mobiler Wabenmanipulator,” 2022, [Online; Stand 31. Mai 2022]. [Online]. Available: <https://www.joanneum.at/robotics/referenzprojekte/abgeschlossene-projekte/redrobco-redundante-robotersteuerung>
- [44] A. Rabl, P. Salner, L. Büchi, J. Wrona, S. Muehlbacher-Karrer, and M. Brandstötter, “Implementation of a Capacitive Proximity Sensor System for a Fully Ma-

- neuverable Modular Mobile Robot to Evade Humans,” in *Proceedings of Austrian Robotics Workshop 2018*, P. Zech and J. Piater, Eds., May 2018, pp. 17–22.
- [45] I.-A. Maroşan and G. Constantin, “Design of a modular locomotion system for autonomous mobile robots,” *MATEC Web of Conferences*, vol. 343, p. 8006, 2021.
- [46] J. Dankert and H. Dankert, *Technische Mechanik : Statik, Festigkeitslehre, Kinematik/Kinetik*, 4th ed. Wiesbaden: B. G. Teubner Verlag / GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden, 2006. [Online]. Available: 10.1007/978-3-8351-9083-2
- [47] F. Küçükay, *Grundlagen der Fahrzeugtechnik: Antriebe, Getriebe, Energieverbrauch, Bremsen, Fahrdynamik, Fahrkomfort*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, 2022.
- [48] Beckhoff, “AM8112 Kennlinie,” 2022, [Online; Stand 4. Juli 2022]. [Online]. Available: <https://www.beckhoff.com/de-at/produkte/motion/rotatorische-servomotoren/am8100-servomotoren-fuer-kompakte-antriebstechnik/am8112-wfyz.html>
- [49] E. Cook, *Prototyping*, ser. 21st century skills innovation library. Ann Arbor, MI: Cherry Lake Publishing, 2015.