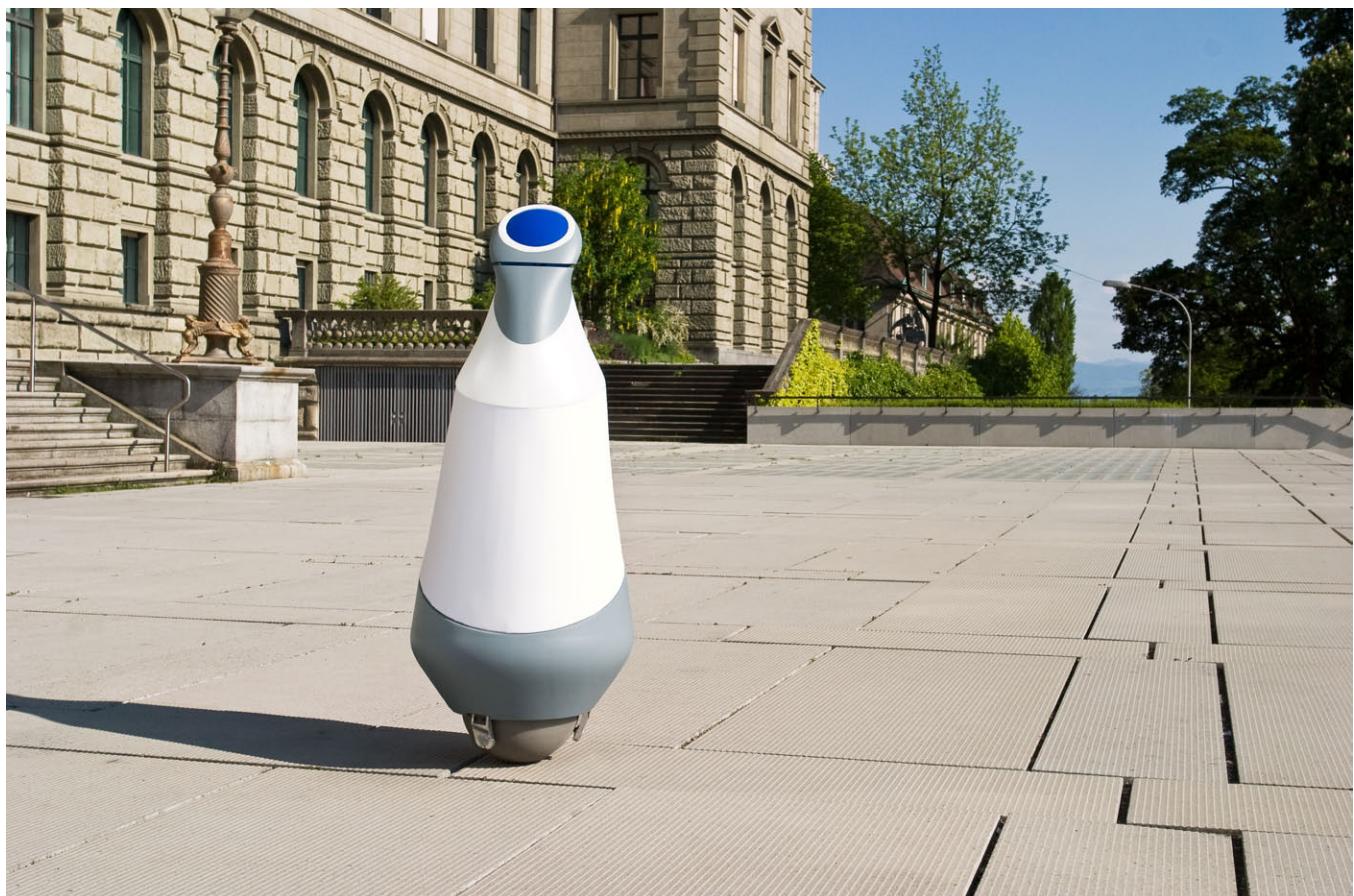


Rezero

dynamisch stabil auf einer Kugel

Fokusprojekt Ballbot 09/10

Endbericht



Betreut durch

Prof. Dr. Roland Y. Siegwart
Dr. Roland Haas
Dr. Cédric Pradalier
Dr. Francis Colas
Valentin Gresch

Autoren

Simon Dössegger
Péter Fankhauser
Corsin Gwerder
Jonathan Hüssy
Jérôme Käser
Thomas Kammermann
Lukas Limacher
Michael Neunert

Abstract

Dieser Bericht beschreibt die Entwicklung und Realisierung eines Roboters, der sich auf einer Kugel balancierend fortbewegt. Der Fokus dieses zweisemestrigen Projektes liegt in der Optimierung dieser Technologie, hin zu hoher Beschleunigung und Agilität. In einem strukturierten Konzeptprozess werden mit Hilfe eines morphologischen Kastens mechanische Konstruktion und elektronische Komponenten erarbeitet und evaluiert.

Das realisierte Antriebskonzept löst das Problem des Antriebs einer Kugel durch drei Rollen-Omniwheels mit geschlossener Kreiskontur. Um Kontaktkräfte und Fahrrobustheit zu erhöhen, wird eine Kombination aus Aufhängung mit Feder-Dämpfer-Elementen und Gegenhalter entwickelt. Die gummierte Kugel wird durch Kugelrollen an die Omniwheels gepresst. Um mit dem Ballbot Emotionen zu vermitteln, wird ein Design mit einem beweglichen Aufbau und sich wölbender Außenverschalung entworfen, zusammen mit einem Mechanismus zum Absenken der Verschalung über die Kugel. Eine Sensorkonfiguration aus IMU und Winkelencoder der drei Elektromotoren ermöglicht die Regelung. Das dreidimensionale, invertierte Pendel wird mit drei planaren Starrkörpermodellen und dreidimensional modelliert und die Resultate verglichen. Ein entworfener Kalmanfilter und ein nichtlinearer Regler erhöhen die Leistungsfähigkeit des Systems enorm. Es können gezeichnete, zeit-optimierte Trajektorien abgefahren oder Fernsteuerungen verschiedenster Art verwendet werden. Ein Laserdistanzsensor ermöglicht, zusammen mit Ultraschallsensoren, die Orientierung und Interaktion des Roboters basierend auf der „Velocity Obstacle“-Methode.

Der realisierte Prototyp erfüllt die spezifizierten mechanischen, elektronischen und softwaretechnischen Anforderungen. Mit der implementierten Software sind Geschwindigkeiten bis zu 3 m/s und Neigungswinkel von 17° möglich. Der beschriebene Ballbot demonstriert so erstmalig das mögliche Bewegungspotential und bildet eine Plattform für Weiterentwicklungen.

Danksagung

Wir bedanken uns an dieser Stelle bei all denjenigen, die uns das Fokusprojekt Ballbot ermöglichten und uns auf unserem Weg mit ihrer Erfahrung, ihrem Wissen und ihrem tatkräftigen Einsatz zur Seite gestanden sind.

Allen voran möchten wir Prof. Dr. Roland Siegwart danken, der uns von Anfang an motiviert und unsere Projektidee mit Begeisterung aufgenommen und mitgetragen hat. Besten Dank auch an Dr. Roland Haas für die professionelle Begleitung des Projekts, die hervorragende Betreuung und die kritischen Fragen.

Ein besonderer Dank geht an unsere Betreuer Dr. Cédéric Pradalier, Dr. Francis Colas und Valentin Gresch. Mit ihrer wertvollen Unterstützung haben sie den Ballbot und das ganze Team entscheidend weitergebracht und für jedes Problem in nützlicher Frist eine passende Lösung gefunden.

Besten Dank an Disney für das in uns gesetzte Vertrauen; die grosszügige finanzielle Unterstützung liess uns viele Freiheiten bei der Verwirklichung unserer Visionen. Ein herzliches Dankeschön an all unsere Partner, natürlich die Samuel Werder AG, das Paul Scherrer Institut, die Kundert AG und Honegger forming für ihr grosses Engagement und für das zur Verfügung gestellte Material und Knowhow. Erst dadurch liessen sich unsere Ideen und Visionen anpacken und den finalen Prototypen, Rezero, realisieren.

Zürich, im Juni 2010

Team Ballbot

Inhaltsverzeichnis

| | |
|--|-----------|
| 1 Einleitung | 1 |
| 1.1 Ausgangslage | 1 |
| 1.2 Projektinspiration | 1 |
| 1.3 Projektziel | 2 |
| 1.4 Stand der Technik | 3 |
| 1.4.1 Instabile Systeme | 3 |
| 1.4.2 Andere Ballbots | 3 |
| 1.5 Projektorganisation | 5 |
| 1.5.1 Team | 5 |
| 1.5.2 Organisation | 6 |
| 1.5.3 Zeitplan | 9 |
| 1.5.4 Finanzen | 10 |
| 1.5.5 Infrastruktur | 12 |
| 1.5.6 Risikoanalyse | 13 |
| 1.6 Struktur des Berichtes | 16 |
| 2 Konzeptprozess | 17 |
| 2.1 Ausgangslage | 17 |
| 2.1.1 Anfangs- und Rahmenbedingungen | 17 |
| 2.1.2 Anspruchsgruppen | 18 |
| 2.1.3 Erste Vorstellungen | 20 |
| 2.2 Vorgehensweise | 21 |
| 2.2.1 Vorstudie: Zieldefinition | 21 |
| 2.2.2 Hauptstudie: Vom Lasten- zum Pflichtenheft | 22 |
| 2.2.3 Entwicklung des Designkonzeptes | 23 |
| 2.2.4 Berücksichtigung externer Rückmeldungen im Konzept | 24 |
| 2.3 Zieldefinition | 25 |
| 2.3.1 Technische Eigenschaften | 26 |
| 2.3.2 Visuelles Design | 27 |
| 2.3.3 Technologiedemonstration | 28 |
| 2.4 Funktionsgliederung | 28 |
| 2.5 Technische Anforderungen | 30 |

| | | |
|----------|---|-----------|
| 2.5.1 | Qualitative Anforderungen | 30 |
| 2.5.2 | Größenordnungsbetrachtung | 33 |
| 2.5.3 | Erste Berechnungen | 33 |
| 2.6 | Lösungsfindung | 36 |
| 2.7 | Bewertung und Auswahl | 37 |
| 2.8 | Technisches Gesamtkonzept | 40 |
| 2.8.1 | Mechatronisches Gesamtsystem | 40 |
| 2.8.2 | Antriebskonzept | 43 |
| 2.8.3 | Sensorkonzept | 46 |
| 2.8.4 | Mechanisches Konzept | 50 |
| 2.9 | Designkonzept | 56 |
| 2.9.1 | Design | 56 |
| 2.9.2 | Zukunftsvisionen | 59 |
| 2.10 | Demonstrationskonzept | 60 |
| 3 | Konstruktion und Fertigung | 63 |
| 3.1 | Detailkonzept | 63 |
| 3.2 | Mechanische Komponenten: AS-Prototyp | 67 |
| 3.2.1 | Kugel | 67 |
| 3.2.2 | Omniwheel | 70 |
| 3.2.3 | Aufhängung | 74 |
| 3.2.4 | Skelett | 81 |
| 3.3 | Mechanische Komponenten: finaler Prototyp | 83 |
| 3.3.1 | Gegenhalter | 84 |
| 3.3.2 | Verschalung | 88 |
| 4 | Elektronik | 97 |
| 4.1 | Signalverarbeitung | 97 |
| 4.2 | Energieversorgung | 100 |
| 4.3 | Evaluation der elektronischen Komponenten | 101 |
| 4.3.1 | Stabilisierungssensoren | 101 |
| 4.3.2 | Interaktionssensoren | 104 |
| 4.3.3 | Antriebsmotoren mit Getriebe | 110 |
| 4.3.4 | Mikrocontroller | 112 |
| 4.3.5 | Linuxboards | 113 |
| 4.3.6 | Akkumulator | 116 |
| 4.3.7 | Motor für den Parkiermechanismus | 119 |
| 4.3.8 | Motor für die Lamellenbewegung | 120 |

| | |
|--|------------|
| 5 Systemmodellierung, Regelung und Simulation | 125 |
| 5.1 Überblick | 125 |
| 5.2 Detailkonzept | 126 |
| 5.3 Planares System | 127 |
| 5.3.1 Systemmodellierung | 127 |
| 5.3.2 Reglerauslegung | 133 |
| 5.3.3 Umrechnungen | 135 |
| 5.3.4 Verifikation | 137 |
| 5.4 3D System | 139 |
| 5.4.1 Systemmodellierung | 139 |
| 5.4.2 Reglerauslegung | 144 |
| 5.4.3 Verifikation | 146 |
| 5.4.4 Vergleich zum planaren System | 147 |
| 5.5 Simulation | 148 |
| 5.5.1 Implementation in Simulink | 148 |
| 5.5.2 Visualisierung | 148 |
| 5.5.3 Fehlermodell | 149 |
| 5.5.4 Kalmanfilter | 150 |
| 5.6 Implementierung | 151 |
| 5.6.1 Sollwertfilter | 151 |
| 5.6.2 Programmierung des Mikrocontrollers | 151 |
| 6 Steuerung | 153 |
| 6.1 Detailkonzept | 153 |
| 6.1.1 Hard- und Softwaresetup | 153 |
| 6.1.2 Softwarestruktur | 155 |
| 6.1.3 Sicherheitskonzept | 159 |
| 6.2 Steuerungsmethoden | 160 |
| 6.2.1 Steuergeräte | 160 |
| 6.2.2 Trajektoriensteuerung | 164 |
| 6.2.3 Interaktion und Hinderniserkennung | 168 |
| 6.3 Schnittstellen | 172 |
| 6.3.1 Benutzereingaben | 172 |
| 6.3.2 Messdatenaufzeichnung | 174 |
| 6.3.3 Kommunikation mit externer Hardware | 175 |

| | |
|---------------------------------------|------------|
| 7 Leistungsanalyse | 179 |
| 7.1 Regelung | 179 |
| 7.1.1 Balancieren | 179 |
| 7.1.2 Sollwertsprung | 180 |
| 7.1.3 Höchstgeschwindigkeit | 181 |
| 7.1.4 Neigungswinkel | 182 |
| 7.2 Steuerung | 183 |
| 7.2.1 Joypad | 183 |
| 7.2.2 Trajektorie | 184 |
| 7.2.3 Interaktion | 185 |
| 8 Zusammenfassung | 187 |
| 8.1 Projektresultate | 187 |
| 8.2 Empfehlungen | 189 |
| 8.3 Ausblick | 190 |
| 9 Verzeichnisse | 193 |
| Literaturverzeichnis | 196 |
| Abbildungsverzeichnis | 200 |
| Tabellenverzeichnis | 201 |

| | |
|---|------------|
| A Anhang | 203 |
| A.1 Zeitplan | 204 |
| A.2 Übersicht der Finanzen | 205 |
| A.3 Morphologischer Kasten | 206 |
| A.4 Evaluation des morphologischen Kastens | 210 |
| A.5 Anforderungen an den AS-Prototyp | 212 |
| A.6 Untersuchung des verschiebbaren Masseneffekts | 214 |
| A.7 Technische Zeichnungen | 220 |
| A.8 Exzentrische Kugelmassen | 232 |
| A.9 Vergleich der IMUs | 242 |
| A.10 Linear Actuator | 244 |
| A.11 Servo | 246 |
| A.12 Die Laserdistanzsensoren im Vergleich | 247 |
| A.13 Systemmodellierung Planar | 248 |
| A.14 Umrechnungen | 260 |
| A.15 Systemmodellierung 3D | 267 |
| A.16 Odometrie | 274 |
| A.17 Motorenevaluation | 278 |
| A.18 Harmonic Drive | 284 |
| A.19 Auslegung der Lagerungen für das Omniwheel | 287 |
| A.20 Berechnung der durchschnittlichen Akkulaufzeit | 289 |
| A.21 Testbenchwerte | 291 |

X

Abkürzungsverzeichnis

| | |
|------------------|--|
| ARM | Advanced RISC Machine |
| AS-Prototyp | Aktoren-Sensoren-Prototyp |
| ASL | Autonomous Systems Lab |
| ATX | Advanced Technology Extended |
| CAD | Computer Aided Design |
| CMU | Carnegie Mellon University |
| EPOS | Positioniersteuerung |
| ETH | Eidgenössisch Technische Hochschule Zürich |
| GFK | Glasfaserverstärkter Kunststoff |
| IMU | Inertial Measurement Unit |
| MEMS | Micro-Electro-Mechanical System |
| MOSFET | Metall-Oxid-Halbleiter-Feldeffekttransistor |
| NXT | programmierbarer Lego Mindstorms Baustein |
| PET | Polyethylenterephthalat |
| PWM | Pulsweitenmodulation |
| Rezero | Finaler Prototyp |
| RISC | Reduced Instruction Set Computer |
| ROS | Roboter Operating System |
| SBC | Single Board Computer |
| TGU | Universität Tohoku Gakuin |
| VO | Velocity Obstacles |
| ZHAW | Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften |
| ZHdK | Zürcher Hochschule der Künste |

1 Einleitung

1.1 Ausgangslage

Im Rahmen des Bachelorstudiums an der ETH Zürich können Studierende der Fachrichtung Maschineningenieurwissenschaften im fünften und sechsten Semester ihren Fokus auf eine Projektarbeit richten. Anstelle weiterer Vertiefungsvorlesungen wird während einem Jahr Zeit in ein Projekt investiert.

Ausgangspunkt für das Fokusprojekt sind Ideen seitens der beteiligten Institute, aber auch aus der Reihe der Studierenden. Im Team werden die Ideen konkretisiert und als Fokusprojekt aufgegriffen, mit dem Ziel, innerhalb der gegebenen Frist, den Weg bis zum Produkt oder zum Prototypen zu beschreiten. Die Geschicke rund um die Arbeit liegen dabei vollständig in den Händen der Studierenden, Fachpersonen aus dem Institut wie auch aus der Arbeitswelt übernehmen nur beratende Funktion. Ausgehend von der Idee, über die Konzeptphase, Berechnungen, Konstruktionen hin zur Fertigung, Montage und Implementierung übernehmen die Studenten Verantwortungen in fachlichen, wie auch in sozialen Aspekten. Rund um das Projekt werden Kontakte zu Fertigungs- und Zulieferfirmen aufgebaut. Informationen und Wissen werden aus Fachliteratur und aus Gesprächen mit Experten gewonnen und fließen in die Arbeit ein.

Am Rollout-Event der Fokusprojekte wird der realisierte Prototyp einem breiten Publikum präsentiert und ausgestellt und bildet den Abschluss der Projektarbeit.

1.2 Projektinspiration

Quelle der Inspiration zur Entwicklung eines Ballbots war die Designstudie *Audi Snook* von Tilmann Schlootz (siehe Abbildung 1.1). Das technologische Forschungsprojekt der *Volkswagen AG Zukunftsorschung* basiert auf einem neuartigen Antriebskonzept. Anstelle der Fortbewegung durch Räder tritt eine einzelne Kugel. Der Fahrer soll damit fähig sein, sich jederzeit in jede Richtung bewegen zu können, also auch seitlich und rückwärts zu fahren sowie auf der Stelle zu drehen. Das visionäre Konzept steigert die Agilität



Abbildung 1.1: Audi Snook: Agilität durch Instabilität [5]

des Fahrzeugs in neue Dimensionen, die instabile Lage des gesamten Systems soll autostabilisiert werden, ähnlich wie in Projekten aus der Luft- und Raumfahrt.

Diese neuartige Fortbewegungsform fasziniert das gesamte Team und bildet die Motivationsgrundlage. Ein solch instabiles System zu beherrschen ist eine Herausforderung, der sich das ganze Team stellen will.

1.3 Projektziel

Das Fokusprojekt Ballbot hat sich zum Ziel gesetzt, innerhalb der zur Verfügung stehenden Zeit, einen eigenen Ballbot zu entwickeln. Diese Klasse von Robotern beschäftigt sich typischerweise mit dem Balancieren und Fortbewegen auf einer einzelnen Kugel.

Im Gegensatz zu den bereits vorhandenen Prototypen, welche sich hauptsächlich mit der statischen Stabilisierung des Roboters befassen, sollen dabei erstmalig die dynamischen Bewegungen ins Zentrum rücken. Das Potential der omnidirektionalen Bewegung soll dabei ausgenutzt und die Agilität des Systems aufgezeigt werden. Die Ausreizung der Technik stellt dabei eine grosse Herausforderung dar, in Zahlen gefasst strebt das Team eine Höchstgeschwindigkeit von 2 m/s und einen zu erreichenden Neigungswinkel von 20° an.

Das Team hat sich zum Ziel gesetzt den Ballbot zu einem agilen und wendi-

gen Roboter weiterzuentwickeln und so eine neue Fortbewegungsmöglichkeit zu erschliessen.

1.4 Stand der Technik

1.4.1 Instabile Systeme

Ein instabiles System hat die Eigenschaft, dass es nicht im Gleichgewicht bleibt, falls es nicht von aussen kontrolliert wird. Ein System wird in der Regelungstechnik durch eine Übertragungsfunktion charakterisiert. Instabile Systeme sind dadurch gekennzeichnet, dass das Polynom, der Nenner der Übertragungsfunktion, mindestens einen Eigenwert mit positivem Realteil aufweist. *Rezero*, der Name des finalen Prototypen, findet hier seinen Ursprung und setzt sich aus diesem regelungstechnisch wichtigen Zusammenhang des Realteils und der Zahl Null zusammen.

Ein anschauliches Beispiel für ein instabiles System ist das invertierte Pendel. Es besitzt zwei Gleichgewichtslagen, eine stabile, nach unten hängende, und eine instabile, nach oben stehende. Die instabile Gleichgewichtslage kann nur mittels Regler stabilisiert werden.

Der Ballbot ist ebenfalls ein instabiles System. Er kann als dreidimensionales invertiertes Pendel aufgefasst werden, welches sich auf einer Kugel ausbalanciert. Im Gegensatz zu einem zweidimensionalen, invertierten Pendel mit zwei Freiheitsgraden, besitzt das räumliche System sechs Freiheitsgrade. Die grosse Aufgabe besteht nun in der Stabilisierung dieses Systems mit geschickt platzierten Sensoren und mit Hilfe eines geeigneten Reglers. Das Ziel ist, möglichst ruhig auf der Kugel stehen bleiben zu können, sowie Geschwindigkeitsänderungen in bestimmte Richtungen vorzunehmen.

Die technische Entwicklung hat in den letzten Jahren bereits einige instabile Systeme kontrollierbar gemacht. Daraus sind marktreife Produkte entstanden, das bekannteste davon ist der *Segway Personal Transporter* (siehe Abbildung 1.2). Dabei stellt man sich als Fahrer auf eine Plattform zwischen zwei Rädern, die je von einem Elektromotor angetrieben werden. Durch Verlagerung des Körpergewichts wird der *Segway PT* gelenkt und gebremst. Er erreicht dabei Fahrgeschwindigkeiten von bis zu 20 km/h.

1.4.2 Andere Ballbots

Bereits einige andere Projekte haben sich mit dem Balancieren auf einer Kugel beschäftigt. Eine Vorreiterrolle hatte dabei Prof. Hollis von der Carnegie



Abbildung 1.2: Der Segway-PT [10]

Mellon University (CMU), USA inne ([32], [34]). Er hat mit seinem Team einen der ersten stabilen Ballbots, angetrieben von einem invertierten Mauskugelmechanismus, entwickelt.

Weitere Ballbots sind von Prof. Kumagai an der Tohoku Gakuin University (TGU) in Japan [20] und als Studentenprojekt an der Universität Adelaide, Australien [11] entwickelt worden. Alle diese Projekte verfolgen das Ziel, den Roboter auf der Kugel zu stabilisieren. Bewegungen sind nur mit sehr kleinen Geschwindigkeiten möglich. Die technischen Daten in Tabelle 1.1 zeigen die Unterschiede auf.

| Universität | CMU | TGU | Adelaide |
|--------------------|--------------------------|------------|------------|
| Jahr | 2006–2010 | 2006–2009 | 2009 |
| Gewicht | 45 kg | 11 kg | 34,5 kg |
| Grösse | 150 cm | 50 cm | 160 cm |
| Antriebssystem | invertierte Mauskugel | Omniwheels | Omniwheels |
| Neigungswinkel | <1° | <5° | <1° |
| Geschwindigkeit | <0,1 m/s | <0,3 m/s | <0,1 m/s |
| Eigenrotation | (ja) | ja | nein |
| Parkiermechanismus | ja | nein | nein |

Tabelle 1.1: Technische Daten von bestehenden Ballbots

Bemerkenswert sind die Unterschiede im Gewicht und in der Grösse der einzelnen Modelle. Insbesondere die Variante der TGU ist viel kleiner und kompakter gebaut als die beiden anderen Modelle. Die Anwendung von Omnidriven¹ ermöglicht mit der Antriebseinheit sogar die Rotation um die Einachse, während beim Ballbot der CMU dieser Freiheitsgrad separat kontrolliert werden muss. Der CMU-Ballbot zeichnet sich durch einen Parkiermechanismus aus, welcher den Roboter in eine stabile Ruheposition bringen kann.

1.5 Projektorganisation

1.5.1 Team

Das Team Ballbot besteht aus dreizehn Personen: Acht Studenten der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich (ETH) mit Fachrichtung Maschinenbau, zwei Elektrotechnik Studenten der Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften (ZHAW), sowie drei Studenten der Zürcher Hochschule der Künste (ZHdK). Die Studenten der ETH haben sich bereits Ende des vierten Semesters zusammengefunden. Anfangs des fünften Semesters sind die Elektrotechniker sowie die Industriedesigner zum Team gestossen. Valentin Gresch, der im Vorjahr selbst am Fokusprojekt *Reely* teilgenommen hat, betreut das Fokusprojekt Ballbot und kann das Team mit praktischen Erfahrungen unterstützen. Dr. Cédric Pradalier und Dr. Francis Colas, Forschende am Autonomous Systems Lab (ASL) und Prof. Dr. Roland Büchi von der ZHAW betreuen das Team und sind insbesondere in technischer Hinsicht eine grosse Hilfe, da sie über sehr viel Wissen und Erfahrung im Bereich Robotik verfügen. Dr. Roland Haas koordiniert die Fokusprojekte und steht bei Fragen bezüglich Projektmanagement zur Verfügung. Beziiglich Konstruktion und Problemen im CAD stehen dem Team Martin Schütz und Marco Steiger zur Seite, bei Fragen zur Elektronik Stefan Bertschi und Thomas Baumgartner.

Der Ausbildungsstand bezüglich Projektarbeit ist sehr unterschiedlich. So ist es für die acht Studierenden der ETH das erste Projekt in diesem Umfang während ihres Studiums. Die Elektrotechniker wie auch die Industriedesigner waren bereits in diverse Projekte involviert, weshalb sie mit dieser Arbeitsform schon besser vertraut sind.

¹spezielles Rad, welches in Antriebsrichtung wie ein normales Rad funktioniert, in Querrichtung jedoch frei abrollt (siehe Unterkapitel 3.2.2)



Abbildung 1.3: Team Ballbot

1.5.2 Organisation

Die Teamgrösse erfordert eine sinnvolle Aufteilung der Studierenden in Teilteams um ein effizientes Arbeiten zu ermöglichen. Die Aufteilung in ein Team Mechanik und ein Team Elektrotechnik erweist sich im Herbstsemester als sinnvoll. Die Industriedesigner arbeiten grösstenteils extern und bilden deshalb ein eigenes Team.

Im Frühlingssemester ist die Teamstruktur grundlegend verändert worden, da sich der Fokus stark auf Elektronik und Informatik verschoben hat und die Aufgabenbereiche und Verantwortungen in technischer Hinsicht mit den Bachelorarbeiten klar festgelegt sind.

Maschinenbau:



Thomas
Kammermann



Jérôme
Käser



Lukas
Limacher



Michael
Neunert



Simon
Dössegger



Péter
Fankhauser



Corsin
Gwerder



Jonathan
Hüssy

Elektrotechnik:



Samuel
Schüller



Swen
Wigert

Industriedesign:



Jessica
Baumgartner



Tu-Van
Giang



Claudio
Maestretti

| Bereich | Verantwortlicher | Arbeiten |
|-----------------------|---------------------|---|
| Antrieb / Software | Thomas Kammermann | <ul style="list-style-type: none"> - Omniwheel konstruieren - CAD-Wave-Konzept erstellen - Steuerung |
| Fertigung / CAD | Jérôme Käser | <ul style="list-style-type: none"> - Fertigungspartner finden - Skelett für AS-Prototyp - Koordination Mechanik Team - Realisierung des Designs |
| Kugel / Antrieb | Lukas Limacher | <ul style="list-style-type: none"> - Kugelherstellung koordinieren - alternatives Omniwheel evaluieren - Gegenhalter |
| Aufhängung / Software | Michael Neunert | <ul style="list-style-type: none"> - Feder-Dämpfer System - Antriebssystem - Linuxboard - Hinderniserkennung |
| Sensoren / Software | Simon Dössegger | <ul style="list-style-type: none"> - IMU evaluieren - Odometrie - Koordination Elektronik Team - Bewegungsplanung |
| Regelung | Péter Fankhauser | <ul style="list-style-type: none"> - Systemmodellierung - Koordination Design Team - Leitung Team Ballbot - Regelung |
| Regelung | Corsin Gwerder | <ul style="list-style-type: none"> - Motoren evaluieren - Simulink-Modell - AS-Prototyp Verantwortlicher - Regelung |
| Sensoren / Software | Jonathan Hüssy | <ul style="list-style-type: none"> - Sensoren evaluieren - Demonstrationskonzept ausarbeiten - Sensorfusion |
| Elektronik | Samuel Schüller | <ul style="list-style-type: none"> - Stromversorgung - Lego-Ballbot - Schnittstellen |
| Elektronik | Swen Wigert | <ul style="list-style-type: none"> - Evaluation Mikrocontroller - Signalflussbild - Kommunikation Boards |
| Design | Jessica Baumgartner | <ul style="list-style-type: none"> - Design erarbeiten - CAD-Modell |
| Design | Tu-Van Giang | <ul style="list-style-type: none"> - Design erarbeiten - Corporate Design |
| Design | Claudio Maestretti | <ul style="list-style-type: none"> - Design erarbeiten - Modellbau |

Tabelle 1.2: Beschreibung der Aufgaben im Projekt

Ein grosser Teil dieser in Tabelle 1.2 geschilderten Arbeiten sind durch Arbeitspakete und Schnittstellen durch Mini-Milestones definiert. Der Ausführende eines Arbeitspaketes definiert selbstständig die benötigten Inputs, wie der Zeitplan aussieht, welche Abhängigkeiten zu anderen Teammitgliedern bestehen und was nach Abschluss des Arbeitspaketes resultieren soll. Wöchentliche Besprechungen zeigen den aktuellen Zwischenstand auf, weisen auf Probleme hin und ermöglichen eine Arbeitsübersicht für das gesamte Team. Der andere Teil der erwähnten Arbeiten sind Bachelorarbeiten oder Teile davon, welche im Verlaufe des zweiten Semesters verfasst werden und ein sehr wichtiger Bestandteil des Projektes sind.

Neben den technischen Arbeiten gibt es auch administrative Aufgaben, die verrichtet werden müssen. Dazu gehören Teamleitung, Zeit- sowie Finanzmanagement, Infrastruktur und Material, Risikomanagement, PR-Arbeiten sowie das Verfassen des Berichts. Insbesondere die PR-Arbeiten mit dem Unterhalt der Website, der Sponsoren- und Medienbetreuung und dem Corporate Design sind von grosser Bedeutung und repräsentieren das Team gegen aussen.

1.5.3 Zeitplan

Das Fokusprojekt findet während dem fünften und sechsten Semester an der ETH Zürich statt. Dem Team stehen nach dem Kickoff neun Monate für die Realisierung ihrer Projektziele zur Verfügung. Den Abschluss des Projektes bildet der Rollout-Event am 28. Mai 2010.

Neben dem Projekt finden für die Studierenden der ETH im Herbstsemester noch obligatorische Vorlesungen und Praktikas und anschliessend die Prüfungen statt. Das Frühlingssemester steht komplett für das Fokusprojekt zur Verfügung, wobei gleichzeitig die Bachelorarbeiten, die alle Teil des Projektes sind, ausgeführt werden. Die Studierenden der ZHAW besuchen während des ganzen Jahres nebenbei noch Vorlesungen und Praktikas, verfassen ihre Bachelorarbeit jedoch ebenso im Fokusprojekt. Den Designstudenten stehen zwei Zeitfenster für diese Projektarbeit zur Verfügung, drei Wochen ab Mitte Oktober und eine Woche im Januar.

Um die verbleibende Zeit möglichst effizient zu nutzen, ist das folgende Grundkonzept erstellt worden: Bis Ende des Jahres sollen die mechanischen Teile rund um den Antrieb sowie das Skelett konstruiert sein. Damit kann die Prüfungsphase für die Fertigungsaufträge und die Lieferung der elektronischen Komponenten genutzt werden.

Bis Ende Februar wird dieser erste Prototyp zusammengebaut, bei welchem die Sensoren, Aktoren und das ganze Antriebskonzept dem finalen Prototyp entsprechen. Dieser Aktor-Sensor-Prototyp² stellt alles Wichtige für die Steuerung und Regelung bereit. Danach sollte genügend Zeit bleiben die einzelnen mechanischen Komponenten allenfalls zu verbessern, sowie die Verschalung zu realisieren.

Die Erfahrung aus den letzten Fokusprojekten hat gezeigt, dass die Implementierung und die Tests sehr viel Zeit in Anspruch nehmen. Durch den zur Verfügung stehenden AS-Prototypen können die elektronischen Bauteile ab Anfang März eingebaut und die Regelung getestet werden. Mit der Fertigstellung der Verschalung bis Anfang Mai bleibt genügend Zeit, die Parameter anzupassen, um am Rollout-Event den funktionierenden, finalen Prototypen vorzuführen.

Die wichtigsten Meilensteine des Projektes sind in der Tabelle 1.3 aufgeführt.

| Datum | Meilensteine |
|-------------------|--|
| 13. November 2009 | Antriebskonzept |
| 11. Dezember 2009 | Bestellungen AS-Prototyp (Mechanik & Elektronik) |
| 22. Februar 2010 | Eintreffen des Materials |
| 01. März 2010 | AS-Prototyp endmontiert |
| 29. März 2010 | AS-Prototyp balanciert |
| 5. Mai 2010 | Verschalung und Gegenhalter fertig |
| 28. Mai 2010 | Rollout-Event |
| 2. Juni 2010 | Technische Präsentation des Prototypen |
| 21. Juni 2010 | Abgabe Projektbericht |

Tabelle 1.3: Übersicht der wichtigsten Meilensteine des Projektes

Der komplette Zeitplan mit allen wichtigen Daten kann dem Anhang A.1 entnommen werden.

1.5.4 Finanzen

Das Fokusprojekt Rezero wird von Disney finanziert. Dabei ist zu Projektbeginn die Summe von 20 000 sFr. zur Verfügung gestellt worden.

In der zweiten Projekthälfte ist eine Budgeterhöhung beantragt worden, da insbesondere die Realisierung des Designs und die Bachelorarbeiten einen grösseren Aufwand zur Folge hatten als ursprünglich eingeplant. So konnten die finanziellen Mittel auf einen Gesamtbetrag von 24 000 sFr. erhöht werden.

Im Budget wird dieser Betrag auf die folgenden Posten verteilt: Mechanik,

²nachfolgend abgekürzt als AS-Prototyp

Elektronik, Infrastruktur und PR, Sensoren, Design sowie eine Reserve. Die aktuelle Situation der Finanzen ist in Abbildung 1.4 dargestellt.

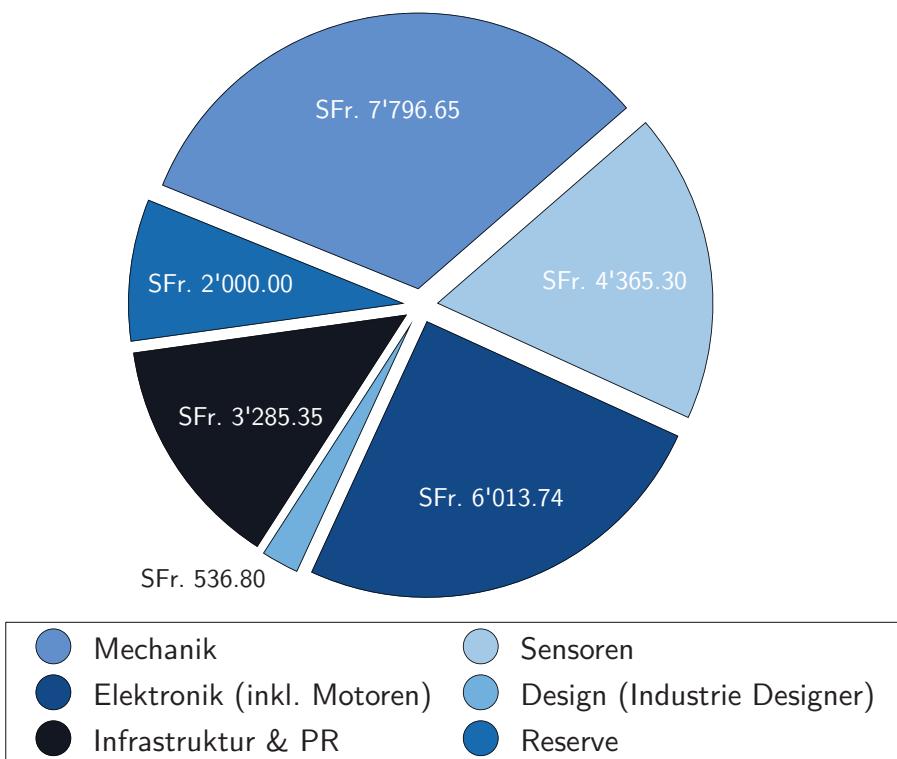


Abbildung 1.4: Kostenübersicht des Projektes

Das Projekt wird zusätzlich von einer Vielzahl verschiedenster Partner unterstützt, ohne die ein solches Projekt nicht durchzuführen wäre. Die Gesamtkosten des Projektes belaufen sich auf rund 40 000 sFr., die Unterstützung durch die Partner macht also fast die Hälfte des gesamten Projekt-budgets aus. Um den Budgetrahmen nicht zu sprengen, können mit Vereinbarungen zusätzliche Kosten eingespart werden. Zum Beispiel betragen die Herstellungs- und Fertigungskosten der Kugel über 8 000 sFr. Durch die Teilnahme von Rezero an der Swisstech im November 2010 wird dieser Betrag jedoch von der Kundert AG übernommen. Das Team wird an dieser Messe mit Rezero am Stand der Firma vertreten sein. Eine ähnliche Situation herrscht bei den Omniwheels, welche von der Samuel Werder AG gefertigt werden. Die Rohmaterial- und Fertigungskosten dieser Teile belaufen sich auf einen vierstelligen Betrag, in Rechnung gestellt werden jedoch nur die Materialkosten von 500 sFr. Diese Reduktion ist möglich, da Rezero Mitte August 2010 an einem internen Firmenanlass ausgestellt wird und so die Samuel Werder AG auf eine aussergewöhnliche Art vertritt.

Grundsätzlich wird bei sämtlichen Bestellungen und Fertigungsaufträgen detalliert auf das Projekt, die Zusammenarbeit mit angehenden Ingenieuren und die mediale Wirkung aufmerksam gemacht, um so die Vorteile einer Beteiligung einer externen Firma zu unterstreichen. Zusätzlich stehen Leistungen zur Verfügung, welche das Team den Partner anbieten kann. Dies sind unter anderem die Präsenz der Firma auf der Projektwebsite, die Bereitstellung von Infomaterial für Firmenbroschüren, sowie persönliche Einladungen zum Rollout-Event und zu den Reviews.

In der Abbildung 1.5 ist das gesamte Sponsoring der Partner im Verhältnis zu den Gesamtausgaben visualisiert. Dank diesen Partnerschaften konnte das Projekt überhaupt erst realisiert werden.

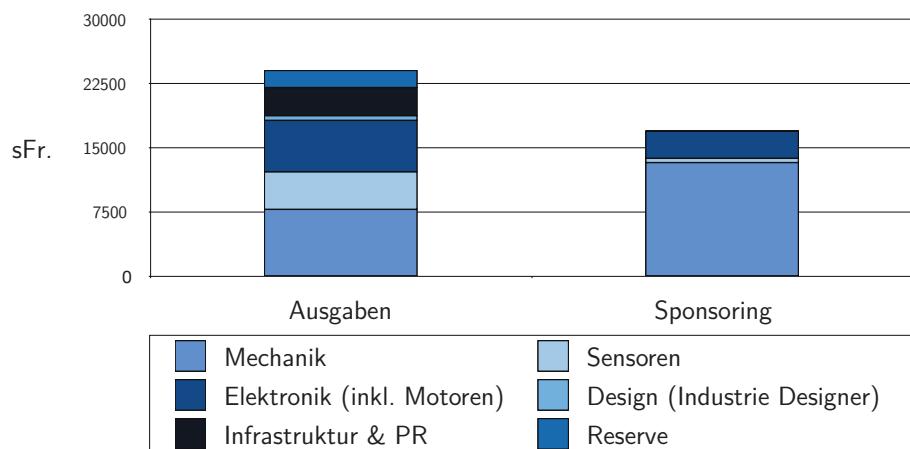


Abbildung 1.5: Kostenbilanz nach Kostenstelle

1.5.5 Infrastruktur

Die Infrastruktur und Räumlichkeiten haben enormen Einfluss auf das Projekt. Im ersten Semester sind dem Team drei Büros und ein grosser Sitzungssaal im LEC Gebäude zur Verfügung gestanden. Sitzungen, Reviews und Besprechungen konnten zuverlässig im Sitzungszimmer abgehalten werden. Anfangs November hat ein Umzug in die neuen Räumlichkeit im LEO Gebäude stattgefunden, wo dem Team neu ein Bürraum sowie eine Arbeits- und Testfläche in der Halle des LEO Loft zur Verfügung stehen. Sämtliche CAD-Arbeitsstationen und Bürotische sind in einem Raum untergebracht. Für Tests, Präsentationen, Vorstellungen und die technische Endpräsentation hat sich die Haupthalle des NO-Gebäude als sehr geeignet herausgestellt. Die helle, übersichtliche Halle ist zu einem optimalen Testgelände für Rezero geworden, wo das Team etliche Stunden, meist ungestört, testen durfte. Zu-

sätzlich kann, dank einer Gebäudezutrittskarte, welche vom Gebäudedienst beantragt werden kann, auch an Wochenenden und am späten Abend ausgiebig getestet werden.

Neben den Räumlichkeiten sorgt seit Beginn des Projektes die PLM³ Software von Siemens für den Austausch der Informationen. Das Teamcenter Community wird vom ganzen Team für die zentrale Dateiverwaltung verwendet. Des weiteren werden Termine verwaltet sowie Diskussionen abgehalten. Eine wichtige Kernaufgabe der PLM Software bildet die Integration von NX 6⁴ ins Teamcenter, was eine kollaborative Arbeit im CAD für die Konstruktion ermöglicht. In NX 6 kann das Modell zentral verwaltet werden und wichtige Daten wie technische Zeichnungen für die Fertigung oder Messgrößen für das Modell können daraus gewonnen werden.

Für die Regelungstechnik und die Visualisierung des Modells steht MathWorks MATLAB/Simulink zur Verfügung. Basierend auf diesem System erfolgt die Reglerauslegung und die Verifikation des Modells an der Simulation. Aufwändige analytische Berechnungen können in Wolfram Mathematica aufgestellt und ausgeführt werden.

Ein eigener Server verwaltet sämtliche Programmcodes, Arbeitsberichte und die Daten zu den Bachelorarbeiten. Dank einer Versionskontrollsoftware können Änderungen im Programmcode und ältere Versionen jederzeit wieder betrachtet und zurückgeholt werden. Zudem bietet sie eine zusätzliche Sicherheit gegen einen allfälligen Datenverlust, da sämtliche Dokumente nicht nur lokal auf den Rechnern, sondern auch zentral auf dem Server abgelegt sind.

1.5.6 Risikoanalyse

Eine Projektarbeit ist immer mit verschiedenen Risiken verbunden. Um diese rechtzeitig zu erkennen und wenn möglich zu vermindern, werden jeweils in den wöchentlichen Sitzungen Probleme und Gefahren für den Erfolg des Projektes besprochen. Diese Risiken werden bewertet und diskutiert und die daraus möglicherweise resultierenden Folgen besprochen und dazugehörige Ersatzlösungen erarbeitet. Folgende Risiken sind im Verlaufe des Projektes aufgetaucht:

³Product Lifecycle Management

⁴CAD Software Unigraphics NX 6 von der Firma Siemens

Teamgrösse

Das Team ist für ein Fokusprojekt relativ gross, was immer wieder zu Schwierigkeiten, langen Diskussionen und Konflikten führt. Deshalb hält sich das Team an klare Kommunikationsrichtlinien, Verhaltensregeln und eine strikte Arbeitsverteilung. Sitzungen werden, wenn möglich, kurz und nur mit den nötigen Teilnehmern abgehalten. Bei Problemen stehen dem Team Valentin Gresch und Ina Goller zur Seite.

Genauigkeit der Sensoren

Die Regelbarkeit und somit das gesamte Projektergebnis hängen entscheidend von der Qualität der Messgrössen ab. Insbesondere für die Messung des Neigungswinkels des Aufbaus muss eine möglichst präzise und rauscharme Lösung gefunden werden, damit der instabile Ballbot geregelt werden kann. Ein Ersatzplan sieht zusätzliche Sensorfusion vor, sollten die ersten Ergebnisse nicht zufrieden stellend sein.

Haftreibung an der Kugel

Eine grosse Herausforderung stellt die Übertragung der Kräfte auf die Kugel dar, wozu ein sehr hoher Haftreibungskoeffizient benötigt wird. Falls mit der passenden Beschichtung der Kugel und der Rollen des Omnidwheels diese Kräfte nicht übertragen werden können, sieht der Ersatzplan vor, durch einen Gegenhalter die Kugel von unten her an den Roboter zu drücken um so die Anpresskraft zu erhöhen.

Infrastruktur

Mitte des ersten Semesters hat der Umzug in die neuen Räumlichkeiten stattgefunden. Wichtig ist hier ein reibungsfreier Ablauf gewesen, damit die Arbeiten im neuen Büro mit minimaler Zeitverzögerung fortgeführt werden konnten.

Teamcenter

Das Teamcenter soll die Handhabung der CAD-Dateien vereinfachen. Dies ist jedoch mit einigen Tücken verbunden, besonders wenn Dateien fälschlicherweise schreibgeschützt sind oder der Server nicht zur Verfügung steht. Die Situation verbessert sich stetig im Verlaufe des Projektes, doch es be-

reitet trotzdem immer wieder Unannehmlichkeiten, weshalb hier jeweils mit einer zeitlichen Reserve geplant wird.

Kugel

Die geforderten, hohen Ansprüche an die Kugel stellt eine grosse Herausforderung dar, da auf kein Standardprodukt zurückgegriffen werden kann. Um mehr Zeit für die Evaluierung und Umsetzung einer optimalen Lösung zu gewinnen und den Fortschritt des Projektes nicht aufzuhalten, wurden die ersten Tests auf einer minderwertigen, aber sofort verfügbaren Polyethylenkugel durchgeführt. Erst für die dynamischen Tests konnte auf die Spezialkugel und damit verbundenen höheren Haftreibungskoeffizienten gewechselt werden.

Budget

Bezüglich Budget bestand das Risiko, dass nicht genügend Geld zur Verfügung steht für die vollständige Realisierung des Designkonzepts. Hätte dieser Engpass nicht behoben werden können, wäre eine Vereinfachung des Designs nötig geworden oder es hätten zusätzliche Partner gefunden werden müssen, um die Fertigungskosten zu senken und das Budget nicht zu überschreiten.

Defekte

Das Versagen oder die falsche Handhabung von Bauteilen ist als Risiko eingestuft worden. Im Falle eines Defektes gibt es die Möglichkeit dieses Bauteil zu reparieren oder zu ersetzen. Bei Ausfällen von Bauteilen kann weiterer Schaden durch die Konsultation von Experten verhindert werden. Für ein solches Szenario ist im Budget ein extra Posten mit Reserve eingeplant.

Zeit

Der gegebene Zeitrahmen stellt das grösste Risiko dar, deshalb findet die Planung immer mit einer gewissen Reserve statt. Erfahrungen aus früheren Projekten haben gezeigt, das tendenziell gegen Abschluss des Projektes die Zeit für Tests und Verbesserungen fehlt, weshalb eine relativ frühe Realisierung eines ersten Prototypen angestrebt wird.

1.6 Struktur des Berichtes

Der vorliegende Endbericht ist in acht Kapitel gegliedert. In der Einleitung wird auf Rahmen- und Ausgangsbedingungen des Fokusprojektes eingegangen. Sie zeigt die Zusammensetzung und Situation des Teams auf und beschreibt dessen Ziel und Wissensstand zu Projektbeginn. Weiter werden Risiken und der Zeitplan diskutiert.

Kapitel 2 geht detailliert auf den durchlaufenen Konzeptprozess ein. Es beschreibt einerseits das gewählte Vorgehen des Teams und stellt anschliessend, ausgehend von den definierten Projektzielen, die Entwicklung des Gesamtkonzeptes vor. Der Leser erhält einen Gesamtüberblick des später realisierten Ballbots.

Das Kapitel Konstruktion und Fertigung geht explizit auf die Entwicklung aller mechanischen Komponenten ein. Für diese wird zuerst ein Detailkonzept erläutert und danach die Konstruktion und Fertigung der entsprechenden Bauteile beschrieben.

Die Detailkonzepte der Signalverarbeitung und der Energieversorgung werden in Kapitel 4 diskutiert. Anschliessend werden die wichtigsten elektronischen Komponenten anhand der an sie gestellten Anforderungen evaluiert und vorgestellt.

Kapitel 5 geht auf die Systemmodellierung, die Regelung und die Simulation des Systems ein. Es präsentiert die erarbeiteten Modelle und die darauf basierenden Regler sowie die Visualisierung des Systemverhaltens.

Die Steuerung wird im Kapitel 6 behandelt, wo detailliert auf die verschiedenen Steuerungskonzepte eingegangen wird und Aspekte der Sicherheit und Bedienbarkeit des Systems aufgezeigt werden.

Kapitel 7 beschreibt die Leistungsanalyse des finalen Prototypen, wo die verschiedenen durchgeföhrten Tests genau erläutert und die Ergebnisse diskutiert werden.

Im abschliessenden Kapitel Zusammenfassung werden die erreichten Resultate diskutiert und mit bestehenden Lösungen verglichen. Der Bericht schliesst mit einem Ausblick und Empfehlungen für nachfolgende Projekte.

2 Konzeptprozess

2.1 Ausgangslage

2.1.1 Anfangs- und Rahmenbedingungen

Die Konzeptphase in einem Fokusprojekt nimmt erfahrungsgemäss einen grossen Teil der gesamten Projektzeit in Anspruch und umfasst von der Definition der Projektziele über Machbarkeitsstudien bis zu detaillierten Teilkonzepten sämtliche fundamentalen Entscheidungen des Projektes. Das Konzept soll ein solides Fundament für alle weiteren Schritte bieten und hat aus diesem Grund zu Beginn des Projektes höchste Priorität. Grossen Einfluss auf die Entstehung und Ausarbeitung aller konzeptioneller Ideen haben dabei gewisse Anfangs- und Rahmenbedingungen, auf die hier kurz eingegangen wird.

Die begrenzte Menge an finanzieller Ressourcen und Zeit¹ schränken den Umfang des Projektes spürbar ein und beeinflussen daher auch den Konzeptprozess. Es wird daher bereits ab der ersten Ideensuche stark auf die Realisierbarkeit der Ideen geachtet.

Im Rahmen ihrer bisherigen Ausbildung sind die meisten Projektmitglieder bereits mit den Grundsätzen des Innovationsprozesses vertraut gemacht worden.² Dieses Wissensfundament dient als Ausgangslage für die Vorgehensweise während der Konzeptphase und ist Grundlage für die angewandten Methoden und Instrumente.

Erwähnenswert ist ausserdem die interdisziplinäre Natur des Projektes. Durch die Beteiligung von Studenten aus drei verschiedenen Fachrichtungen herrschen anfangs unterschiedliche Vorstellungen eines Konzeptes und dessen Entstehungsprozess'. Vor allem die Zielvorstellung, Motivation und Arbeitsmethodik der Industriedesignstudenten, alle mit nicht-technischer Ausbildung, erweiterten das Bild eines Ballbots um interessante Aspekte, welche in den Konzeptprozess integriert werden.

¹vergleiche dazu auch Unterkapitel 1.5 Projektorganisation

²als Lehrmittel diente [26]

2.1.2 Anspruchsgruppen

Ein Entwicklungsprojekt hat den Ansprüchen, Forderungen und Bestimmungen einer Reihe von Anspruchsgruppen zu genügen, welche den Konzeptprozess massgeblich beeinflussen. Diese Ansprüche begrenzen den Lösungsspielraum des Projekts. Im Normalfall sind dies hauptsächlich Markt- und Kundenbedürfnisse. Solchen muss aber das Fokusprojekt Ballbot als Ausbildungs- und Forschungsprojekt nur bedingt nachkommen.

Im Folgenden soll auf die wichtigsten Anspruchsgruppen dieses Projektes, dargestellt in Abbildung 2.1, kurz eingegangen werden.

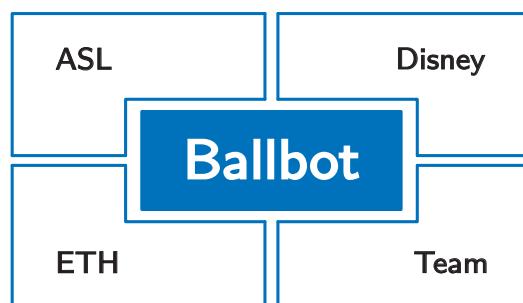


Abbildung 2.1: Die wichtigsten Anspruchsgruppen

Hauptsponsor Disney

Disney unterstützt das Projekt finanziell und stellt nur Bedingungen bezüglich Auftritt des Projektes in der Öffentlichkeit. Zu Resultat, Zweck und Form des Ballbots existieren keine Vorgaben. Informationsaustausch und Feedback beschränken in der Konzeptphase auf ein Minimum.

Trotzdem herrscht die Erwartungshaltung seitens Disney, von Rezero beeindruckt und positiv überrascht zu werden. Er soll einen „Wow-Effekt“³ hervorrufen. Das präsentierte Resultat soll neue, innovative Ideen aufzeigen und als Inspirationsquelle dienen.

Der Tätigkeit von Disney im kinderfreundlichen Unterhaltungsbereich wird stets Rechnung getragen und ist immer wieder Entscheidungsgrundlage.

Mit den ersten Resultaten ist Disney auch mehr und mehr am Projekt und Prototypen interessiert und versucht gemeinsam mit dem Projektteam einen zukünftigen Technologietransfer zu organisieren.

³Dieser Ausdruck beschreibt einen Effekt des Erstaunens und der Faszination und wird als Schlagwort immer wieder verwendet.

Autonomous Systems Lab und ETH Zürich

Das Projekt wird durch das Engagement von Prof. Dr. Roland Y. Siegwart und das Autonomous Systems Lab ermöglicht und getragen. Seine Kernaufgabe beschreibt das Institut selbst folgendermassen:

„Our primary research interest is in the development of intelligent products and systems with special emphasis on autonomous mobile robots. We are interested in the mechatronic design and control of such systems that autonomously operate operating in uncertain and highly dynamical environments.“ [4]

Das Bild des ASL in der Öffentlichkeit, sowie dessen Tätigkeitsschwerpunkte und Forschungsinteressen sollen richtungsweisend für das Projekt sein und durch selbiges nicht in Frage gestellt werden. In seiner Aufsichts- und Lehrfunktion verlangt das Institut ausserdem einen fundierten und transparenten Innovationsprozess.

Das Fokusprojekt Ballbot tritt offiziell und öffentlich als ETH-Projekt auf. Somit ist auch die ETH, als Hochschule im internationalen Umfeld, an einem qualitativ hochwertigen Prototypen, innovativen Ideen und einer wissenschaftlich gehaltvollen Lösung interessiert.

Das Projektteam

Weil der Handlungsspielraum des Teams in einem Fokusprojekt durch Fehlen von Kundenbedürfnissen und der traditionellerweise offenen Aufgabenstellung sehr gross ist, rücken die persönlichen Interessen der Teammitglieder als Motivationstreiber stark ins Zentrum. Das Projektteam hat sich mit der Vision, gemeinsam einen Ballbot zu entwickeln, gefunden und motiviert, dies innerhalb dieses Projekts zu realisieren. Es ist wichtig zu erkennen, dass die Festlegung auf diese Technologie auf einem willkürlichen Wunsch des Teams aufbaut und andere, oft besser geeignete Lösungen für ein bestimmtes Problem, im Voraus ausschliessen. So spiegeln auch die Zieldefinition⁴ und andere Konzeptentscheide zu einem grossen Teil die persönlichen Vorstellungen der Teammitglieder wider.

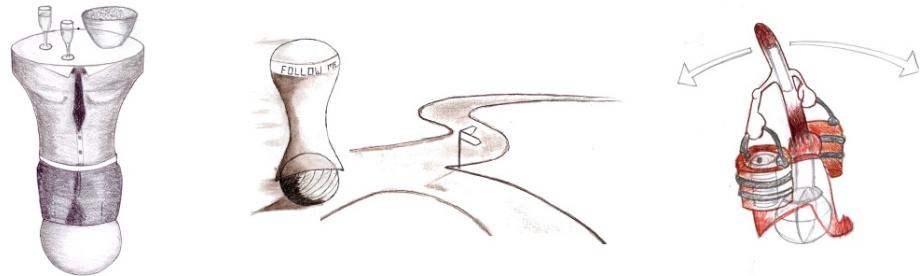


Abbildung 2.2: Erste Visionen des Ballbots



Abbildung 2.3: Der Ballbot als Showobjekt [31]

2.1.3 Erste Vorstellungen

Bereits beim ersten Gedankenaustausch zeigt sich, dass sich die persönlichen Vorstellungen der Projektmitglieder bezüglich Form, Grösse, Fähigkeiten und vor allem Funktion des Ballbots stark unterscheiden. Gesammelte Vorschläge reichen von einem Fussballspieler über einen Rettungs- und Informationsballbot bis zur Entwicklungs- und Demonstrationsplattform. Das visuelle Erscheinungsbild kann ebenfalls noch nicht eingegrenzt werden.

⁴vergleiche dazu auch Unterkapitel 2.3 Zieldefinition

2.2 Vorgehensweise

2.2.1 Vorstudie: Zieldefinition

Erste Brainstormings zeigen zwei qualitativ unterschiedliche Arten von vorgeschlagenen Zieldefinitionen:

- Der Ballbot soll einem bestimmten Zweck dienen oder gewisse Aufgaben erfüllen. Die Funktion wird vorgegeben. Als Beispiel könnte ein Stadtführer-Ballbot dienen.
- Rezero soll eine Reihe von Merkmalen und Fähigkeiten aufweisen. Eigenschaften werden spezifiziert, der Verwendungszweck wird offen gelassen. Beispielsweise soll sich der Ballbot agil fortbewegen können.

Schnell wird ersichtlich, dass sich das gesetzte Ziel, einen Ballbot zu entwickeln und eine möglichst überzeugende Lösung zu präsentieren, schlecht mit der Vorgabe einer bestimmten Funktion kombinieren lässt. Ein Ballbot hat offensichtliche Nachteile, wie Energieverbrauch im Ruhezustand, Instabilität und eine hohe Komplexität, welche ihn bei einem Grossteil aller Probleme gegenüber alternativen Antriebstechnologien als optimale Lösung disqualifizieren. Ziel des Projektes soll aber klar sein, die Einzigartigkeit und Faszination des Antriebs auf einer Kugel auszunutzen und zu präsentieren.

Das Einzigartige an einem Ballbot liegt eindeutig in seiner Omnidirektionallität und seinem Bewegungspotential. Dies macht, zusammen mit der ungewohnten Erscheinung, dessen Faszination aus und kann ein breites Publikum beeindrucken. Das Projektteam ist sich einig, dass dieses Potential auszureißen höchste Priorität hat und notwendig sein muss, um eine allfällige Funktion zu erfüllen. Der Zwang einen Prototypen zu realisieren, bringt einen zusätzlichen Aspekt ins Spiel: Da es sehr schwierig abzuschätzen ist, wie problematisch bereits ein einfaches Ausbalancieren des Ballbots ist, hat das Erreichen zufriedenstellender Bewegungseigenschaften hohen Stellenwert. Das Ausrichten des Ballbots auf eine bestimmte Funktion, bereits von Beginn an, stellt einen Interessenkonflikt dar und zweigt Ressourcen ab.

Aus diesen Gründen sollen in einem ersten Schritt Eigenschaften des Ballbots, losgelöst von einer potentiellen Funktion, spezifiziert werden. Durch diesen Entscheid ist das Projektziel abstrahiert worden. Im Fokus steht nun die Kerntechnologie des Ballbots und deren Optimierung. Mögliche Verwendungszwecke werden zwar gesucht, haben aber keinen konstruktiven Einfluss. In einem nächsten Schritt werden nun mögliche Eigenschaften und Fähigkeiten eines Ballbots gesammelt und vom ganzen Team eine zu realisierende

Auswahl getroffen. Dank diesem Schritt können sich alle dreizehn Teammitglieder geschlossen hinter eine Vision stellen und es kann ein Lastenheft formuliert werden.⁵

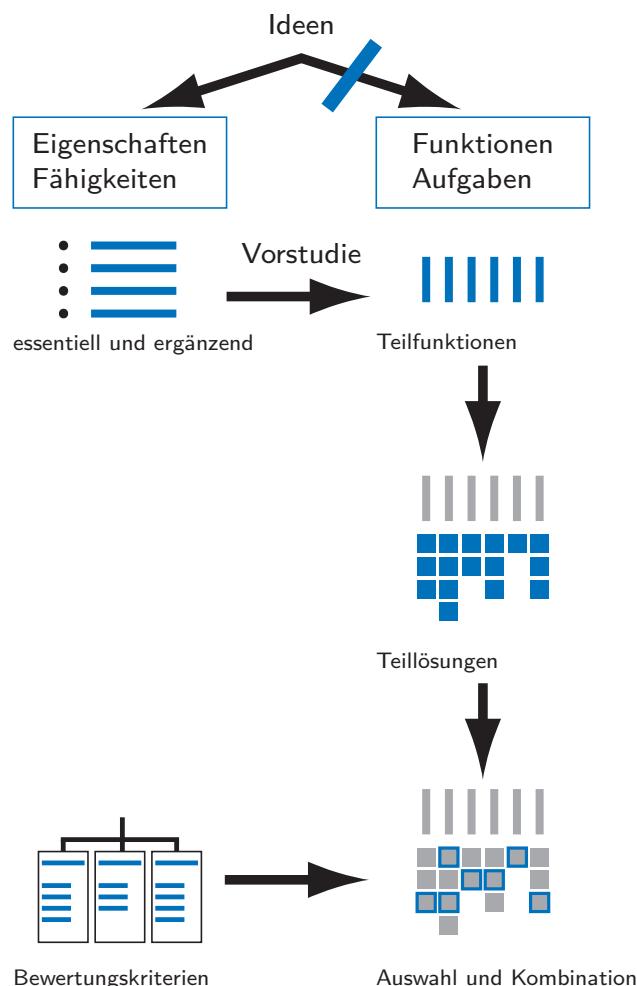


Abbildung 2.4: Schema des Konzeptprozesses

2.2.2 Hauptstudie: Vom Lasten- zum Pflichtenheft

Technische Produkte werden nach Funktionen klassifiziert und spezifiziert. Das Konzeptinstrument des morphologischen Kastens, bei dem die Funktionen eines Produkts in elementare Teilfunktionen zerlegt und anschliessend jeweils dazu gefundene Teillösungen zu einer Gesamtlösung kombiniert werden, hat sich bereits in früheren Projekten bewährt und soll auch auf den

⁵vergleiche Unterkapitel 2.3 Zieldefinition

Ballbot angewendet werden.

Da aber bewusst keine Funktionen sondern Eigenschaften spezifiziert worden sind, müssen innerhalb einer Hauptstudie erst die, für jede Eigenschaft erforderlichen, Tealfunktionen definiert und deren technische Anforderungen soweit als möglich spezifiziert werden. Mit einer bereinigten Liste von Tealfunktionen kann so ein Gerüst eines morphologischer Kastens erstellt und ein erstes Grobkonzept formuliert werden.

In einer divergenten Phase werden mittels Literaturrecherche und Brainstorming potentielle Teillösungen gesucht. Durch eine detaillierte Hauptstudie, im Sinne einer Machbarkeitsuntersuchung, ist in einem nächsten Schritt jede Teillösung in kleinen Unterteams und in regem Kontakt zu diversen Professoren und Fachpersonen bewertet worden. Dies ist anhand vorher definierter Bewertungskriterien geschehen. Die verschiedenen Teillösungen sind so untereinander vergleichbar und unzureichende Varianten können aussortiert werden.

Für die Konkretisierung zu einem Detailkonzept sind die einzelnen Teillösungen zu einer Gesamtlösung zu kombinieren. Für entkoppelte Tealfunktionen erfolgt die Auswahl der Teillösung durch eine Nutzwertanalyse. Komplexere Lösungen für ganze Tealfunktionsblöcke werden zusätzlich in Detailstudien genauer untersucht und der Entscheid wird innerhalb des ganzen Teams diskutiert und gefällt. Der Zeitpunkt der fälligen Entscheidung wird ausserdem individuell, entsprechend der Grobplanung und entsprechender Milestones, angesetzt. So entstehen nach und nach die nötigen Detailkonzepte, welche die Anforderungen des Lastenhefts erfüllen.

2.2.3 Entwicklung des Designkonzeptes

Der Wegfall einer konkreten Funktion des Ballbots hat die Aufgabenstellung für die drei Industriedesigner komplett neu definiert. Neu soll das Erscheinungsbild die definierten Eigenschaften visuell unterstreichen und in Szene setzen. In einem von der Zürcher Hochschule der Künste fest vorgegebenen, dreiwöchigen Zeitfenster, soll das visuelle Design Rezeros ausgearbeitet werden. Weil die Designer für ihre Arbeit genaue Angaben zu geometrischen Dimensionen, Bauraum für die technischen Komponenten und Antriebskonzept benötigen und dieses Zeitfenster bereits Ende Oktober angesetzt ist, müssen fundamentale Eckdaten und Spezifikationen innert kürzester Zeit verbindlich festgelegt werden. Dies hat zur Folge, dass gewisse Tealfunktionen sehr rasch ausgearbeitet und andere aufgeschoben werden müssen.

Glücklicherweise konnten die zu diesem frühen Zeitpunkt definierten Spezifikationen bis zum Ende des Projektes vollumfänglich eingehalten werden. Die Arbeit der Designstudenten läuft grösstenteils entkoppelt von der technischen Entwicklung. Sie arbeiten selbstständig in ihren Räumlichkeiten. Die Anforderungen an das Design werden gemeinsam entwickelt und enthalten auch eine Reihe technischer Anforderungen, die berücksichtigt werden müssen. Auch technische Designelemente werden als Ideensammlung mitgegeben. Nach der Präsentation von vier Formstudien holen sie die Meinungen und Vorstellungen des Teams ein, um damit erste plastische Modelle zu fertigen. Dabei entsteht das Konzept eines Ballbot mit einer Verschalung aus dynamisch bewegten Lamellen und skulptural abstraktem Design. Im weiteren, iterativen Designprozess werden diese Ideen ausgearbeitet, Form, Farben und Materialien bestimmt und immer wieder Kompromisse gefunden. So hat der später benötigte Laserdistanzsensor grosse Konsequenzen für das Design und führt zu grossen Diskussionen. Abschluss des Designkonzept bildet ein 1:3 Modell des Prototypen aus welchem viele Erkenntnisse für die Fertigung der Verschalung gewonnen werden können.

2.2.4 Berücksichtigung externer Rückmeldungen im Konzept

Die Rückmeldungen zum ersten Projektreview Anfang November zeigen klar, dass der Fokus auf die Kerntechnologie und die fehlenden Funktionen von aussenstehenden Personen entweder nicht verstanden oder negativ aufgefasst worden sind. Es ist ein klares Bedürfnis nach Interaktion und nach einer konkreten Funktion vorhanden, die Erwartungen des ASL und von Disney sind nur teilweise erfüllt. In einem Teamentscheid wird die Aufnahme des Feedbacks in einem erweiterten Konzept entschieden. Ein Demonstrationskonzept wird erarbeitet, welches festhält, wie Design und Technik des Ballbots der Öffentlichkeit vermittelt werden sollen und so zu dem, auch von Disney gewünschten, „Wow-Effekt“ führt. Dieses hat auch Auswirkungen auf das technische Konzept, da nun zusätzliche Interaktionssensoren benötigt werden. Durch diese Erweiterung fügt sich das Projekt nun aber besser in das ASL-Portfolio ein und auch die Funktion des Prototypen als interaktives Unterhaltungsobjekt und Technologiedemonstrator wird offensichtlich.

2.3 Zieldefinition

Die Entscheidung, den Fokus auf die Kerntechnologie zu legen und diese durch eine Liste zu optimierender Eigenschaften zu beschreiben, hat relativ rasch zu diesem Projektziel geführt:

„Das Projekt Ballbot untersucht die vielfältigen Möglichkeiten der Fortbewegung auf einer Kugel und versucht diese mit einem Prototypen aufzuzeigen. Dieses Prinzip soll technisch ausgereizt werden und das Produkt so gestaltet sein, dass es einem breiten Publikum zugänglich ist.“

Ausreizen der Technologie bedeutet hierbei, dass Rezero der erste Ballbot ist, bei dem nicht das blosse Ausbalancieren, sondern ein schnelles, agiles Bewegungsverhalten im Vordergrund steht. Ziel ist es, einen Ballbot zu entwickeln, dessen Bewegungen bezüglich Dynamik und Agilität, im Rahmen der heutigen technischen Möglichkeiten, einzigartig sind. Durch ein visuelles Design, welches diese Einzigartigkeit unterstreicht und Emotionen weckt. In Kombination mit faszinierenden Demonstrationsfähigkeiten soll Rezero ein möglichst breites Publikum ansprechen und unterhalten. Etwas genauer betrachtet, besteht das Projekt aus drei einzelnen Elementen, welche jeweils einen spezifischen Teil des Projektziels erfüllen und im Zusammenspiel eine abgerundete Einheit bilden:

1. Die technischen Eigenschaften
2. Das visuelle Design
3. Die Technologiedemonstration

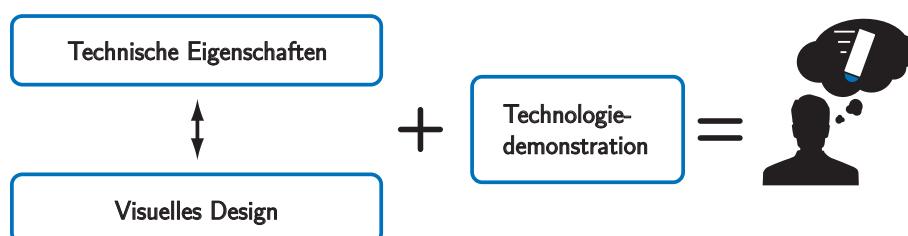


Abbildung 2.5: Die drei Projektelemente

Jedes dieser drei Elemente trägt seinen Teil zur Erfüllung des Projektziels bei und besteht wieder aus einer Reihe von Zielen.

Die folgenden Abschnitte gehen jeweils individuell auf die Projektelemente ein.

2.3.1 Technische Eigenschaften

Definiert ist einen Ballbot als dreidimensionales invertiertes Pendel, welches sich auf einer frei rollenden Kugel ausbalancieren kann. Die essentiellen Eigenschaften eines Ballbots sind vom Team zusammengetragen und als Kerneigenschaften definiert worden. Sie müssen zwingend realisiert werden. Diese Liste ist zusätzlich um eine Reihe ergänzender Eigenschaften und Fähigkeiten erweitert worden, welche den Ballbot sinnvoll ergänzen und viel zu dessen Eindruck beitragen. Ergänzende Eigenschaften sollen die Kernfunktionen nicht behindern.

Diese Liste bezeichnet zugleich die technischen Projektziele, die es zu erreichen gilt.

Kerneigenschaften

- mechanische Stabilität der Struktur
- robuste dynamische Stabilität in Bewegung und Lage
- hohe Bewegungspräzision
- hohe omnidirektionale Beschleunigungsfähigkeit
- interne Energieversorgung
- Fernsteuerung

Ergänzende Eigenschaften

- hohe Geschwindigkeit
- Rotationsfähigkeit um die eigene Achse
- Einsatz auf verschiedenen Untergründen
- lange Laufzeit
- Kollisionserkennung
- Interaktionsmöglichkeit mit dem Mensch
- Parkiermechanismus

In Worte gefasst, kann man diese Ziele wie folgt formulieren:

- Der Ballbot soll sich durch beeindruckend dynamische und agile Bewegungen auszeichnen.
- Der Antrieb soll hohe Beschleunigungen und Geschwindigkeiten ermöglichen und die bisherigen Ballbots übertreffen.
- Im Zentrum sollen die einzigartigen Möglichkeiten der Antriebstechnologie stehen; ein konkreter Verwendungszweck oder die Interaktivität mit Menschen sollen dieses Ziel nicht konkurrenzieren.

2.3.2 Visuelles Design

Durch die abstrakten Projektziele in Form von Eigenschaften entfällt auch ein mögliches, funktionales Design. Dies resultiert in einer sehr offenen Aufgabenstellung für die Industriedesigner. Die Form hat nun vielmehr durch ihre Sprache gewisse Assoziationen zu wecken und Akzente zu betonen. Die Kernanforderung an das Design verlangt eine positive Assoziation bei einer Mehrheit der Betrachter, was auch die Interessen Disneys widerspiegelt. In einem gemeinsamen Ideenfindungsprozess werden also aus den technischen Eigenschaften konkrete und konsequente Anforderungen an das visuelle Design abgeleitet:

Rezeros Erscheinungsbild soll seine technischen Eigenschaften aufgreifen und visuell vermitteln. Es soll einen Eindruck von Leichtigkeit und Agilität wecken und die Bewegungen des Ballbots passend unterstreichen. Durch seine visuelle Gestaltung soll Rezero zum Leben erweckt werden und eine Charakter mit Persönlichkeit geformt werden. Das Design soll den „Wow-Effekt“ verstärken und dabei den Fokus auf die Kugel und die Instabilität des Ballbots zentrieren.

Keinesfalls darf das Design mit der Technologie konkurrenzieren und die Realisierung des Design darf zu keinen prägnanten technischen Einschränkungen führen.

Zusätzlich muss das Design eine Reihe konkreter, technischer Rahmenbedingungen erfüllen. Beispielsweise ist der benötigte Bauraum für die technischen Komponenten ebenso vorgegeben, wie der maximale Neigungswinkel oder der Mindestabstand von der Verschalung zum Boden. Die technischen Bewegungseigenschaften des Ballbots sind festgesetzt. Weitere wichtige Anforderungen an das Design sind:

- Höhe und Form sind frei wählbar.
- Rotationssymmetrie nicht zwingend, aber zumindest eine dazu passende Lösung entwerfen
- Schwerpunkt über dem Kugelmittelpunkt
- Demontierbare und modular aufgebaute Verschalung
- Lösungsvorschläge zum Parkiermechanismus

Mögliche, technische Design- und Interaktionselemente wie verschiedenste Sensoren, Bildschirme und LEDs, Kameras und Lautsprecher sollen in den Designprozess einfließen.

2.3.3 Technologiedemonstration

Aus externen Rückmeldungen ist schnell und deutlich ersichtlich geworden, dass die Kerntechnologie in Kombination mit einem modernen Design allein nicht genug faszinieren. Um ein breites Publikum in seinen Bann ziehen zu können, ist eine Technologiedemonstration notwendig, welche die Fähigkeiten des Ballbots auf eindrückliche und doch spielerische Art aufzeigt.

Anforderung an eine solche Präsentation soll hauptsächlich sein, dass die umgesetzten technischen Eigenschaften und das Design in bester Weise zur Geltung kommen. Ziel ist es, die Leistungsfähigkeit des Systems für die Demonstration komplett auszureißen und die visuelle Erscheinung von Rezero in einen passenden Kontext einzubetten.

Die Ausrichtung des Ballbot-Prototypen auf eine solche Technologiedemonstration liegt durchaus im Rahmen eines Fokusprojektes und lässt sich gut mit dem Rollout-Event vereinbaren. So zeigt sich auch seine Funktion in seiner Rolle als Showobjekt. Rezero soll in erster Linie unterhalten, beeindrucken und Emotionen wecken und so einen spielerischen Umgang mit der Ballbot-Technologie ermöglichen. Damit wird er gleich selbst Botschafter seines einzigartigen Bewegungspotentials.

2.4 Funktionsgliederung

Im Unterkapitel 2.2 ist auf die unkonventionelle Entstehung der Funktionsgliederung eingegangen worden. In einem weiteren Schritt wird beschrieben, wie das Gesamtsystem, „Rollen auf Kugel“, in seine Teilfunktionen unterteilt worden ist. Die Funktionsgliederung bildet im weitesten Sinne eine abstrakte Unterteilung des Systems ab. Anhand der einzelnen Teilfunktionen werden

später im Lösungsfindungsprozess Teillösungen gesucht. Insofern können nur Lösungen entstehen, welche in der Funktionsgliederung aufgelistet sind. Die Hauptfunktion des Ballbots ist ein mechanisches System, welches fähig ist, auf einer Kugel zu rollen. In diesem Sinn bildet, wie erwähnt, „Rollen auf Kugel“ die Grundfunktion eines Ballbots. Als Folge der Haupt- und Detailstudie wurden dem Ballbot gewisse Funktionen vorgegeben, welche die Hauptfunktion in mehrere, in Abbildung 2.6 dargestellte, Teilfunktionen unterteilt.

Die Steuerung des Systems ist aus dem Grund definiert, dass es möglich sein muss, den Ballbot nicht-autonom über ein Interface zu bedienen. Gewisse Bereiche der Steuerung sollen jedoch auch autonom vom System selber übernommen werden. In diesem Fall bildet eine autonome Kollisionsverhinderung ein wichtiger Punkt der Steuerung des Ballbots.

Als Grundlage für eine solide Steuerung benötigt das System Signale. Dabei werden jegliche Signale gespeichert, verarbeitet und übertragen. Eine Unterfunktion der Funktion „Signale“ bildet in diesem Fall auch „Signale erzeugen“. Sensoren und Aktoren erzeugen im Betrieb Signale, welche für das Stabilisieren, die Bewegung, eine Standortbestimmung und eben eine Hinderniserkennung verwendet werden müssen.

Die Energieversorgung stellt eine grundlegende Funktion des Systems dar, von welchem fast alle weiteren Teilfunktionen abhängen. Die Zufuhr, die Speicherung und die Verteilung der Energie bilden einen geschlossenen Kreislauf.

Als einer der markantesten Unterschiede zu bestehenden Ballbots, liegt bei Rezero grosses Gewicht auf der Agilität und den daraus resultierenden, organischen Bewegungen des Ballbots. Das Team stellt zudem den Anspruch, das System in eine Ruheposition versetzen zu können und dann den Ballbot parkieren zu können. Rezero soll also durch einen geeigneten Mechanismus auch statisch stehen können, ohne aktive Energieversorgung. Die Umsetzung dieser Teilfunktion ist allerdings von geringer Priorität und zählt daher zu den optionalen Projektzielen. Bezuglich der geforderten Agilität kommen auf die Teilfunktion „Antrieb“ zudem „Beschleunigen“, „Bremsen“, „Kraft erzeugen“, „Kraft übertragen“ und „Kraft einleiten“ dazu. Besonders auf die Krafteinleitung wird grosse Aufmerksamkeit gelegt, da diese eine der Schlüsselstellen der Agilität ausmacht.

Insofern, dass die Kugel eigentlich keine Funktion darstellt, sondern ein Element des Systems ist, ist sie trotzdem in der Funktionsgliederung aufgeführt, weil sie in Kombination mit einer geeigneten Lagerung zusätz-

liche Funktionen übernehmen wird. So werden über dieses Zusammenspiel gewisse Lagerungseigenschaften wie Federung und Dämpfung übernommen, die ein Abheben des Körpers von der Kugel sowie eine seitliche Verschiebung verhindert, als auch die Aufnahme der Schwerkraft realisiert. Weiter übernimmt die Kugel die Funktion der Krafteinleitung auf den Boden. Zusammengefasst stellt die Kugel also ein Träger verschiedenster wichtiger Teilfunktionen des Systems dar.

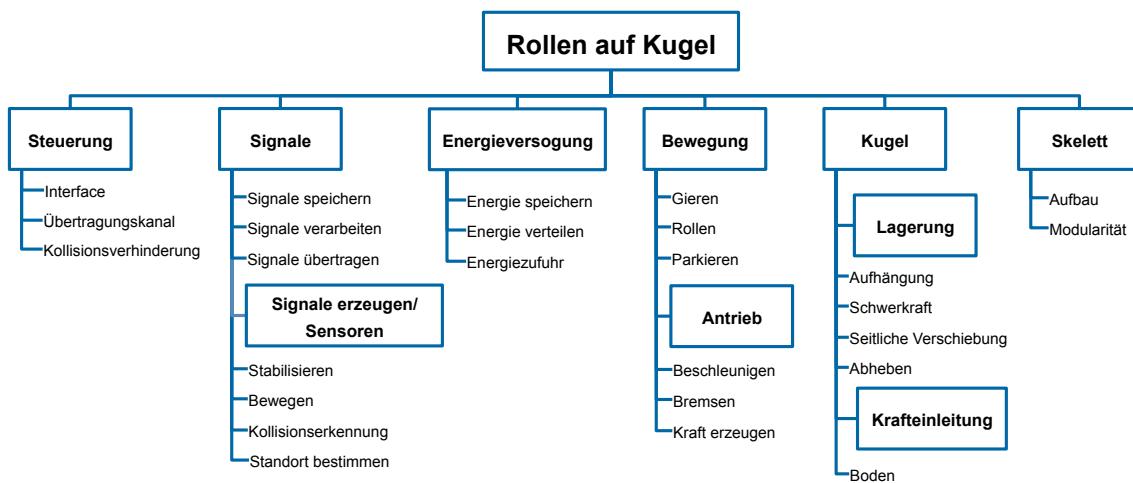


Abbildung 2.6: Funktionsgliederung (grössere Ansicht im Anhang A.4)

2.5 Technische Anforderungen

Ausgehend von den technischen Eigenschaften, welche in Abschnitt 2.3.1 beschrieben wurden, können technische Anforderungen formuliert werden.

2.5.1 Qualitative Anforderungen

Als Erstes soll in einer qualitativen Beschreibung aufgezeigt werden, welchen Einfluss die technischen Eigenschaften auf die verschiedenen Telfunktionen bzw. -lösungen haben.

Beschleunigungsfähigkeit

Um eine hohe Beschleunigungsfähigkeit zu erreichen muss die Masse minimiert werden. Das heisst, dass bei der Konstruktion und Dimensionierung von Elementen auf deren Leichtbauweise geachtet werden muss und dass bei

der Auswahl von bestehenden Komponenten die Masse ein wichtiges Entscheidungskriterium bildet.

Für die Energieversorgung lässt sich daraus schliessen, dass die Energiedichte maximiert werden soll. Dieses Ziel der Maximierung der Leistungsdichte gilt in analoger Weise auch für den Antriebsmechanismus.

Weiter hat der Luftwiderstand einen Einfluss auf die Beschleunigungsfähigkeit und man muss versuchen, dessen Wirkung möglichst gering zu halten, indem man möglichst kompakte Konstruktionen und Komponenten wählt.

Zur hohen Beschleunigungsfähigkeit muss, neben der Masse, auch das Trägheitsmoment minimiert werden, insbesondere jenes der schnell rotierenden Elemente wie Kugel und evtl. des Antriebsmechanismus.

Bewegungspräzision

Die Eigenschaft der Bewegungspräzision verlangt, dass das System möglichst gut erfasst bzw. beobachtet werden kann. Die Stabilitätssensoren, welche zwecks Lage- und Geschwindigkeitsbestimmung eingesetzt werden, müssen so gewählt und positioniert werden, dass alle sechs Freiheitsgrade (siehe 1.4), gemessen werden können. Da das System instabil ist, müssen diese Sensoren über die gesamte Nutzungsdauer verlässliche und genaue Werte liefern können. Die hohe Reaktionsgeschwindigkeit des Systems bedingt eine hohe Abtastfrequenz und eine möglichst latenzfreie Übertragung. Es ist darauf zu achten, dass die Stabilitätssensoren auch bei hohen Beschleunigungen keine Fehlabweichung aufzeigen dürfen.

Zudem bedingt die verlangte Bewegungspräzision, dass das System sehr gut steuerbar ist. So soll das Spiel im Antriebsmechanismus, der Schlupf zwischen Antriebsmechanismus und Kugel und zwischen Kugel und Boden minimiert werden, um Kräfte möglichst verlustfrei zu übertragen und Positionen präzise anfahren zu können.

Interne Energieversorgung

Die Kerneigenschaft interne Energieversorgung verlangt, dass die gesamte Energie, welche für alle Funktionen von Rezero nötig ist, vom System selbst mitgetragen wird. Es sollen keine Kabel von aussen oder ähnliche Lösungen eingesetzt werden. Dies bedingt, dass genug Energie gespeichert werden kann, um Rezero für eine bestimme Zeitdauer zu betreiben. Für den Einsatz in einer Demonstration können ca. 15 Minuten als sinnvolle minimale Betriebszeit veranschlagt werden, für welche die Energieversorgung unter

Vollauslastung ausgelegt werden muss. Da ergänzend in den Eigenschaften auch eine lange Laufzeit aufgeführt wird, sind längere Laufzeiten durchaus anzustreben.

Parkiermechanismus

Der Parkiermechanismus muss in der Lage sein, Rezero in einem nicht aktiven Zustand in aufrechter Position zu halten. Dabei soll es möglich sein, dass das System selbstständig aus dem aktiven Zustand in den Parkzustand übergeht und umgekehrt.

Interaktion

Die Interaktionssensoren dienen primär der Erkennung von umgebenden Objekten und könnten bei Möglichkeit auch zur Positionsbestimmung eingesetzt werden. Da ein Ballbot ein omnidirektionales fahrbare System ist, ist es sinnvoll, den Sensorerkennungsbereich in alle Richtungen zu fordern. Die hohen Geschwindigkeiten des Ballbots fordern weiter, dass die Interaktionssensoren schnell und mit einer grossen Reichweite funktionieren.

Höhe und Massenverteilung

Bei der Betrachtung eines Ballbots als invertiertes Pendel ist es offensichtlich, dass sich die Geschwindigkeit der relevanten Systemzustände, also die Raumlagewinkelgeschwindigkeiten, abhängig von der Pendellänge und der Pendelmasse sind. Folgende Formel beschreibt den Zusammenhang zwischen der Eigenfrequenz und der Pendellänge sowie Pendelmasse:

$$\omega_e \sim \frac{1}{l} \sqrt{\frac{1}{m}} \quad (2.1)$$

Umso kürzer das Pendel (bzw. umso kleiner der Ballbot) und umso leichter das Pendel (bzw. umso tiefer unten der Massenschwerpunkt), desto schneller muss also die Regelung arbeiten, um das System stabilisieren zu können. Mit der Taktfrequenz heutiger Prozessoren sind aber selbst im Vergleich zum Ballbot sehr kleine Pendel stabilisierbar, weshalb an die Höhe und die Massenverteilung keine enge Anforderung gestellt werden. Aus der gewünschten Interaktion mit dem Menschen geht jedoch hervor, dass Rezero eine Höhe aufweisen soll, in welcher sinnvoll mit einem Menschen interagiert werden kann.

2.5.2 Größenordnungsbetrachtung

Die bis jetzt qualitativ beschriebenen Anforderungen und deren Konsequenzen werden nun mit Hilfe von bestehenden Lösungen in eine Größenordnung gebracht.

Mit den Daten aus Abschnitt 1.4.2 sieht man, dass das Gewicht in einem Bereich von 10–45 kg und die Höhe in einem Bereich von 50–150 cm liegt. Diese Dimensionen, in Zusammenhang mit der Demonstration, stimmen mit den Vorstellungen des Teams von Rezero überein.

Die maximalen Neigungswinkel und Geschwindigkeiten der bestehenden Lösungen liegen im Bereich von 1–5° und 0,1–0,3 m/s, was unter den Erwartungen für einen dynamischen Ballbot liegt. Man kann daraus ableiten, dass für einen dynamischen Ballbot gleicher Masse, ein wesentlich leistungsfähigeres Antriebssystem verwendet werden muss.

2.5.3 Erste Berechnungen

Weitere qualitative Anforderungen können aus physikalischen Überlegungen abgeleitet werden. An dieser Stelle soll näher auf die zentrale Eigenschaft der Beschleunigungsfähigkeit eingegangen werden.

Bei bestehenden Lösungen befinden sich die Neigungswinkel des Aufbaus in einem kaum sichtbaren Bereich⁶. Rezero soll jedoch mit seiner einzigen Bewegung überzeugen, weshalb es sehr wichtig ist, möglichst hohe Neigungswinkel zu erreichen.

Mit Hilfe eines Modells eines invertierten Pendels können mathematische Zusammenhänge hergeleitet werden, welche das physikalische Grundverhalten eines Ballbots beschreiben. Bei diesen Berechnungen wird die Annahme getroffen, dass das Pendel einen konstanten Neigungswinkel ϑ_x einnimmt, sich das System also quasi-statisch verhält. Um die benötigte Beschleunigung zur Stabilisierung zu berechnen, wird einen Momentengleichgewicht um den Lagerpunkt aufgestellt.

Moment durch Gravitation:

$$M_G = m \cdot g \cdot l \sin \vartheta_x \quad (2.2)$$

⁶vergleiche Unterkapitel 1.4.2

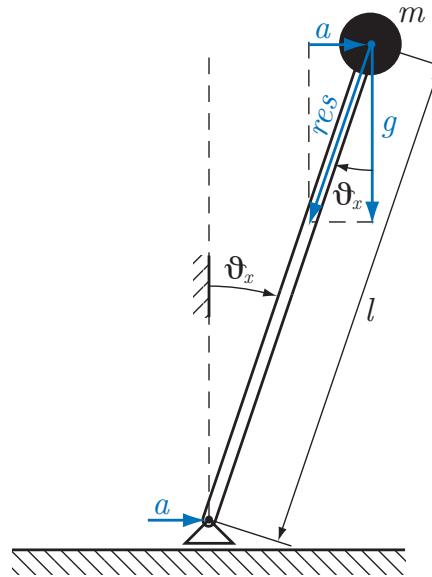


Abbildung 2.7: Invertiertes Pendel mit konstantem Neigungswinkel

Moment durch Horizontalbeschleunigung:

$$M_B = m \cdot a \cdot l \cos \vartheta_x \quad (2.3)$$

Für das Momentengleichgewicht gilt $M_G = M_B$, aufgelöst nach a ergibt:

$$a = g \cdot \tan \vartheta_x \quad (2.4)$$

Daraus ist klar ersichtlich, dass für einen konstanten Winkel ϑ_x eine konstante Beschleunigung a notwendig ist. Dafür ist eine Antriebskraft $F = m \cdot a$ nötig, was in einer instantanen Leistung $P = v \cdot F$ resultiert. Da sich die Geschwindigkeit v bei konstanter Beschleunigung a aufintegriert, wächst auch die Leistung ins Unendliche. Da die benötigte Beschleunigung a , wie aus Abbildung 2.8 ersichtlich, überproportional mit dem Neigungswinkel ϑ_x steigt, ist eine Steigerung des Neigungswinkels mit überproportionalen Leistungsaufwand verbunden.

Ein Ballbot kann erst sinnvoll stabilisiert werden, wenn der Kontakt von der Kugel zum Boden als schlupffrei angenommen werden kann. Um dieser Bedingung nachzukommen, muss eine möglichst hohe Haftreibung zwischen Kugel und Boden herrschen. Folgende Formel beschreibt die Haftbedingung,

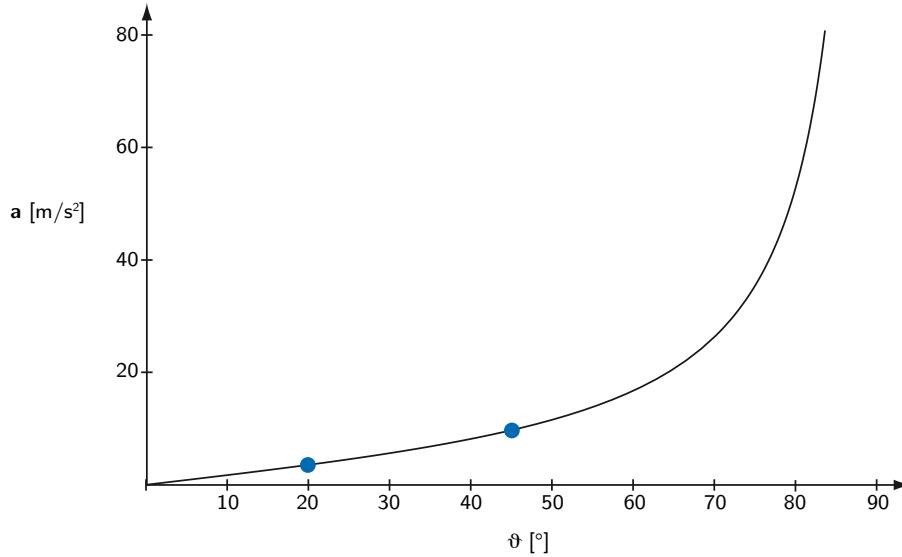


Abbildung 2.8: Zusammenhang zwischen Neigungswinkel ϑ_x und Beschleunigung a

wobei μ_0 für den Haftreibungskoeffizienten steht:

$$|F| \leq \mu_0 \cdot mg \quad (2.5)$$

Durch Einsetzen obiger Formeln, kann nun folgende Ungleichung hergeleitet werden:

$$\mu_0 \geq \tan \vartheta_x \quad (2.6)$$

Diese Beziehung beschreibt, dass die benötigte Haftreibung direkt abhängig vom erwünschten Neigungswinkel ist.

Um realistische Abschätzungen machen zu können, werden nun einzelne Betriebspunkte diskutiert:

Bei konstantem $\vartheta_x = 45^\circ$ hätte der Ballbot bereits nach 2,8 s bereits eine Geschwindigkeit von 100 km/h erreicht, was im Vergleich zu modernen Kraftfahrzeugen nicht realistisch sein kann. Außerdem würde das Antriebsystem bei dieser Beschleunigung und Geschwindigkeit eine maximale Leistung von ca. 5500 W liefern müssen. Der Haftreibungskoeffizient μ_0 zwischen Kugel und Boden müsste in diesem Fall über Eins betragen, was prinzipiell realisiert werden könnte, aber bei der Umsetzung vermutlich zu Schwierigkeiten führen würde.

Ein Winkel von $\vartheta_x = 20^\circ$ befindet sich schon in wesentlich tieferen Bereich der a - ϑ_x -Kurve, wäre visuell aber noch sehr gut erkennbar. Wenn man damit

die maximale Geschwindigkeit auf, für diese Grösse von System realistische, 5–15 km/h (vergleiche Segway PT mit maximal 20 km/h [5]) begrenzt und die Masse auf ca. 20 kg schätzt, erhält man eine benötigte Leistung von ca. 100–300 W, was für ein selbstversorgendes System dieser Grösse als realistisch angenommen werden kann. Der Haftreibungskoeffizient μ_0 müsste in diesem Fall grösser als 0,36 sein, was durchaus realisierbar ist.

Ein Neigungswinkel von $\vartheta_x = 20^\circ$ ist ein Vielfaches der Neigungswinkel von bestehenden Lösungen, kann aber als sinnvoller, theoretischer Richtwert angestrebt werden. Anzumerken ist, dass bei diesem Neigungswinkel und bei der abgeschätzten Maximalgeschwindigkeit, letztere bereits nach 1,1 s erreicht würde.

2.6 Lösungsfindung

Als weiterführender Prozess aus der Funktionsgliederung folgt die Lösungsfindung. Ziel dieses Prozesses ist, zu jeder Teifunktion eine qualitativ hochwertige Auswahl an Lösungen zu finden. Jene Lösungen werden in dem morphologischen Kasten zusammengefügt und visualisiert. In Fall dieses Projektes sind für die Entstehung der Lösungen verschiedenste Werkzeuge und Methoden eingesetzt worden, auf welche hier kurz eingegangen wird.

Eine der effizientesten Methoden, welche oft angewendet wurde, ist der Besuch und die Einbeziehung einer Fachperson. Die Schilderung des Problems und ein anschliessendes Gespräch mit einer Fachperson haben oft sinnvolle Ansätze ergeben. Weiter ist auf existierende Lösungen aufgebaut worden. Da es bereits zwei weitere Ballbots gibt und jene mit Videos und Literatur dokumentiert sind, kann bei einzelnen Teillösungen direkt an vorhandenen Lösungen angeschlossen werden. Im Fall des Antriebs, welcher auf der Verwendung von drei Omniwheels basiert, konnte auf der Lösung des TGU-Ballbots aufgebaut werden. So setzt das Team die Pläne und Zeichnungen jener Räder ein und optimiert dessen Eigenschaften durch Verbesserungen in der Konstruktion sowie durch Anwendung spezieller Technologien und Herstellungsverfahren. Verschiedene wissenschaftliche Publikationen sind ebenfalls sehr aufschlussreich und wurden lösungsfindend angewendet. Oft findet auch ein Brainstorming in der Gruppe statt. Bei dieser Methode wird die Gruppe in Zweierteams aufgeteilt und pro Team werden zu jeder Teifunktion Lösungen gesucht. Die gefundenen Lösungen werden darauf in der ganzen Gruppe besprochen und gefiltert, sodass nur noch die besten Lösungsvorschläge in den morphologischen Kasten eingetragen werden.

Inwiefern sich so Lösungen gebildet haben, wird anhand exemplarischer Beispiele kurz aufgezeigt: Während eines Brainstormings in der Gruppe hat das Team sich mit Lösungen bezüglich der Aufhängung der Kugel auseinander gesetzt. In diesem Fall sind Lösungen zuerst in kleinen Teams erarbeitet worden. In einem weiteren Schritt sind alle Lösungen der Gruppe präsentiert und zusammen ausgearbeitet worden. Das Resultat sind folgende sechs Lösungen, welche in Abbildung 2.9 ersichtlich sind.

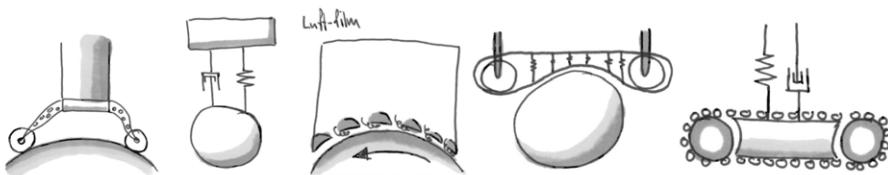


Abbildung 2.9: Lösungen zu Aufhängung der Kugel

Ein weiteres, wichtiges Beispiel ist die Entstehung einer Lösung um das Abheben des Körpers von der Kugel zu vermeiden. In diesem Fall ist in einem Betreuergespräch während eines Reviews auf die Möglichkeit einer magnetischen Lösung hingewiesen worden. Infolge dieses Anstoßes hat sie das Team kontinuierlich weiterentwickelt.

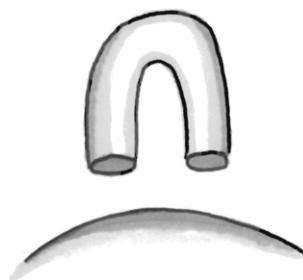


Abbildung 2.10: Lösung, Abheben des Körpers

Im Anhang A.3 befindet sich der gesamte morphologische Kasten, welcher alle Lösungen zu den Teilfunktionen beinhaltet.

2.7 Bewertung und Auswahl

Eines der wichtigsten Werkzeuge um von der grossen Auswahl an Teillösungen auf die besten Lösungen zu schliessen, ist ein Bewertungssystem. In Fall dieses Projektes werden die verschiedenen Teillösungen anhand der Bewertungskriterien „technische Funktionalität“, „Realisierung“ und „Flexibilität“ bewertet, ersichtlich in Abbildung 2.11.

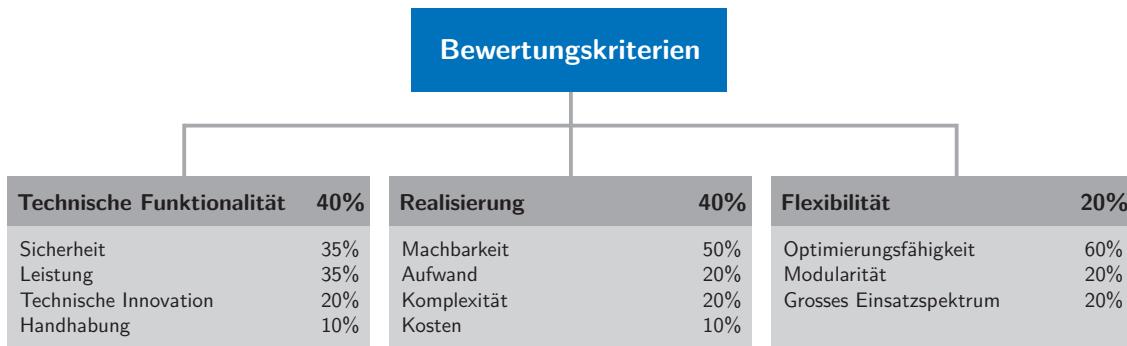


Abbildung 2.11: Bewertungskriterien

Mit dieser Gewichtung können die einzelnen Teillösungen bewertet werden. Die beiden Kriterien „technische Funktionalität“ und „Realisierung“ wurden deutlich höher gewichtet als die Flexibilität. Dies entsteht aus der Tatsache, dass erstere, essentielle Punkte für ein funktionierendes System darstellen, während die Flexibilität lediglich einen attraktiven Zusatzwert ausmacht. Innerhalb der technischen Funktionalität stehen die Sicherheit und die Leistung an oberster Stelle. Die Leistung ist aussergewöhnlich hoch bewertet. Dies ist, darauf zurück zu führen, dass der Ballbot im Gegensatz zu allen bisherigen Ballbots eine hohe Dynamik und Agilität fordert. Da dies der Hauptunterschied zu allen anderen Systemen ist, ist die Leistung gleich hoch gewertet wie die Sicherheit. Weiter stellen die technische Innovation und die Handhabung zusätzlich Bewertungskriterien an die Teillösungen.

Die zweite Gruppe, die Realisierung, stellt die Lösungen der Machbarkeit, dem Aufwand, der Komplexität und den Kosten gegenüber. Die Machbarkeit ist das wichtigste Kriterium, damit die Lösungen auch sicher realisierbar sind. Die Gewichtung der Kosten fällt verhältnismässig eher gering aus, da die finanzielle Unterstützung des Projektes von Beginn an weitgehend gesichert ist.

Das letzte Kriterium, die Flexibilität, setzt sich aus Optimierungsfähigkeit, der Modularität und einem grossem Einsatzspektrum zusammen. In Anbe tracht, dass das behandelte System von einem AS-Prototypen zu einer End version weiterentwickelt wird, ist die Optimierbarkeit der Teillösungen von grosser Bedeutung. Dies ermöglicht es, die gewonnenen Informationen aus dem AS-Prototypen noch für die Endversion umsetzen zu können. Da dies jedoch nur möglich ist, wenn die Teillösungen grösstmöglich optimierbar sind, überragt dieses Kriterium die Modularität und das grosse Einsatzspektrum bei weitem.

Parallel zu den Bewertungskriterien setzt das Team zur Auswahl der Teillösungen neben Nutzwertanalysen, Grobberechnungen und weiterführenden detaillierten Analysen oft auch auf konventionelle Lösungen. Die Verwendung konventioneller Lösungen ist ebenfalls auf die Situation der Teammitglieder zurück zu führen, da alle Mitglieder sich in Ausbildung befinden. Somit ist mit der Verwendung von konventionellen Lösungen auch eine gewisse Sicherheit verbunden. Anhand eines Beispiels einer Teillösung, bei der sich das Team entschieden hat, wird hier kurz auf dieses Auswahlverfahren eingegangen.

Im Falle der Teillösung „Bremsen“ 2.12 wurde von allen zur Verfügung stehenden Lösungen die Motorenbremse ausgewählt. Dies ist ein schlüssiger Entscheid, da die Motorenbremse als konventionelle Lösung bereits vorhanden ist. Eine Bremskappe, ein Wirbelstromprinzip oder ein Bremsfallschirm wurde in diesem Fall ausgeschlossen.

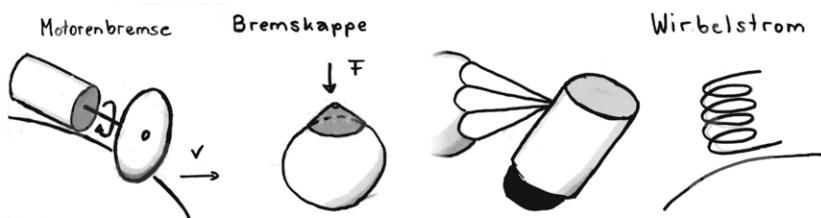


Abbildung 2.12: Teillösungen Bremsen

In einigen Fällen war zum Zeitpunkt der Detailstudie auch noch zu wenig bekannt, um sich auf eine Lösung festzulegen. Am Beispiel der Kraftübertragung auf den Boden ist gut dargestellt, wie mit solchen Situationen umgegangen wird. Es hat sich herausgestellt, dass die Fragestellung sehr komplex ist und eine langfristige Bearbeitung des Problems nötig ist. Die Auswahl der Kraftübertragung auf den Boden ist zum langwierigsten Arbeitspaket des Projektes geworden, erst nach intensiver Zusammenarbeit mit diversen Firmen ist eine Lösung gefunden worden (vgl. Abschnitt 3.2.1).

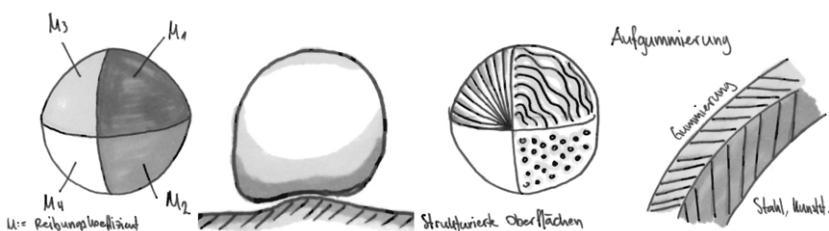


Abbildung 2.13: Teillösungen Kraftübertragung auf Boden

2.8 Technisches Gesamtkonzept

2.8.1 Mechatronisches Gesamtsystem

Prototypen

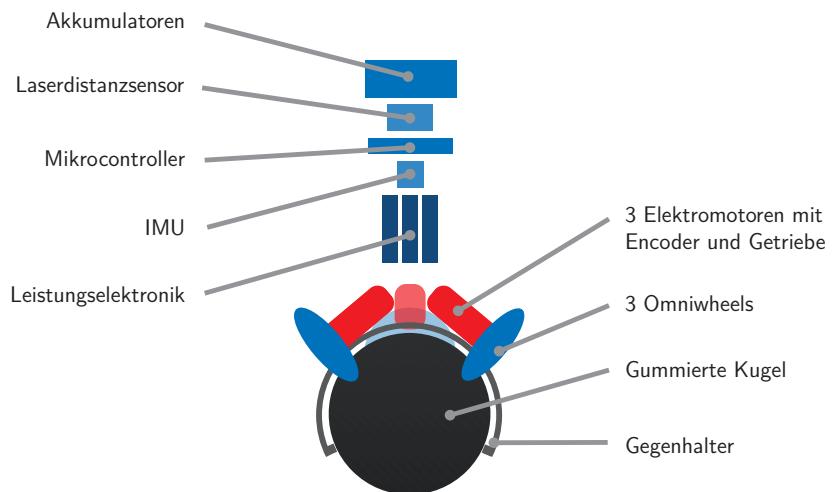


Abbildung 2.14: Aufbauschema des AS-Prototypen in der Konzeptphase

Bereits bei der Grobzeitplanung des Projektes ist der Konzeptentscheid gefallen, drei verschiedene Prototypen einzusetzen. Anhand einer frei verfügbaren Dokumentation soll in einem ersten Schritt ein kleiner Lego-NXT Ballbot nachgebaut werden. Aus dem Studium dessen Software und anhand der ersten Erkenntnissen über Reglerrobustheit und Systemverhalten können so Rückschlüsse für die weitere Entwicklung gezogen werden. Es ist an dieser Stelle anzumerken, dass aufgrund des späteren Wahl für eine völlig andere Antriebsanordnung sich der Nutzen des Lego-Ballbot Prototypen auf ein Minimum reduziert hat. Weil ausserdem der AS-Prototyp sehr früh einsatzbereit gewesen ist, hat das Lego-Modell im Projekt eine untergeordnete Rolle gespielt, es wird daher hier nicht länger darauf eingegangen. Im weiteren Verlauf des Projekts wird dann ein Aktor-Sensor-Prototyp eine möglichst früh verfügbare Vorstufe zum finalen Prototypen bilden. Dieser AS-Prototyp ist bereits mit der definitiven Elektronik ausgestattet, inklusive aller Aktoren und Sensoren, sodass mit der Implementierung der Software begonnen werden kann und eine Testmöglichkeit vorhanden ist. Dies setzt natürlich auch den Einsatz der definitiven Antriebslösung voraus. Alle peripheren Elemente wie Verschalung, Parkiermechanismus und Gegenhalter werden erst für den

finalen Prototypen benötigt. Sie werden als Teil der mechanischen Struktur im Abschnitt 2.8.4 Mechanisches Konzept erläutert. Auf die Konzepte für Aktoren und Sensoren wird separat⁷ eingegangen. Der AS-Prototyp bietet zusätzlich den Vorteil, dass so die optimalen Positionen für die Komponenten bereits zu einem frühen Zeitpunkt ermittelt werden können. Die genauen Anforderungen an den AS-Prototypen sind im Anhang A.5 ersichtlich. Abbildung 2.14 zeigt den schematischen Aufbau des AS-Prototypen.

Energieversorgung

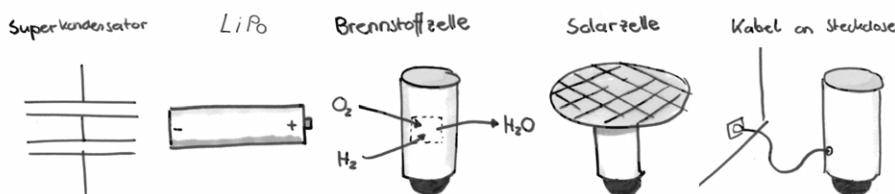


Abbildung 2.15: Ein Auswahl an gefunden Lösungen zur Energieversorgung

Die Energieversorgung wird durch Akkumulatoren gewährleistet. Akkumulatoren sind unkompliziert und zuverlässig und die erreichbaren Energiedichten erlauben, für die benötigten Leistungen von etwa 500 W, eine genügend lange Laufzeit von über zwanzig Minuten. Kompliziertere Varianten wie Brennstoff- oder Solarzellen für die Energiezufuhr und -speicherung sind mangels handfester Vorteile verworfen worden. Die Akkumulatoren sind austauschbar und werden mit einer Ladeelektronik geladen. Zusätzlich kann der Ballbot für Tests auch über ein Netzteil gespiesen werden. Ein leicht zugänglicher Notausschalter und eine Sicherung kommen in Falle eines Notfalls zum Tragen. Über DC-DC-Wandler werden verschiedene Versorgungsspannungen angeboten.

Dass die Wahl eines Akkumulators relativ nahe liegt, lässt sich bereits an der Auflistung der in Frage kommenden Technologien erkennen. Die Wahl ist bereits in der Konzeptphase auf Lithium-Polymer Akkumulatoren gefallen, da diese die höchsten Energiedichten aufweisen. Die Evaluation der Akkumulatoren wird aber, um den konventionellen Aufbau technischer Berichte zu respektieren, erst im Kapitel 4 diskutiert.

⁷vergleiche Abschnitte 2.8.2 Antriebskonzept und 2.8.3 Sensorkonzept

Signalverarbeitung

Die Aufgabe der Datenverarbeitung und Schnittstelle zwischen Aktoren und Sensoren übernimmt entweder ein Mikrocontroller oder ein linux-basierter Rechner. Ein xPC Target Board oder eine Embedded-Lösung von National Instruments werden aufgrund des Platzanspruches, respektive des hohen Preises, ausgeschlossen. In Zusammenarbeit mit den beiden Elektrotechnikstudenten sind mehrere Konzepte für die Signalverarbeitung mit ein oder mehreren Recheneinheiten ausgearbeitet worden. Da die Wahl der Schnittstellen und Protokolle und somit des Boards abhängig von anderen elektronischen Komponenten ist, sei für eine detailliertere Diskussion deshalb auf Kapitel 4 verwiesen.

Software und Steuerung

Die Recheneinheit des Ballbot muss einerseits mit Sensoren, Aktoren und eventuell einem zweiten Computer kommunizieren. Für Steuerungszwecke, insbesondere die angestrebte Fernsteuerung ist zusätzlich Datenaustausch mit externen Computern und Steuergeräten notwendig. Die Implementierung sämtlicher Schnittstellen und Protokolle sowie des Mikrocontrollers wird durch die zwei Elektrotechniker übernommen. Für Linux-basierte Software, welche vor allem Steuerungsaufgaben und rechenintensivere Operationen übernimmt, wird ROS eingesetzt werden. Das *Robotic Operating System* ist ein Open-Source Betriebssystem, welches eine integrale Vernetzung von beliebigen Softwaremodulen anbietet. Damit können die benötigten Programme für unterschiedliche Steuerungsmodi miteinander kommunizieren.

Die Kommunikation mit einem externen Rechner und einem Steuergerät erfolgt mit einer drahtlosen Verbindung, damit die Mobilität stets gewährleistet ist. Die Präferenz liegt bei einer Bluetooth- oder WLAN-Lösung, vor allem wegen der grossen Reichweite und der einfachen Umsetzung.

Der Ballbot, als omnidirektionale Plattform, eröffnet dem Benutzer eine Vielzahl an intuitiven Steuerungsmöglichkeiten. Dies zeigt sich bereits mit der definierten Kerneigenschaft „Fernsteuerung“. Ziel ist des, Rezero innerhalb der Technologiedemonstration auf verschiedenste Weisen steuern zu können, um sein volles Potential zur Schau stellen zu können. Es soll aber grundsätzlich zwischen einem Interaktions- und Agilitätsmodus⁸ unterschieden werden:

⁸vergleiche Unterkapitel 2.10

Interaktionsmodus Mit dem Laserdistanzsensor ist Hindernismanagement möglich. Der Begriff vereint die Kollisionsverhinderung und Routinen zur Interaktion mit Menschen. Diese autonome Steuerinstanz gleicht die Vorgaben der Protokoll- und manuellen Steuerung mit der erfassten Umgebung ab und modifiziert diese gegebenenfalls.

Agilitätsmodus Ziel ist, mit dem Ballbot vom Benutzer gezeichnete Trajektorien in möglichst kurzer Zeit abzufahren. Der Ballbot arbeitet eine Liste optimierter, zu passierender Wegpunkte nach einem Protokoll ab. Die Vorgabe dieser Wegpunkte kann beispielsweise per Maus oder Touchscreen-Bildschirm erfolgen. Außerdem sollen verschiedenste Steuergeräte wie ein Joystick, eine *Wiimote*⁹ oder ein *iPhone* implementiert und getestet werden. Allen Modi gemeinsam ist die Erzeugung von Geschwindigkeits- oder Beschleunigungsvorgaben für den Ballbot.

Auf die Implementierung der gesamten Software und deren endgültige Struktur wird im Kapitel 6 detailliert eingegangen.

2.8.2 Antriebskonzept

Kraft Erzeugung und Übertragung

Um die beschriebenen hohen Beschleunigungen zu erreichen, muss der Antrieb die benötigte Kraft auf die Kugel aufbringen können. Wie bereits in Abschnitt 2.5.3 erwähnt, wird für eine erste Abschätzung ein sehr vereinfachtes Modell angenommen, bei dem ein konstanter Neigungswinkel ϑ_x vorausgesetzt wird.

Unter allen Lösungsideen zur Antriebsfunktion, bietet sich eine reibschlüssige Übertragungsform, angetrieben durch einen DC-Motor, als bestes Konzept an. Diese Lösung bietet im Vergleich zu Alternativen eine hohe Leistungsdichte und kann hohe Kräfte übertragen. Die reibschlüssige Übertragung ist einfach zu realisieren und DC-Motoren sind samt Steuerungselektronik in sehr breiten Konfigurationsmöglichkeiten kommerziell erhältlich und einfach in Betrieb zu nehmen.

Alternativ könnte man auf einen rein elektromagnetischen Antrieb zurückgreifen. Dabei verwendet man zum Beispiel einen Stator aus Spulen die Kugel als permanentmagnetischen Rotor. Solche „Kugel-Motoren“ sind momentan

⁹Eingabegerät für die Spielkonsole Wii von Nintendo

Gegenstand der Forschung¹⁰ und es zeigt sich, dass eine Fertigung sehr aufwändig und die Steuerung sehr komplex ist. Des Weiteren muss mit einer eingeschränkten Kraftübertragung gerechnet werden, da bei Kugelmotoren der Antrieb direkt erfolgt und somit keine Getriebe einsetzbar sind.

Ein piezoelektrischer Antrieb stellt eine weitere Alternative zum Antriebsmechanismus dar. Dabei verwendet man feinste Strukturen, deren piezoelektrische Eigenschaft dazu verwendet werden kann, kleinste, wellenförmige Verschiebungen zu realisieren. Solche Systeme sind jedoch in der benötigten Größe nicht erhältlich und die stark eingeschränkte Kraftübertragung spricht ebenfalls gegen diese Alternative. ([29], [30])

Kraft-Einleitungsart

Zur reibschlüssigen Krafteinleitung wird ein Omniwheel als beste Lösung evaluiert. Mit diesem Konzept sind alle Freiheitsgrade der Kugel steuerbar. Erst dadurch ist es möglich, den Aufbau um seine eigene Achse rotieren zu lassen. Omnidriven sind kommerziell erhältlich oder selber realisierbar und wurden bereits bei bestehenden Lösungen erfolgreich eingesetzt. ([20], [11]) Ein sehr einfach zu realisierendes Konzept stellt ein Antrieb mit Walzen dar. Das Prinzip funktioniert wie eine invertierte Computermauskugel und wurde ebenfalls bereits eingesetzt [32]. Jedoch ist mit diesem Konzept eine Drehung um die eigene Achse nicht möglich und es ist, bedingt durch den suboptimalen Angriffspunkt, mit erhöhter Reibung zu rechnen.

Ein omnidirektionaler Kettenantrieb könnte die Haftreibung im Vergleich zu Omnidriven erhöhen. Diese Lösung ist aber sehr schwierig in einer robusten Form zu realisieren und die Funktionstauglichkeit wurde nicht nachgewiesen [3].

Kraft-Einleitungsanordnung

Unterschiedlichste Anordnungen der Omnidriven auf der Kugel wurden untersucht, dabei hat sich die Anordnung in einem Dreieck als optimal erwiesen. Grund dafür sind die Steuerbarkeit aller Freiheitsgrade und die Realisierbarkeit mit einer minimalen Anzahl an Motoren.

Es zeigt sich, dass bei drei Omnidriven im Durchschnitt die höchste Anzahl an Omnidriven bzw. Motoren¹¹ gleichzeitig im Eingriff sind. Dies hat den Vorteil, dass zum Einen möglichst wenig Motoren und Omnidriven, die kaum

¹⁰siehe [28], [2], [21], [8], [13], [33]

¹¹bezogen auf die Gesamtanzahl an Motoren/Omnidriven

bis gar nicht im Eingriff sind, mitgetragen werden müssen. Dadurch wird unnötiger Ballast vermieden. Zum Anderen verteilt sich die Normalkraft (und damit die Haftreibung) gleichmäßig unter den Rädern. Dies hat zur Folge, dass bei Omniwheels, die nicht im Eingriff sind, die Haftreibung auch nicht genutzt werden kann. Hinzu kommt zudem auch, dass diese Räder einen Rollwiderstand erzeugen und somit dem Antrieb sogar entgegenwirken.

Bei einer Viererkonfiguration sind, je nach Ausrichtung des Ballbots, zwischen zwei und vier Omniwheels gleichzeitig im Einsatz, während es beim Dreieck zwei oder drei sind. So variiert bei vier Rädern, während einer vollständigen Rotation um die eigene Achse, die Beschleunigungsfähigkeit stärker. Dies hat zur Folge, dass die mögliche Fahrtgeschwindigkeit eines Ballbots mit vier Omniwheels wesentlich stärker richtungsabhängig ist, als bei drei Rädern. Schliesslich sind auch die Kosten bei nur drei Motoren und drei Omniwheels geringer, nachteilig ist die erhöhte Komplexität bei späteren Berechnungen anzuführen.

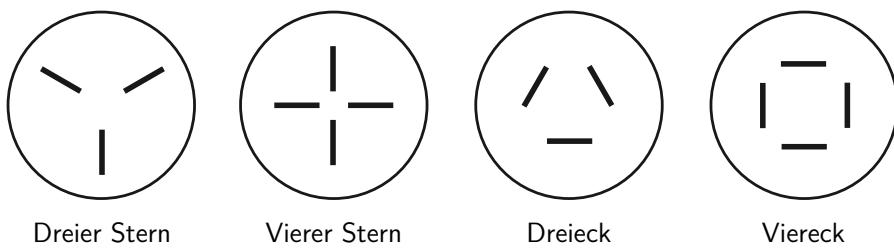


Abbildung 2.16: Schema der Antriebsanordnungen

Die Anordnung im Dreieck- oder Viereck (geschlossene Anordnung) ist derjenigen im Stern vor allem deshalb überlegen, da bei sternförmiger Anordnung ein Freiheitsgrad, nämlich die Rotation um die eigene Achse, verloren geht. Diese kann nicht angesteuert werden und ist damit auch nicht stabilisierbar. Ein weiterer Nachteil ist, dass, sofern auf eine komplizierte Umlenkung der Antriebsachse verzichtet wird, die Motoren jeweils tangential, seitlich wegstehen. Bei einer geschlossenen Anordnung können die Motoren zur Mitte hin ausgerichtet werden und der Bauraum dort effektiv genutzt werden.

Negativ an einer geschlossenen Anordnung ist, dass sich zu keiner Zeit ein Rad am grössten Durchmesser der Kugel angreift und so eine maximale Krafteinleitung in Bewegungsrichtung ermöglicht. Bei zunehmenden Eingriffswinkel nehmen die Normalkräfte¹² der Antriebsräder auf die Kugel ab und die Bewegung der Omniwheels geht zunehmend in eine Eigenrotation

¹²Davon sind die übertragbaren Tangentialkräfte direkt abhängig.

der Kugel über. Aus diesen Gründen ist von einem Neigungswinkel über ca. 50° abzusehen.

2.8.3 Sensorkonzept

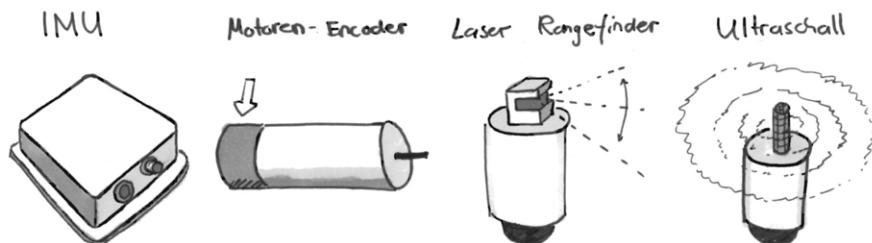


Abbildung 2.17: Gewählte Sensorvarianten

Abbildung 2.17 zeigt die ausgewählten Teillösungen für den Ballbot. Dieser Abschnitt erläutert diese Wahl und unterscheidet dabei zwischen Stabilitäts- und Interaktionssensoren.

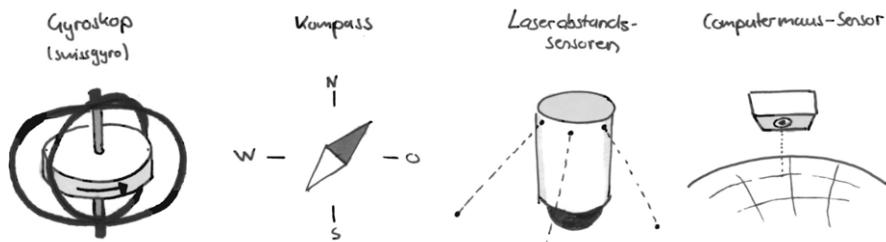


Abbildung 2.18: Mögliche ergänzende Sensoren als Notfalllösungen

Zudem wird auch auf die möglichen Notfalllösungen, dargestellt in Abbildung 2.18, eingegangen.

Stabilitätssensoren – Lage

Lage- und Geschwindigkeitssensoren gehören zum Kernsystem und liefern die Messgrößen des Stabilisierungsregelkreises. Ziel ist es, die sechs rotativen Freiheitsgrade des Systems entweder direkt zu messen oder eindeutig umrechenbare Messgrößen zu finden.

Da der Ballbot als invertiertes Pendel instabil ist, stellt die Lage des Aufbaus die wichtigste Messgröße dar und wird mit den drei Winkeln ϑ_x , ϑ_y und ϑ_z und den dazugehörigen Winkelgeschwindigkeiten beschrieben. Sie sind in Abbildung 2.19 dargestellt. Diese drei Winkel können direkt von einer Inertial

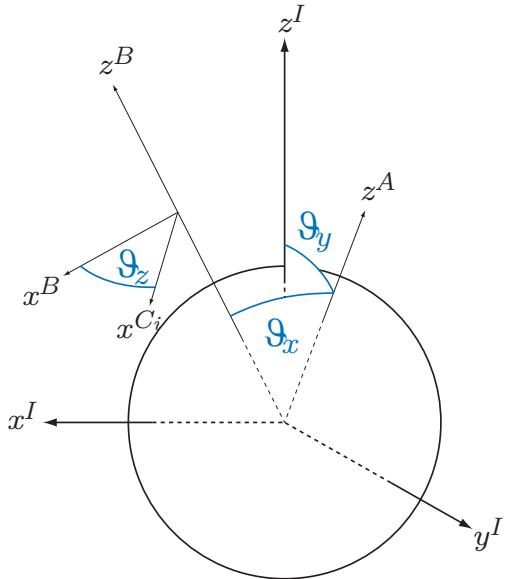


Abbildung 2.19: Rotative Freiheitsgrade ϑ_x , ϑ_y und ϑ_z des Aufbaus

Measurement Unit (IMU) gemessen werden. Eine IMU stellt ein Verbund von drei Gyroskopen, welche die Winkelgeschwindigkeiten in drei orthogonalen Raumebenen messen, und drei Beschleunigungssensoren, die jeweils die lineare Beschleunigung orthogonal zu diesen drei Ebenen messen, dar. Obwohl solche IMUs sehr kostspielig sind, lauten externe Empfehlungen klar, ein hochwertiges Gerät zu verwenden, welches bereits intern Datenfusion und Signalfilterung betreibt und nicht drei einzelne Gyroskope zu verwenden.

Eine IMU weist aber auch eine Reihe von Nachteilen auf. Normalerweise fehlt die Möglichkeit eine Position absolut zu bestimmen. Es existieren zwar Modelle mit Magnetometern zur Richtungsbestimmung, da aber diese durch die grossen Motorströme gestört werden, entfällt deren Einsatzmöglichkeit. So müssen also die absoluten Winkel aufintegriert werden, was zu einem stetig wachsenden Fehler führt. Ausserdem sind IMUs normalerweise im Schwer- und Drehpunkt eines Systems lokalisiert. Beim Ballbot wird das nicht der Fall sein. Werden dann hohe Beschleunigungen gefahren, wird die IMU grosse Bewegungen ausführen und nicht zwischen Scheinbeschleunigung durch Winkeländerung und translativer Beschleunigung im Inertialsystem unterscheiden. Es ist daher starke Datenfusion, auch mit den Winkelencodern, zwischen den verschiedenen Sensoren notwendig, da auch die relative Bewegung zwischen Aufbau und Kugel bestimmt werden muss.

Eine andere Möglichkeit zur Lagebestimmung ist die Verwendung eines me-

chanischen Gyros. Eine kardanisch aufgehängte, sich drehende Masse, behält dank Drehimpulserhaltung ihre Ausrichtung unabhängig von derjenigen des Aufbaus bei und erlaubt die Messung des absoluten Neigungswinkels. Ein Kreisel hätte also keinen Integrationsfehler oder könnte den Integrationsfehler der IMU kompensieren. Jedoch tritt bei hohen Beschleunigungen relativ rasch Präzession auf. Aufgrund der hohen Verfügbarkeit und des geringen Preises wird diese Lösung als Notfalllösung eingestuft.

Zur Kalibration der IMU könnten ausserdem drei tetraederförmig auf den Boden gerichtete Laserdistanzsensoren dienen. Diese eher teure und komplizierte Variante böte den Vorteil konstant absolute Lageinformationen zu liefern, ist aber anfällig auf Unebenheiten. Auch sie wird nur weiterverfolgt, sollte die IMU ihren Zweck nicht erfüllen.

Stabilitätssensoren – Geschwindigkeit und Position

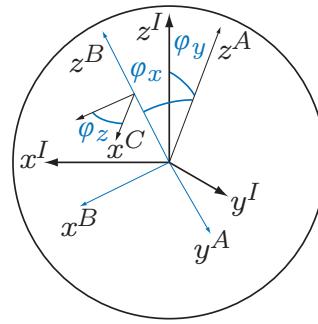


Abbildung 2.20: Rotative Freiheitsgrade φ_x , φ_y und φ_z der Kugel

Die Bewegung der Kugel wird durch die Winkel φ_x , φ_y und φ_z und deren Winkelgeschwindigkeiten, dargestellt in Abbildung 2.20, beschrieben. Setzt man voraus, dass kein Schlupf auftritt, kann anhand der Anfangsposition des Roboters und über die Rollbedingung und den Kugelradius r_K die Geschwindigkeit und durch Integration die Position des Ballbots in der Ebene berechnet werden.

$$\dot{x}_i = r_K \cdot \dot{\varphi}_i, \quad x_i = r_K \cdot \varphi_i \quad \text{für } i = x, y \quad (2.7)$$

Über eine weitere Rollbedingung zwischen Omniwheel und Kugel sind die Winkelgeschwindigkeiten $\dot{\psi}_1$, $\dot{\psi}_2$ und $\dot{\psi}_3$ der drei Antriebsmotoren eindeutig bestimmt (siehe Abbildung 2.21). Jeweils ein Winkelencoder bestimmt den

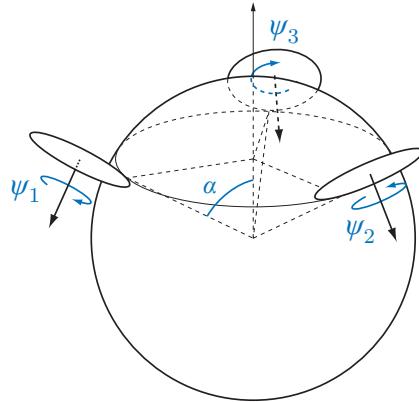


Abbildung 2.21: Eingriffswinkel α und Drehwinkel ψ_1 , ψ_2 und ψ_3 der drei Omniwheel

Drehwinkel und durch Ableitung die Winkelgeschwindigkeit der Antriebswelle. Über eine odometrische Umrechnung können so die Winkelgeschwindigkeiten der Kugel $\dot{\varphi}_x$, $\dot{\varphi}_y$ und $\dot{\varphi}_z$ bestimmt werden.

Der Einsatz von Winkelencoder liegt nahe, da dies eine weit verbreitete und zuverlässige Messmethode ist und die Sensoren meist vom Motorenhersteller, gemeinsam mit den Motoren und Getrieben, aus einer Hand bezogen werden können. Alternativ könnten auch optische Distanzsensoren, wie zum Beispiel in einer Computermaus, verwendet werden. Diese sind sehr billig, der Implementierungsaufwand ist aber, trotz schlechteren Messergebnissen, in jedem Fall grösser als bei Winkelencodern. Trotzdem kann auf diese Variante im Notfall zurückgegriffen werden. Der Anspruch auf Autonomität wird für Rezero nicht erhoben. Dazu wäre eine absolute Positionsbestimmung nötig, beispielsweise mit einer GPS-fähigen IMU. Diese funktioniert aber nur unter freiem Himmel und das relativ langsam und ungenau. Der Ballbot soll aber auch in Gebäuden funktionieren können, ohne spezielle Anforderungen an den Raum zu richten. Somit entfällt auch die Positionsbestimmung per Triangulation, Kameratracking oder Orientierung mit Hilfe von Bodenmarkierungen. Auf eine absolute Positionsbestimmung wird daher verzichtet. Der Ballbot soll per Protokollsteuerung oder direkt mittels externem Eingabegegerät gesteuert werden. Mit dem Laserdistanzsensor lassen sich immerhin lokale Begrenzungen des Bewegungsraumes erkennen.

Interaktionssensoren

Interaktionssensoren ermöglichen dem Ballbot, sich in seiner Umgebung einzuzuordnen und auf sie zu reagieren. Ihre Notwendigkeit ergibt sich aus dem

Interaktionsmodus der Technologiedemonstration¹³. Rezero muss als omnidirektionaler Roboter Hindernisse in einem möglichst grossen Blickwinkel erkennen. 2D-Laserdistanzsensoren mit einem Sichtbereich von bis zu 270° und mit einem Radius über 5 m erfüllen die wenigen Anforderungen an ein Distanzmessgerät, sind aber sehr teuer. Modelle, welche zusätzlich noch einen Öffnungswinkel abtasten und so die Umgebung dreidimensional erfassen, kommen finanziell und von der Grösse her, gar nicht in Frage.

Wegen dem kleinen Messkegel und der Tatsache, dass ein Peilsignal von mehreren Sensoren aufgezeichnet werden kann, sind Ultraschallsensoren nicht als HauptSENSOREN einsetzbar. Allerdings sind sie als sekundäre Sensoren zum rudimentären Erkennen von Personen durchaus geeignet. Es soll daher eine geeignete Kombination¹⁴ von einem 2D-Laserdistanzsensor mit eventuell mehreren supplementären Ultraschallsensoren gewählt.

Um zusätzlich zwischen Lebewesen und statischen Hindernissen unterscheiden zu können, ist anfangs der Einsatz einer Kamera geplant gewesen. Die Bildbearbeitung, mit ihrem hohen Mass an Komplexität, hätte innerhalb einer Bachelorarbeit behandelt werden müssen. Da aber eine Reihe wichtigere und naheliegendere Themen für diese Arbeiten vorhanden sind, wird auf eine Kamera verzichtet. Gleiches gilt auch für eine Wärmebildkamera.

2.8.4 Mechanisches Konzept

Kugel und Gegenhalter

Die Kugel und ihr Gegenhalter bilden das Fundament des Systems. Ziel der Kugel ist die Kraftübertragung auf den Boden. Der Antrieb, welcher direkt auf die Kugel wirkt, soll von der Kugel auf den Boden übermittelt werden und so das System in Bewegung versetzen. Während der Lösungssuche sind verschiedene Lösungsansätze entstanden. Eine weiche Kugel, eine Kugel mit einer strukturierten Oberfläche und eine beschichtete Hohlkugel. Die Rahmenbedingungen, welche für die Wahl ausschlaggebend sind, setzen sich aus der benötigten Reibung und dem Gewicht zusammen. Der Haftreibungskoeffizient soll von dem Antrieb auf die Kugel und von der Kugel zur Oberfläche möglichst hoch sein. Um die benötigten Reibwerte zu bestimmen, ist eine fundierte Reibungsanalyse erstellt worden. Die Analyse hat ergeben, dass ein Haftreibungskoeffizient von mindestens Eins benötigt ist. Um die geforderte Agilität zu ermöglichen, ist jedoch ein Wert von gegen Zwei von Vorteil. Ab-

¹³vergleiche dazu Unterkapitel 2.10

¹⁴vergleiche dazu Kapitel 4

bildung 2.22 visualisiert den Haftreibungskoeffizienten in Abhängigkeit vom Neigungswinkel ϑ und vom Eingriffswinkel α .

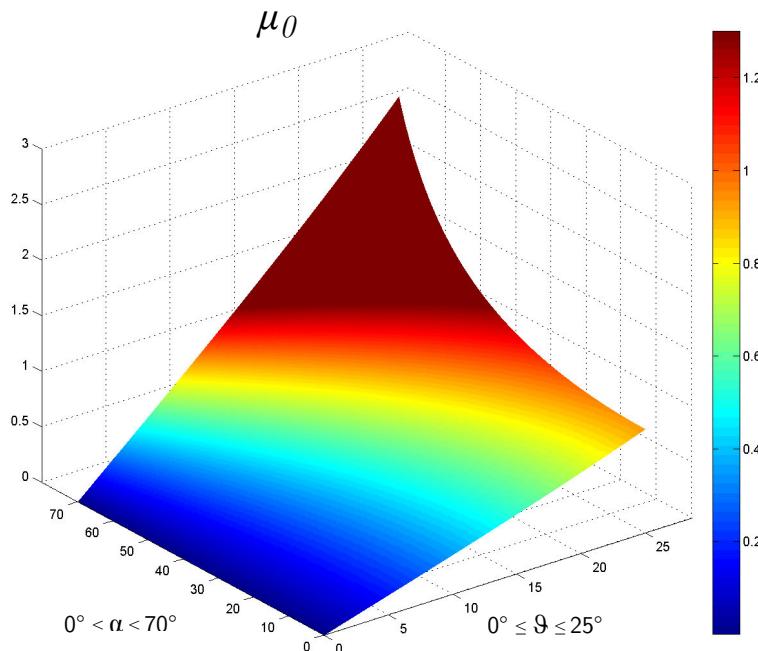


Abbildung 2.22: Reibungsanalyse

Weiter ist für die Agilität eine möglichst leichte Kugel von Vorteil. Eine leichte Kugel hat den Vorteil, dass ihr Trägheitsmoment klein ist. Diese Bedingungen haben das Team veranlasst, die Lösung „Beschichtete Hohlkugel“ zu verwenden.

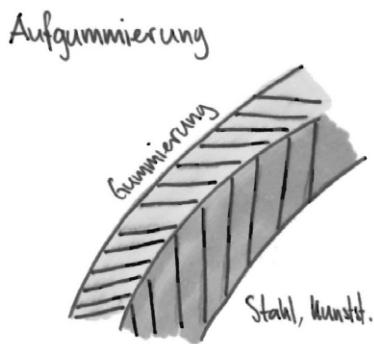


Abbildung 2.23: Beschichtete Hohlkugel

Der Gegenhalter, welcher den Aufbau und die Kugel, in dynamischen Bewegungen, miteinander verbinden soll, ist momentan noch in Entwicklung. Die

verschiedenen Lösungsansätze gehen von magnetischen Anziehungskräften bis hin zu mit Luft betriebenen Ansaugmechanismen. Für die genau Systemanalyse der Kugel kann an dieser Stelle auf das Kapitel 3 Konstruktion und Fertigung verwiesen werden.

Omniwheel

Die Kugel und die Bewegungen, welche sie ermöglichen soll, setzen einige Bedingungen an den Antrieb. Da drei Antriebe direkt auf die Kugel wirken, müssen diese Konzepte omnidirektional sein. Falls die Kugel eine Drehrichtung eingenommen hat, dürfen die Antriebe diese Bewegung nicht blockieren. Aus diesem Grund ist die Idee, den Antrieb mit omnidirektionalen Rädern zu realisieren, entstanden.

Ein normales industrielles Omnidirectional Wheel, wie in Abbildung 2.24, besteht aus gelagerten Zylindern.



Abbildung 2.24: Doppeltes Industrie-Omnidirectional Wheel [16]

Es gibt verschiedene Ausführungen solcher Räder. Alle existierenden Lösungen haben jedoch gemeinsam, dass sie in einfacher Anordnung keinen kontinuierlichen Kontakt zur wirkenden Oberfläche besitzen. Daraus resultiert bei einfacher Anordnung kein optimaler Rundlauf; der gesamte Aufbau würde bei der Bewegung wippen. Grundsätzlich kann dieses Problem entweder durch eine Kombination von zwei um einen bestimmten Winkel verschobenen Omnidirectional Wheels oder durch ein eigenes Konzept behoben werden. Dazu wurden im Team zwei Varianten detailliert ausgearbeitet. Ein neu entwickeltes Konzept, welches auf einem aussengelagerten Rundschwungrad basiert und ein bestehendes der Tohoku Gakuin University.



Abbildung 2.25: Rundschnurring-Omniwheel (Foto Team Ballbot)

Das Rundschnurring-Omniwheel bietet den Vorteil, dass der Rundschnurring aussengelagert werden kann und die Lagerungszylinder die Oberfläche nicht berühren. Der Rundschnurring wird, ähnlich einem Reifen auf eine Felge, auf den Träger gespannt. Ziel ist es, dass sich der Rundschnurring über die Walzen drehen kann. Weiter soll der Rundschnurring einen kontinuierlichen Kontakt aufweisen und so eine präzise Regelung ermöglichen.

Dieses Konzept konnte nicht verwendet werden, da der Rundschnurring bei der Verdrillung einen zu hohen Eigenwiderstand aufweist wie Versuche an einem geplotteten Prototypen gezeigt haben. Dies hat zur Folge, dass sich das Rad seitlich zwar bewegen lässt, die dazu aufzuwendende Kraft jedoch verhältnismässig gross und unregelmässig ist. Um hier Verbesserungen erzielen zu können, wäre eine Variation des Materials und der Zusammensetzung denkbar. Zwar bestehen seitens der Zulieferfirmen die Möglichkeiten zur Variation, jedoch stellt die Verwendung des Rundschnurings als Kraftübertragungselement des Rades eine Zweckentfremdung des Produktes dar und das Know-how bezüglich Verdrillen und Erhöhen des Haftreibungskoeffizienten fehlt. Interessant bleibt dieser Ansatz jedoch für kleine Omnidriven, da bei geringerem Durchmesser des Schnurings dessen Eigenwiderstand merklich abnimmt. Eine Weiterverfolgung dieses Problems liegt jedoch ausserhalb dieses Projektes.

Das bestehende Konzept, welches eine verschachtelte Lagerung der Rollen beinhaltet, bietet gegenüber einer doppelten Anordnung existierender Omnidriven den Vorteil, dass der Auflagepunkt des Rades sich nicht ändert. Dieser Vorteil kommt insbesondere bei der gekrümmten Oberfläche der Kugel zum Tragen. Auf die Realisierung dieser Lösung wird in Kapitel 3 detailliert eingegangen.

Aufhängung mit Feder-Dämpfer-Elemente

Die Motoren mit den Omniwheels sollen die ganze Rotationskraft auf die Kugel übertragen. Um diese Kraft zu übertragen wird eine Aufhängung verwendet. Die Aufhängung trägt die Motoren und richtet sie in einem geeigneten Winkel auf die Kugel. So können die Omniwheels in einem optimalen Winkel den Antrieb auf die Kugel übertragen. Die Aufhängung bildet das Bindeglied zwischen Kugel und Aufbau. Da jegliche Unebenheiten und Schläge vom Boden direkt auf die Kugel und somit auf den Aufbau, welcher alle Sensoren trägt, übertragen werden, sind verschiedene Aufhängungslösungen gesucht worden. Ziel der Aufhängung ist, grobe Stöße aufzunehmen und eine ruhige, kontrollierte Fahrt des Ballbots zu ermöglichen. Einen Ansatz bildet die Verwendung eines elastischen Materials, aus welchem die Aufhängung gefertigt wird. So können die Fremdeinflüsse über das Material absorbiert werden. Ein weiterer Ansatz bildet die Verwendung eines Luftfilmes zur Absorption der Einflüsse. Aus der Drehung der Kugel resultiert eine Luftströmung, welche für diese Lösung verwendet werden könnte. Das Team hat sich gegen diese beiden Lösungen entschieden, da sie sehr aufwendig in der Herstellung sind. Schliesslich werden Feder-Dämpfer-Elemente verwendet. Diese ermöglichen eine einfache Integration in die Konstruktion. Die Elemente können nach dem Einbau noch eingestellt werden, damit ein optimaler Betriebspunkt erreicht wird.

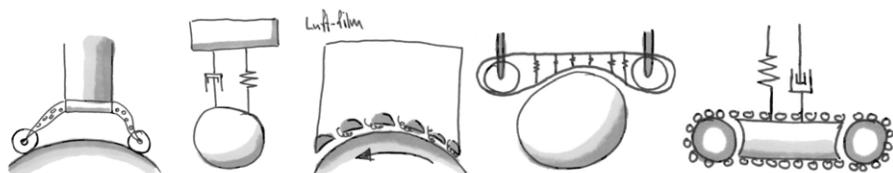


Abbildung 2.26: Aufhängungskonzepte

Skelett

Das Skelett dient als Träger der elektronischen Komponenten. Es verbindet zudem die dynamische Verschalung mit dem Aufbau. Es ist im ganzen statisch gehalten und so modular wie möglich konzipiert. So bietet es die Möglichkeit, Sensoren und Akkus an nicht fixen Positionen zu tragen und allenfalls nach Tests an anderen Stellen zu positionieren. Dies hat den Vorteil, dass der Schwerpunkt verlagert und das Gesamtsystem angepasst werden

kann. Es wird unterschieden zwischen dem Skelett des AS-Prototypen und demjenigen des finalem Prototypen.

Parkiermechanismus

Zur Realisierung des Parkiermechanismus' wurden drei Konzeptideen untersucht, mit welchen eine Umlagerung des Gewichts des Ballbots von der Kugel auf die Verschalung bewerkstelligt wird. Im Problemlösungszyklus sind verschiedene Ansätze entstanden, wie z. B. ausfahrbare oder ausklappbare Stützen, welche von der Verschalung auf den Boden ragen. Sie können den Ballbot stützen und in seine Ruheposition versetzen. Der Ballbot könnte auch in einen externen Ständer fahren und dort verweilen. Ein weiterer Ansatz ist ein kontrolliertes Umdrehen des Ballbots. Diese Bewegung lässt ihn dann auf Rädern, in einer liegenden Position, weiter agieren.

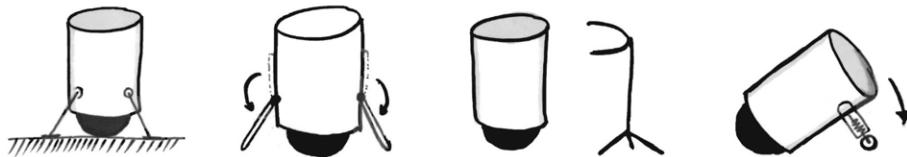


Abbildung 2.27: Alternative Parkiermechanismen

Aus Gründen der Eleganz und Ästhetik ist jedoch das Konzept der absenkbarer Verschalung gewählt worden. Der Realisierungsaufwand dieser Lösung ist höher und komplexer als bei den anderen Lösungen. Der Effekt und seine Wirkungen auf den Betrachter sind aber als wichtiger eingestuft worden und haben das Team veranlasst diesen Mehraufwand zu investieren. Die Verschalung wird dabei, gesteuert von Motoren, über die Kugel abgesenkt. Dadurch entsteht, neben dem Auflagepunkt der Kugel eine weitere, umlaufende Aufstandsfläche, welche die Stabilität in der Ruheposition gewährleistet.

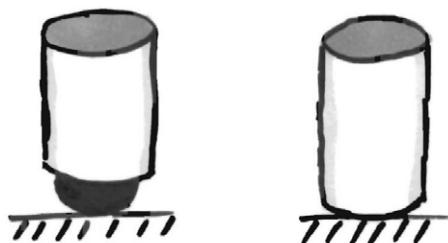


Abbildung 2.28: Gewählter Parkiermechanismus

2.9 Designkonzept

Im Abschnitt 2.3.2 werden die Ziele des Designs formuliert, auf deren Grundlage ein Designkonzept erarbeitet wird.

2.9.1 Design

Zu Beginn werden breite Themengebiete definiert und je dazu Ideen skizziert, welche mögliche Konzeptrichtungen aufzeigen. Als Themengebiete, aufgestellt um die Zieldefinition herum, werden *leicht*, *futuristisch*, *sportlich* und *verspielt* gewählt. Abbildung 2.29 zeigt Beispiele aus den jeweiligen Konzeptrichtungen.

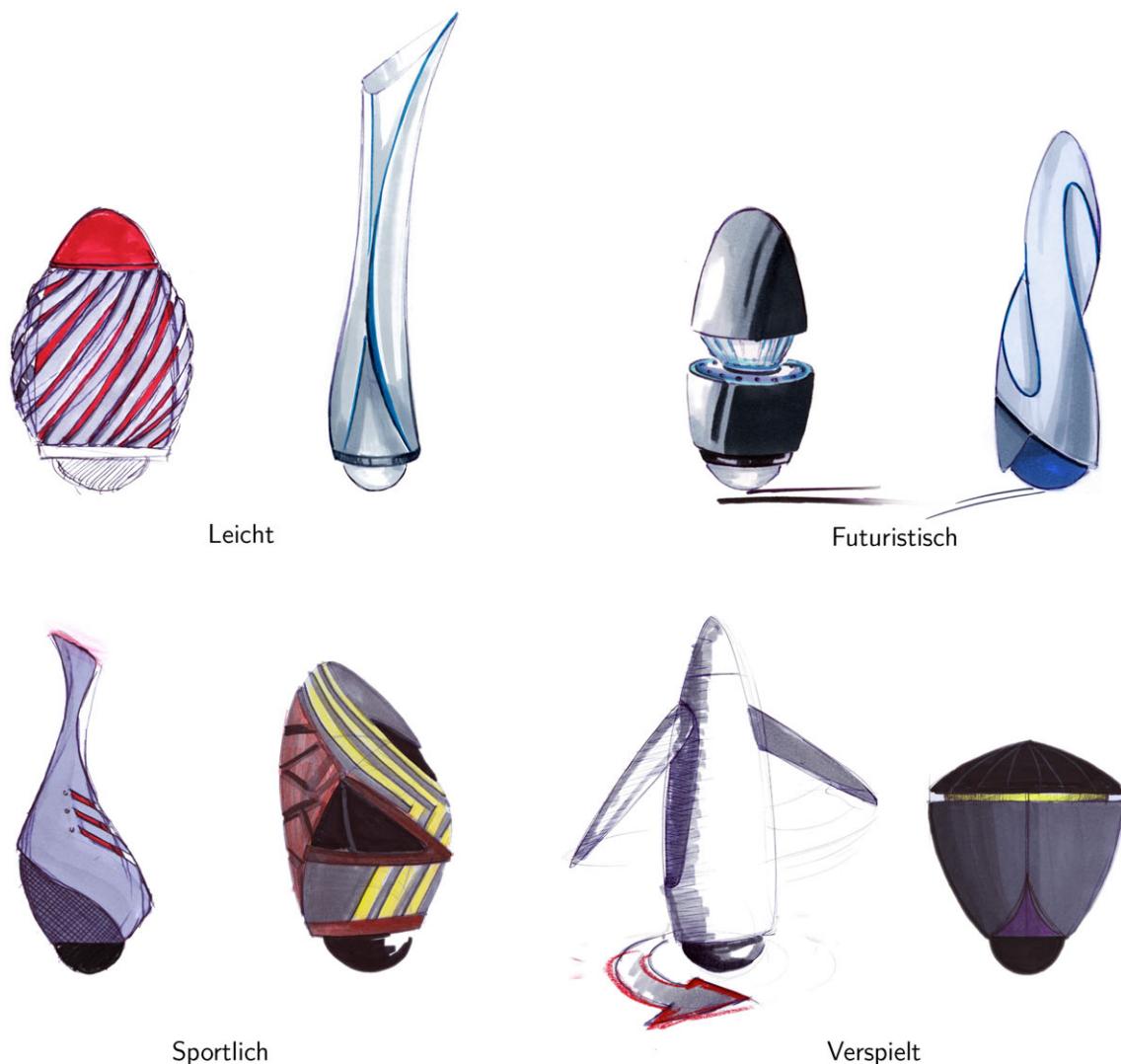


Abbildung 2.29: Konzeptrichtungen für das Design

Um dem Ballbot Leben einzuhauchen, erarbeiteten das Designteam als Grundkonzept eine dynamisch veränderbare Verschalung, welche in der Höhe variieren kann und durch dessen Bewegung an bestimmten Stellen, welche mit Stoff überzogen sind, Lamellen aus dem Grundkörper hervortreten (siehe Abbildung 2.30). Dies kann als Atmung, Herzschlag oder Körperhaltung interpretiert werden und bietet eine innovative Ausdrucksmöglichkeit. Mit Hilfe einer Synchronisation dieser Volumenänderung während der Fahrt, kann die Dynamik betont und deren visuelle Vermittlung unterstützt werden.

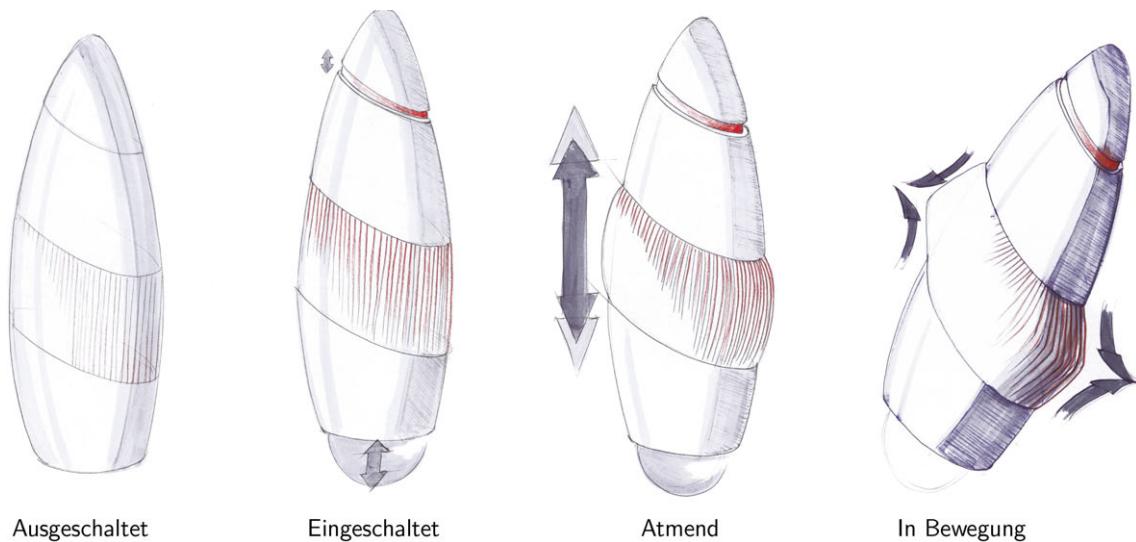


Abbildung 2.30: Dynamisch veränderbare Verschalung mit Lamellen

Mit einer inneren Beleuchtung der variierenden Lamellen können deren Kanten zusätzlich gezeichnet werden und es entsteht ein starker Kontrast zwischen der weich verlaufenden Oberfläche und den markant beleuchteten Kanten.

Um der Zielformulierung zu genügen, ist es wichtig, dass die Verschalung in einer dynamischen Form sämtliche Komponenten geschickt einschliessen kann. Als passende Grundgeometrie wird ein Konus gewählt (siehe Abbildung 2.31).

Die ausgearbeitete Form von Rezero ist durch schräge Linienführungen und markanten Seitenwölbungen dynamisch und sportlich gestaltet. Die weiche Formensprache und Verrundungen lassen den Ballbot lieblich und sympathisch wirken.

Die Farben Weiss und Grau wurden als Träger der Leichtigkeit und Dynamik gewählt, während die variierende, blaue Beleuchtung und blaue Taste dazu einen Kontrast bilden, welcher dem Design zur Lebendigkeit verhilft.

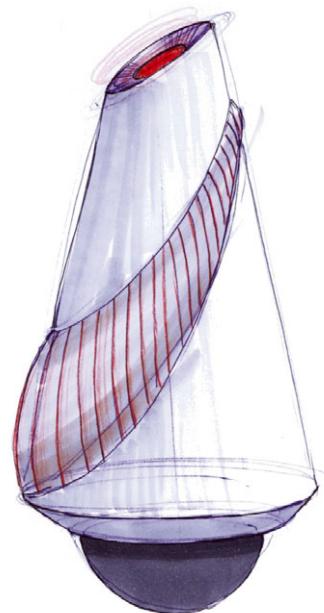


Abbildung 2.31: Grundform mit Lamellen

Den Abschluss der Arbeit am Design von Rezero stellt ein Modell im Maßstab 1:3, welches in Abbildung 2.32 abgebildet ist, dar.



(a) Designmodell im Maßstab 1:3

(b) Beugung der Lamellen

Abbildung 2.32: Ausgearbeitetes Designkonzept

2.9.2 Zukunftsvisionen



Abbildung 2.33: Zukunftsvisionen eines Ballbots im Kontext eines Vergnügungsparks



Abbildung 2.34: Zukunftsvisionen eines Ballbots als Fortbewegungsmittel

Weiterer Bestandteil der Arbeit der Industriedesigner ist die Erarbeitung von Zukunftsvisionen für Rezero. Bei dieser Arbeit haben die Designer die Mög-

lichkeit, das Projekt durch Konzepte zu erweitern, welche sich vom Projektziel entfernen. Dabei wird ein Ballbot als Technologie verwendet und diese Technologie in einem Produkt integriert. Die Arbeit umfasst Visualisierungen von sieben verschiedenen Ballbotkonzepten, die in naher Zukunft angesiedelt sind. Auszüge sind in den Abbildungen 2.33 und 2.34 dargestellt.

2.10 Demonstrationskonzept

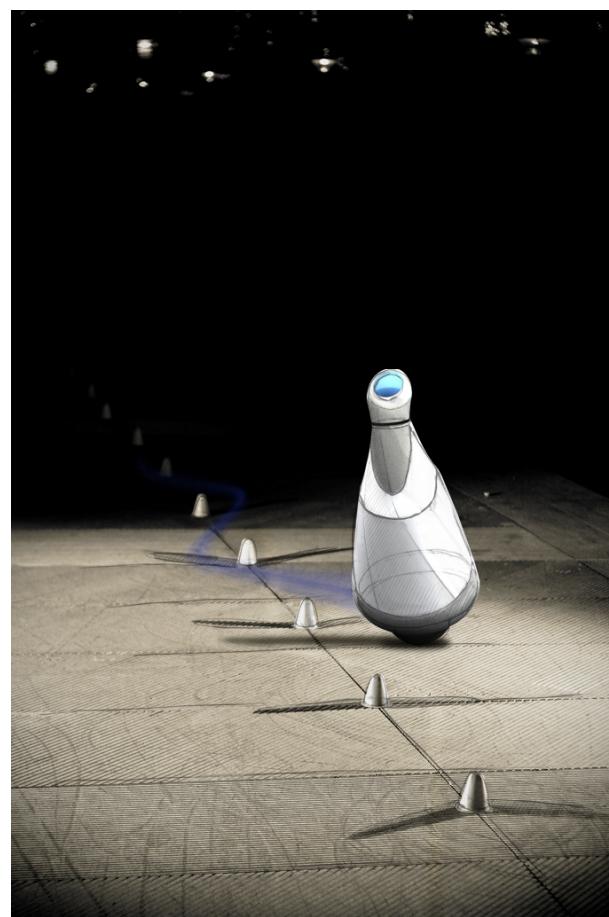


Abbildung 2.35: Konzeptzeichnung Agilitätsmodus

Der Ballbot soll in der Lage sein, in einer kurzen Show seine einzigartigen Fähigkeiten zu demonstrieren. Durch das Konzept einer dynamischen Verschalung umfasst dies nicht nur das Abfahren von komplexen Bahnen, sondern erlaubt auch Rezero als personifizierten Protagonisten der Show einzusetzen, da er dank Verschalung und Licht selbst Emotionen vermitteln und so mit einer kleinen Gruppe von Menschen interagieren kann.

Weil hohe Geschwindigkeiten und Beschleunigungen im Konflikt mit dem Erkennen von Hindernissen und der Interaktion mit Menschen stehen, werden im folgenden zwei Bewegungszustände definiert:

Interaktionsmodus

Der Ballbot fährt mit begrenzter Geschwindigkeit und Beschleunigung. In einem definierten Bereich interagieren wenige Personen, unter Aufsicht eines Moderators, mit Rezero. Ein grösseres Publikum kann dabei den Bereich umschließen.

Agilitätsmodus

Der Ballbot demonstriert sein volles Agilitätspotential in einem abgesperrten Bereich. Gesteuert wird er mittels Fernsteuerung oder durch vorprogrammierte Trajektorien. Abbildung 2.35 zeigt eine mögliche Momentaufnahme.

Mögliche Demonstrationen werden nach den Kriterien Qualität, Originalität und Machbarkeit ausgewählt. Im Interaktionsmodus soll der Ballbot beispielsweise parkieren, sich für Applaus „verneigen“, Verhalten imitieren oder „Fangen“ spielen können. Rezero erkennt Hindernisse, weicht Personen aus und drückt Emotionen mit Hilfe seiner Verschalung aus. Im Agilitätsmodus ist dies nicht der Fall, da die Geschwindigkeiten zu hoch sind. Rezero fährt Bahnen und Muster wie Spiralen, Slalom und Schreibschrift, wendet und rotiert.

Beide Modi können in einem übergeordneten Szenario präsentiert werden, wobei sich eine Art Zirkusshow oder eine inszenierte Verfolgungsjagd besonders eignen.

Wichtig ist, dass der Ballbot nicht spezifisch auf diese Demos optimiert wird. Sie sollen lediglich dazu dienen, der Öffentlichkeit die Möglichkeiten dieser Technologie aufzuzeigen.

3 Konstruktion und Fertigung

Bei der Konstruktion und Fertigung geht es primär um die rein bauteilbezogene Entwicklung und letztlich auch um die Fertigung der einzelnen mechanischen Elemente des Ballbots. Hierbei wird der Grundstein für eine erfolgreiche Entwicklung von Rezero gelegt.

3.1 Detailkonzept

Aufgrund des bereits erwähnten mechanischen Konzepts (siehe 2.8.4), ergeben sich die folgenden Komponenten:

- Kugel
- Omniwheel
- Aufhängung
- Skelett
- Gegenhalter
- Verschalung

Bis auf die letzten zwei Komponenten, sind alle in Abbildung 3.1 grafisch dargestellt.

Es sei erwähnt, dass die Verschalung sowie der Gegenhalter nicht Teil des AS-Prototypen sind (siehe Anhang A.5) und deshalb erst im zweiten Teil des Projekts umgesetzt werden .

Kugel Gemäss dem mechanischem Konzept soll eine beschichtete Hohlkugel eingesetzt werden. Dazu ist abgeklärt worden, ob auf existierende Lösungen zurückgegriffen werden kann oder ob eine Sonderanfertigung benötigt wird. Schnell hat sich gezeigt, dass existierende Kugeln (bzw. Bälle) in Formstabilität, Rundheit und/oder Gewicht unzureichend sind. Mit einem erheblichen Mehraufwand ist eine neue Lösung entwickelt worden.

Da das Gewicht der Kugel optimiert werden soll, erfolgt die Werkstoffwahl aufgrund von Dichte und Festigkeit. Mögliche Lösungen umfassen

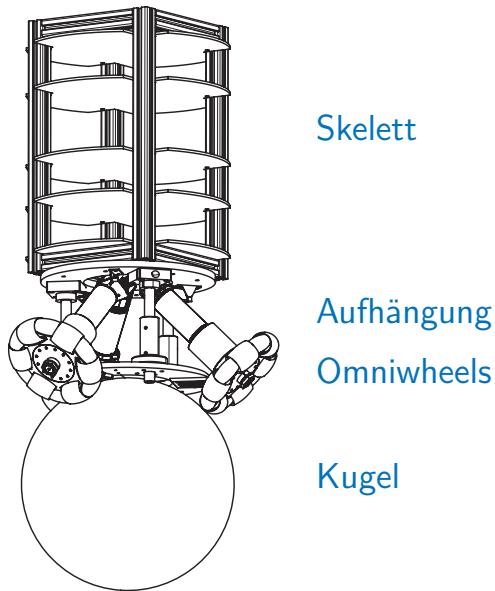


Abbildung 3.1: Gesamtansicht des Detailkonzeptes

hier insbesondere Aluminium und verschiedene Kunststoffe.

Die Beschichtung der Kugel soll eine möglichst gute Haftung auf verschiedenen Untergründen gewährleisten und kleine Unebenheiten ausgleichen. Dafür eignen sich Beschichtungen aus Kunststoff oder Flock (Textilfaser). Auch die Haftreibung in Kontakt mit den Omniwheels soll optimiert werden (siehe Abschnitt 2.8.4). So müssen die Oberflächen von Omniwheels und Kugel perfekt aufeinander abgestimmt werden.

Bei der Entwicklung der Kugel muss stets auf deren Rundheit und geringe Exzentrizität geachtet werden, um eine gleichförmige Bewegung des Ballbots zu ermöglichen.

Omniwheel Das Omniwheel besteht, wie in Abbildung 3.2 dargestellt, aus mehreren Rollen. Es funktioniert in Antriebsrichtung wie ein normales Rad, ermöglicht in Querrichtung jedoch ein freies Abrollen. Ein solches Rad herzustellen, stellt den Konstrukteur vor eine grosse Aufgabe. Existierende Omniwheels erfüllen die Anforderung einer kreisrund umlaufender Abrollkante in einfacher Ausführung nicht (siehe Abschnitt 2.8.4). Eine innovative Lösung für dieses Problem, stellt eine Entwicklung der Universität Tohoku Gakuin (TGU) dar [20]. Diese

patentierte Lösung hat den Nachteil, dass sie nicht kommerziell erhältlich ist. Daher entwickelt das Team, basierend auf der Version der TGU, ein eigenes Omniwheel. Dabei soll grossen Wert auf eine normgerechte Lagerung, gute Montierbarkeit und ausreichende Festigkeit für die dynamischen Belastungen gelegt werden.

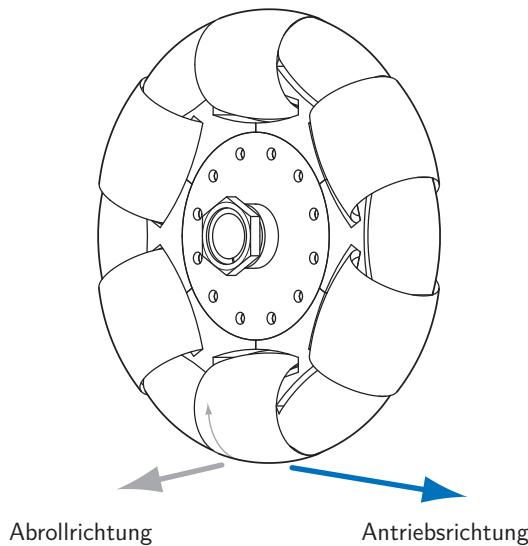


Abbildung 3.2: Abroll-Konzept des Omniwheel

Aufhängung Der Aufhängung wird zunächst die Funktion als Verbindungs-element zuteil. Sie ist Aufnahme für die Motoren und Verbindung zum Skelett zugleich. Da der Ballbot aber ausserdem für zahlreiche zu befahrende Untergründe mit verschiedensten Unebenheiten entwickelt werden soll, besteht der Anspruch, zudem ein Feder-Dämpfer-Element einzubauen.

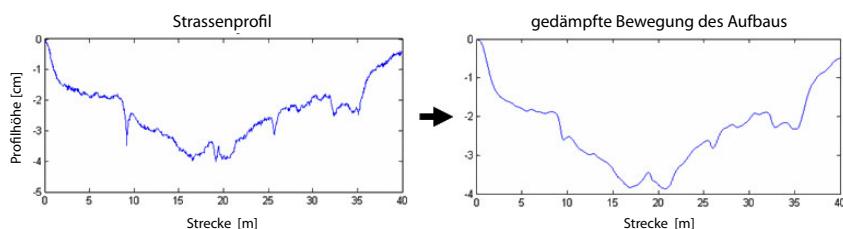


Abbildung 3.3: Ausfedern hochfrequenter Störungen, Modell siehe 3.2.3

Aufgrund der Schnittstellen zu vielen mechanischen Bauteilen, ist die Modularität bei der Aufhängung sehr wichtig. Insbesondere leicht unterschiedliche Kugelgrößen sollen ohne Bauteiländerungen realisierbar

sein. Auch das Feder-Dämpfer-Element muss zunächst veränderbar bleiben, da sich die mechanischen und elektronischen Bauteile noch in der Evaluationsphase befinden und das Gesamtgewicht, obwohl interne Vorgaben existieren, nicht genau definiert werden kann. Es lässt sich aber bereits definieren, dass die Federung kritisch gedämpft sein soll, um eine schnelle Abnahme der Schwingungsamplitude zu erreichen.

Da die Aufhängung ein dynamisches Element darstellt, muss dieses auch mit der Regelung des Ballbots abgestimmt werden. Während aus mechanischer Sicht ein System mit ausreichender Dynamik erstrebenswert ist, vereinfacht ein möglichst statisches Element das zu modellierende System. Ein Kompromiss stellt die Reduzierung der Freiheitsgrade dar. So soll nur in vertikaler Richtung gefedert werden. Dadurch wird eine Massenverschiebung in horizontaler Richtung zwischen Kugel und Aufbau verhindert.

Skelett Da die elektronischen Bauteile auf dem Ballbot befestigt werden müssen, wird ein Skelett benötigt. Hier sind die rein mechanischen Anforderungen eher gering. Folglich wird also vor allem auf eine effektive Ausnutzung des zur Verfügung stehenden Bauraumes Wert gelegt. Durch eine einfache Befestigung, basierend auf einem Baukastenprinzip, soll der Einbau und Austausch von einzelnen Komponenten möglichst problemlos und schnell erfolgen können. Hierfür sollen variable, herausnehmbare Ebenen, aufgehängt in einem stabilen Grundgerüst, entwickelt werden. Auf diesen Ebenen werden dann die elektronischen Komponenten montiert.

Zusätzlich braucht es für die ersten Tests eine Vorrichtung, welche ein Umkippen verhindert, sodass bei einem möglichen Sturz des Ballbots keine Bauteile beschädigt werden.

Für den finalen Prototypen kann mithilfe der gewonnenen Erfahrungen dann ein, für die Elektronik und die Verkleidung optimiertes, Skelett entwickelt werden.

Bei der Konstruktion wird mithilfe von einem Bauraummodell (Wave-Modell) innerhalb der CAD-Software gearbeitet. Diese erlaubt, Schnittstellen und Größenverhältnisse ohne detaillierte Bauteilkenntnisse festzulegen. Mit den zusätzlich geschätzten Baugrößen und Kennzahlen können so aus dem Modell rasch und einfach erste Entwürfe konstruiert und in einen Kontext gesetzt werden. Das Wave-Modell erfordert vom Konstrukteur zwar zunächst einen grösseren Arbeitseinsatz, dieser wird aber durch gute Verknüpfungen bei Bauteiländerungen und der Montage entsprechend belohnt.

3.2 Mechanische Komponenten: AS-Prototyp

3.2.1 Kugel

Die Kugel stellt das zentrale Element eines Ballbots dar. Sie ist das Bauteil, dass einen Ballbot von anderen mobilen Robotern unterscheidet und zieht damit die Aufmerksamkeit des Betrachters auf sich. Auch funktional spielt die Kugel eine äusserst wichtige Rolle. Ein instabiles und sensibles System wie es Rezero ist, stellt höchste Anforderungen bezüglich Gewicht und Präzision an die Kugel.

Analyse der Rahmenbedingungen

Eine Analyse des Kugelgewichts zeigt, dass dieses zwar für das Gesamtgewicht und die damit verbundene Agilität des Ballbots entscheidend ist, die konkrete Massenverteilung zwischen Kugel und Oberbau aber keine entscheidende Rolle spielt. So kann auch die Kugel bezüglich Gesamtmasse optimiert und in Bezug auf das Kugelgewicht unabhängig von den restlichen Bauteilen dimensioniert werden.

Aufgrund des Eingriffs der Omniwheels bei 45° und einem Anordnungswinkel von 120° zueinander (siehe Abbildung 3.1), ist der Kugeldurchmesser bereits relativ stark vorgegeben. Einstellmöglichkeiten bei der Aufhängung sollen jedoch einen gewissen Handlungsspielraum ermöglichen. Der daraus resultierende Kugeldurchmesser von 250 bis 270 mm bewegt sich bezüglich der Grösse in einem durchaus üblichen Fertigungsbereich. Zum Vergleich: Ein Basketball misst im Durchmesser etwa 248 mm.

Obwohl der Gegenhalter als Bauteil noch nicht betrachtet wird, soll darauf, nach Möglichkeit, bei der Auslegung Kugel bereits geachtet werden.

Herstellungsverfahren und Fertigung

Da präzise Kugeln dieser Größenordnung in der Praxis relative wenige Anwendungsgebiete finden, hat sich die Suche nach einem Fertigungspartner mit entsprechendem Know-how als sehr schwierig und zeitaufwändig gestaltet. Schliesslich konnte die Firma Kundert AG, welche spezialisiert ist auf die Herstellung von Kunststoffen, zur Fertigung der Kugel gewonnen werden. Sie arbeiten zusätzlich mit einer Partnerfirma zusammen, welche ihnen zwei Aluminiumhalbkugeln liefert. In einem aufwändigen, eigens für das Projekt entwickelten Verfahren, werden diese zwei Halbkugeln umgossen und anschliessend miteinander verschraubt. Nach der Verschraubung findet nochmals ein Plandrehen der Kugel statt. Der Vorteil dieses Angebots liegt in der Kunststoffschicht, welche ersetztbar ist. Weiter lässt sich die Kugel jederzeit öffnen und auch wieder sauber verschliessen. Diese Zusatzfunktion ermöglicht den Innenraum der Kugel für eventuelle Zusatzfunktionen, wie z.B. einen magnetischen Gegenhalter, zu benutzen. Der Nachteil an diesem Verfahren ist, dass dieses noch nie angewandt wurde und damit ein gewisses Risiko besteht. Aus dem Grund dass keine genauen Daten über Haftreibung und Verschleiss der verschiedenen Kunststoffen besteht, hat sich das Team dazu entschieden, eine ausführliche Evaluation der Beschichtung vorzunehmen.

Beschichtung

Da die Kugel und ihre Beschichtung eine Spezialanfertigung sind, wird die Beschichtung exakt auf die Omniwheels angepasst. Ziel der Kunststoffbeschichtung ist es, eine möglichst hohe Kraftübertragung zwischen dem Antrieb und der Kugel zu ermöglichen. Aus Berechnungen 5 geht hervor, dass agile Bewegungen von Rezero möglich sind, wenn die Omniwheels fünf Newtonmeter auf die Kugel übertragen können. Mit dem Gewicht des AS-Prototypen von zwölf Kilogramm, stehen alle wichtigen Parameter zur Verfügung.

Mit den gegebenen Randbedingungen, ist eine Testbench konstruiert worden. Abbildung 3.4 beschreibt den Aufbau der Anlage. Durch Aufbringen von Gewichten wird ein Anpressdruck F_{an} simuliert. Der Arm der Anlage arretiert ein Omniwheel und drückt es auf die verschiedenen Kunststoffproben, welche von der Kundert AG zur Verfügung gestellt worden sind. Durch eine Messung der Zugkraft mithilfe einer Federwaage, wird F_{zug} ermittelt.

Diese Kraft ist die auf die Kugel übertragbare Kraft. F_{zug} kann dann durch einfache Berechnungen in das übertragbare Moment umgerechnet werden.

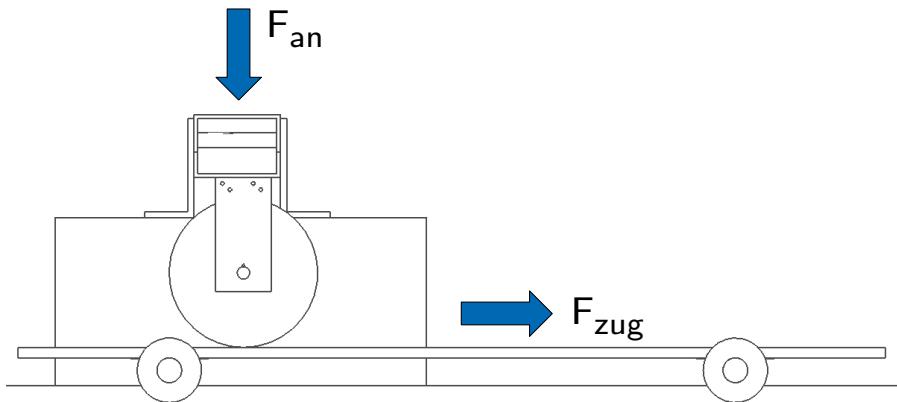


Abbildung 3.4: Testbench Aufbau mit dem Anpressdruck und der übertragbaren Zugkraft

Das wichtigste Resultat dieser Evaluierung ist die Auswertung des übertragbaren Momentes auf die Kugel. Die Gesamtevaluation befindet sich im Anhang A.21. Der ausgewählte Kunststoff MAH 45¹ überträgt bei einem Anpressdruck von knapp sechs Kilogramm ein Moment von ungefähr 3200 Nmm. Die sechs Kilogramm Anpressgewicht werden, bedingt durch den Eingriffswinkel der Omniwheels, auf vier Kilogramm reduziert. Mit drei Omniwheels ergibt das einem Anpressdruck von zwölf Kilogramm.

Eine erwähnenswerte Feststellung ist das Verhalten von harten Kunststoffen. Sie weisen bei einem hohen Anpressdruck die besten Werte auf. Trotzdem ist die Entscheidung auf einen weichen Kunststoff gefallen. Die Begründung liegt in der Tatsache, dass der harte Kunststoff beim Überschreiten des maximal übertragbaren Momentes einen ruckartigen Verlust der Haftreibung aufweist. Das Omniwheel rutscht infolge über die Kugel. Bei einem weichen Kunststoff ist dieses Phänomen nicht aufgetreten, was der ausschlaggebende Grund für die Wahl eines weichen Materials ist.

Kern

Der Kern der Hohlkugel bilden zwei Aluminiumhalbkugeln. Sie sind durch ein Gewinde miteinander verschraubar. Der Vorteil zweier verschraubarer Halbkugeln liegt in der Wiederbeschichtbarkeit. Die beiden Hälften können so in ihren entsprechenden Negativformen, beliebig oft wieder beschichtet werden. Die Wandstärke beträgt im Allgemeinen zwei Millimeter, für die

¹MAH ist der Name des Kunststoffs und 45 steht für die Härte in Shore des Materials

Gewinde die Wanddicke auf bis zu sechs Millimeter verstrtzt wird. Das Gesamtgewicht der Kugel beträgt mit der Beschichtung 2.29 kg.

3.2.2 Omniwheel

Das Omniwheel übernimmt die Funktion der Krafteinleitung vom Motor auf die Kugel und garantiert so die Fortbewegung des Ballbots. Dabei muss es die dynamischen und statischen Lasten des Aufbaus tragen. Besonders hohe Ansprüche werden für die Regelbarkeit des Systems gestellt, darunter die Omnidirektionalität, die Rundheit und der geringe, gleichbleibende Abrollwiderstand. Ein Durchrutschen auf der Kugel hätte fatale Folgen für die Stabilität des gesamten Ballbots.

Analyse der Rahmenbedingungen

Knackpunkt des omnidirektionalen Antriebs ist die gleichmige Kraftübertragung der den gesamten Umfang des Rades. Anders als bei herkömmlichen Antriebsrädern muss die Rotation quer zur Fahrtrichtung bei einfacher Ausführung ermöglicht werden. Wrend der Konzeptphase fällt der Entscheid zugunsten eines Rollen-Omniwheel. Dabei sind die einzelnen Rollen gelagert und versuchen den Umfang des Rades so gut wie möglich abzudecken. Aufgrund der Lagerungen ist es konstruktiv sehr schwierig den gesamten Abrollkreis abzudecken.

Im Gegensatz zu herkömmlichen Omniwheels, welche in der Industrie zum Einsatz kommen und häufig als doppelt oder dreifach angeordnete Einzelräder eingesetzt werden, muss dieses in einfacher Ausführung bestehen. Obwohl eine doppelte oder dreifache Anordnung das Problem des Rundlaufs zu beheben vermag, springt dafür der Auflagepunkt des Rades und aufgrund der gekrümmten Oberfläche entsteht auch kein befriedigendes Resultat.

Das Rollen-Omniwheel basiert, wie einleitend in Kapitel 3.1 erwähnt, auf einer Eigenentwicklung der Tohoku Gakuin Universität. Basis dieses Konzeptes bildet die Innenlagerung der Rollen und die segmentierte Bauweise, die das seitliche Rollen über den gesamten Umfang des Rades ermöglicht. Herausforderungen bei dieser Konstruktion sind die hohe Komplexität aufgrund der engen Platzverhältnisse und der filigrane Aufbau im Kontrast zu den hohen Lasten, die auf das Omniwheel wirken. Ein Nachteil sind sicher die hohen Kosten, die für eine Spezialanfertigung resultieren. Die weitaus günstigere Variante ist auf Industrie-Omniwheel zurückzugreifen. Wie oben erwähnt, wäre dazu eine doppelte Ausführung nig um den gewünschten Rundlauf

zu erzielen. Zudem hat der Ballbot, der an der Universität Adelaide entwickelt wurde [11], aufgezeigt, dass die hohen Kräfte bei Spitzenbelastung, die grösstenteils aus Kunststoff gefertigten Teile, überbeanspruchen können und so zu einem Totalausfall des Ballbots führen.

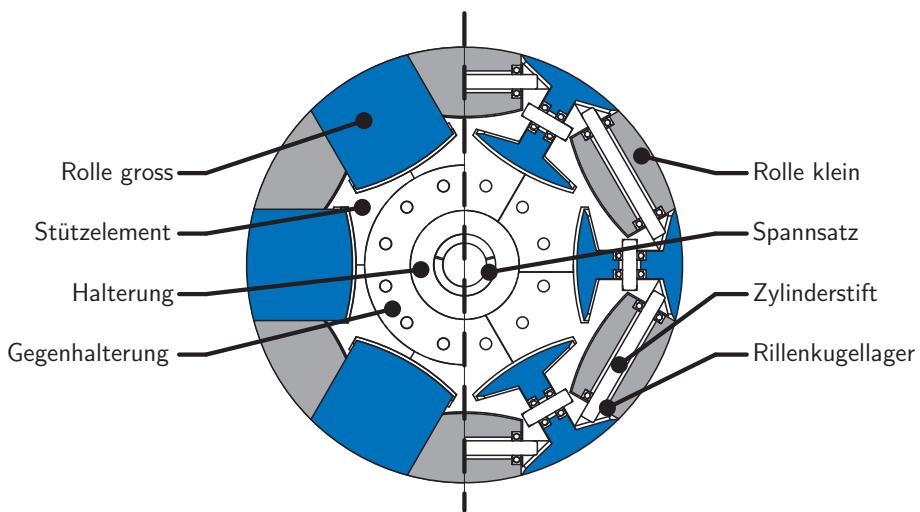


Abbildung 3.5: CAD Visualisierung des Omniwheel

Auslegung und Dimensionierung

Ziel ist es, die Anforderungen an das Omniwheel bestmöglich zu erfüllen, um einen sicheren Betrieb des Ballbots zu ermöglichen. Hauptaugenmerk liegt auf den hohen dynamischen Lasten, die von den drei Rädern aufgenommen werden müssen. Sie sind richtungsweisend für die Konstruktion und müssen vollumfänglich vom Omniwheel getragen werden können. Die CAD-Konstruktion basiert auf vier Hauptelementen: Halterung, Stützelement, grosse Rolle und kleine Rolle (siehe Abbildung 3.5). Um die Montierbarkeit des Omniwheels zu gewährleisten muss die grosse Rolle von zwei Stützelementen umschlossen werden. Die dadurch entstehende Segmentierung gibt die grobe Form des Stützelementes vor. Dabei entsteht ein schmäler Querschnitt, der die gesamte Kraft vom Rad auf die Achse übertragen werden muss. Um diese heikle Stelle genauer untersuchen zu können, wurde eine FEM-Analyse durchgeführt. Dabei stellte sich heraus, dass dieser Querschnitt tatsächlich die höchste Belastung aufweist und zu schwach dimensioniert ist. Aufgrund des knappen Bauraums konnte der kritische Querschnitt

einzig durch eine Erhöhung der Dicke des Stützelements entlastet werden. Abbildung 3.6 zeigt das Stützelement bei einer Dicke von 6 mm, respektive 10 mm.

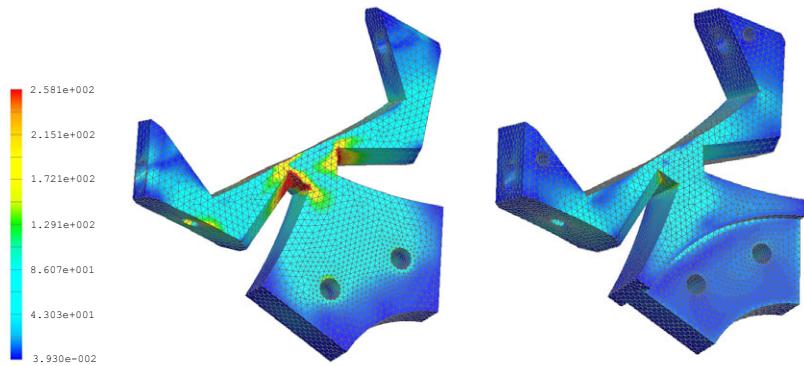


Abbildung 3.6: Finite Element Methode am Stützelement

Um das Funktionsprinzip zu verifizieren und mögliche Lagerungsvarianten zu testen wurden einzelne Elemente geplottet² und auf die Funktionstüchtigkeit hin untersucht.

Mit den aus ersten Berechnungen erhaltenen Kräfte erfolgt die Dimensionierung der Lagerung der Rollen. Dabei stellt sich heraus, dass die wirkenden Kräfte die Lagerungen stark belasten und Schräkgugellager die beste Lösung wären. Da jedoch die grosse Rolle den Bauraum stark einschränkt und Schräkgugellager sehr breit sind in Bezug zu ihrem Aussendurchmesser, sind Schräkgugellager verglichen zu grösseren Rillenkugellagern schlechter. Somit werden die grossen, jedoch schmalen Rillenkugellager verwendet, welche einen zufriedenstellenden Sicherheitsfaktor bieten. Die ganze Berechnung ist im Anhang A.19 ersichtlich. Als Achsen werden gehärtete Zylinderstifte verwendet, welche durch Madenschrauben fixiert werden.

Um das System regelungstechnisch zu vereinfachen muss ein Durchrutschen des Omniwheel auf der Kugel vermieden werden. Dies bedingt einen hohen Haftreibungskoeffizienten. Durch eine entsprechende Oberflächenbehandlung der Aluminiumrollen kann dieser angepasst werden. Da die Rollen aufgrund der Gewichtsreduktion aus Aluminium gefertigt werden, versagen gängige Methoden zum Aufrauen der Oberfläche. Der Grund ist, dass Aluminium zu duktil ist und die kleine, spitze Struktur, welche durch Rändeln

²3D Rapid Prototyping

oder Sandstrahlen eingebracht werden kann, zu schnell abgeflacht würde und somit der Effekt verloren ginge. Somit müssen die Rollen beschichtet werden. Dazu gäbe es verschiedenste Möglichkeiten wie Beflockung, DIANIP-Beschichtung³, Wolfram-Carbid, PVD⁴ usw. zur Auswahl. Tests an Mustern haben aufgezeigt, dass mit Flammspritzen einer 13% Chromstahllegierung sehr gute Resultate erzielt werden und einer Diamantbeschichtung oder Beflockung klar vorzuziehen ist.

Fertigung

Mit der Samuel Werder AG, hat das Team einen Partner, der das Omniwheel in der geforderten Genauigkeit fertigen kann. Darüber hinaus unterstützt sie das Team in konstruktionstechnischen Fragen und hilft wo möglich mit Ideen und Kontakten weiter. Die Plasmabeschichtung der Rollen kann bei der Firma Baumann in Bülach durchgeführt werden.

Fazit

Das Montagekonzept konnte verifiziert werden, die Montage der Räder ist aufgrund der grossen Stückzahl und der Komplexität jedoch sehr aufwändig. Die Konstruktion erfüllt die geforderte Funktionstüchtigkeit in vollem Umfang und wurde ohne Zwischenfälle erfolgreich am bestehenden System getestet.

Nach einigen Tests wurden die Omniwheels demontiert und nachbearbeitet, um die Berührung der Rollen untereinander zu vermindern. Die Beschichtung hat insbesondere in den ersten Tests auf der Polyethylenkugel stark gelitten; das auf der Kugel abgetragenen Material wurde von den Rollen sicht- und fühlbar aufgenommen und hat die Rauigkeit entsprechend vermindert. Das aufgenommene Material konnte mechanisch nicht ohne zusätzliche Beschädigung aus den Rollen entfernt werden. Denkbar wäre eine chemische Auflösung, dazu ist jedoch eine komplette Demontage notwendig. Auch insgesamt konnte mit fortlaufender Testzeit eine Reduzierung der Rauigkeit und zusätzliches Lagerspiel festgestellt werden. Insbesondere das Lagerspiel kann durch zusätzliche Passscheiben nachträglich kompensiert werden. Auf eine zusätzliche Verklebung der Zylinderstifte wurde aufgrund der Demontierbarkeit und der Nachjustierung verzichtet, könnte nachträglich jedoch durchgeführt werden.

³Diamant-Nickel Schicht von 15–35 μm

⁴Physical Vapour Deposition

3.2.3 Aufhängung

Die Aufhängung des Ballbots stellt die zentrale Schnittstelle zwischen Oberbau (Skelett und Verschalung), Antrieb (Omniwheel und Motoren) sowie der Kugel dar. Da das Team entschieden hat, dass der Ballbot nicht nur unter Laborbedingungen, sondern auch in Alltagssituationen eingesetzt wird, ist die Aufhängung nicht nur ein reines Verbindungselement, sondern soll auch eine Federung und Dämpfung beinhalten, die mögliche Unebenheiten des Untergrunds ausgleicht und so zu einem ruhigeren Fahrverhalten führen. Dies hat den Vorteil, dass Schläge und hochfrequente Schwingungen sich nicht direkt auf die IMU und die restlichen Komponenten übertragen. Zudem sorgen Feder-Dämpfer-Elemente für einen optisch stabileren und sichereren Fahreindruck.

Neben Gewicht und Festigkeit, die für die Aufhängung, wie für jedes mechanische Bauteil, von zentraler Bedeutung ist, liegt ein Hauptaugenmerk vor allem auf der Modularität. Gerade weil bei der Aufhängung viele einzelne Bauteile ihre Schnittstelle haben, ist es wichtig, dass mit möglichst wenig Aufwand und Kosten die nötigen Anpassungen gemacht werden können. Dies erlaubt, dass neue Revisionen oder auch grössere Änderungen von einzelnen Bauteilen mühelos realisiert werden können.

Segmente

Die Aufhängung besteht aus drei zentralen Segmenten:

- Führungssystem und Federung
- Befestigung des Antriebs
- Gegenhalter

Lösungsfindung und Evaluation

Die Verbindung zwischen Motoren und Aufhängung kann aufgrund thermischer Ausdehnung nur am vorderen Teil des Getriebes realisiert werden. Diese Verbindungsstelle ist jedoch gleichzeitig sehr nahe an den Omniwheel.

Eine Möglichkeit den geringen Bauraum zu umgehen, wäre An- und Abtriebsachse, also Omniwheel- und Motorachse, zueinander zu verschieben und mit einem zusätzlichen Umlenkgetriebe zu verbinden. Dies wird jedoch, sofern anders lösbar, möglichst vermieden, da es eine sehr hohe Komplexität und einen schlechteren Wirkungsgrad mit sich bringt. Dies hat zur Folge, dass der Antriebsstrang fest mit den Omniwheel verbunden ist und damit nicht

einzelnen gefedert ist. Die Spezifikationen bezüglich zulässiger Belastung von Motor und Getriebe lassen dies allerdings auch zu.

Führungssystem Da der Ballbot lediglich vertikal, also eindimensional, gefedert sein soll, braucht es ein Führungssystem mit einem Freiheitsgrad. Daher bietet sich eine Linearführung an oder aber ein Klappmechanismus im Fachwerkstil.

Da eine Linearführung in der Länge sehr variabel ist und zudem, aufgrund der Normteile, kostengünstiger zu realisieren ist, hat sich das Team für diese Lösung entschieden. Da die Kräfte im Ballbot über drei Kraftangriffspunkte, die Auflagepunkte der Omniwheels, eingeleitet werden, wird auch die Linearführung auf drei Elemente verteilt.

Feder/Dämpfer Gerade im Bereich der Federung und Dämpfung gibt es zahlreiche Lösungsmöglichkeiten. Auch die Kombination von verschiedenen Konzepten ist möglich. In die nähere Auswahl bei den Federn fallen hier klassische Druck- bzw. Spiralfedern, Gasfedern sowie Elastomerfedern⁵. Bei den Dämpfern, sofern die entsprechende Feder keine dämpfende Wirkung hat, kommen aufgrund der Kompaktheit und den zahlreichen Konfigurationsmöglichkeiten vor allem klassische Dämpfer in Frage.

Zudem wurde auch nach bereits vorgefertigten Feder-Dämpfer-Elementen, beispielsweise aus dem Modellbau oder dem Fahrradbereich, gesucht. Zwar existieren hier zahlreiche, sehr ausgereifte Lösungen, jedoch sind diese von den Kräften und Dimensionen entweder zu gross oder zu klein für die Anwendung in einem mobilen Roboter.

Neben den obigen Vergleichswerten ist vor allem die Anzahl an Elementen bei Trennung von Feder und Dämpfer kritisch. So kann bei einer kombinierten Lösung die Anzahl der Elemente und damit auch Befestigungsstellen halbiert werden. Dies führt dazu, dass genauer nach einer kombinierten Lösung gesucht werden soll.

Aus einer anfänglichen Erstanfrage bei Hahn Gasfedern (deutscher Gasfederhersteller) bzw. der ECKOLD AG (Vertrieb von Hahn Gasfedern in der Schweiz) ist schnell ein sehr reger Kontakt entstanden. Mit Hilfe dieser Unterstützung und den, aus dem Firmenkontakt gewonnenen Informationen, wurden schnell verschiedene Lösungen erarbeitet. Die Wunschlösung von Teamseite ist ein Dämpfer mit eingebauter,

⁵beide besitzen auch eine dämpfende Wirkung

mechanischer Druckfeder, da solch eine Kombination genau das gewünschte Verhalten widerspiegelt. Nachteil an dieser Lösung ist, dass sie sehr kostenintensiv ist. Daher wird für den AS-Prototypen eine Gasfeder verwendet, die auch eine dämpfende Wirkung beinhaltet. Von der Anordnung her sollen diese Feder-Dämpfer-Elemente möglichst über den Omniwheel liegen, sodass wenige Kraftumlenkungen und geringe Hebellängen nötig sind. Dadurch können Bauteilgrösse und -gewicht reduziert werden, ohne die Festigkeit oder Steifigkeit zu beeinträchtigen.

Befestigung des Antriebs Es zeigt sich schnell, dass eine Verbindung zwischen der Dreiecksanordnung der Omniwheel und dem quadratischen Item-Gestell des Skeletts gefordert ist. Es wird demnach also ein Grundelement unten, welches die Motoren aufnimmt, sowie ein Verbindungselement an der Unterseite des Skeletts, welches die Schnittstelle zum Skelett darstellt, benötigt. Dafür spricht auch, dass das Item-Gestell eine nicht sehr hohe Masshaltigkeit aufweisen wird, wodurch eine genaue Platzierung der Führungselemente direkt auf dem Item-Gestell nicht möglich ist und der Mechanismus somit blockieren könnte.

Hauptschwierigkeit hier ist, wie oben beschrieben, die Verbindung zu den Motoren. Es braucht ein gewinkeltes Stück, dass vorne am Getriebe befestigt wird. Dabei ist der Bauraum durch die Dreiecksanordnung stark begrenzt. Wie in Abschnitt 2.8.2 beschrieben, darf der Anordnungswinkel nicht mehr als 50 Grad betragen, jedoch ist ein Winkel unter 43, aufgrund der Grösse der Motoren, auch nicht möglich. So ist entschieden worden, sich auf einen Anordnungswinkel von 45 Grad festzulegen. So gibt es auch hier zahlreiche Realisierungsmöglichkeiten. Aufgrund der geforderten Kriterien (Modularität und Befestigung für den Gegenhalter), soll dieses gewinkelte Teil ein separates Bauteil sein. Dadurch soll in Zukunft gewährleistet sein, dass sich der Aufstandswinkel der Omniwheels auf der Kugel durch einen Austausch dieser Bauteile realisieren lässt.

Diese Winkelstücke benötigen eine Verbindung zueinander und zur Feder-Dämpfer-Einheit. Da noch ein Gegenhalter folgen wird und dieser, falls rein mechanisch, aufgrund der nötigen Steifigkeit, möglichst kurz oder aber eine magnetische Lösung möglichst in Kugelnähe sein soll, sollte diese Verbindung weit unten liegen. Dies begünstigt auch die

Gesamthöhe, da das Feder-Dämpfer-Element, das ebenfalls auf dem unten positionierten Verbindungsbauteil befestigt wird, relativ lang ist.

Es zeichnen sich daher die folgenden drei Bauteile ab:

- Winkelsütck
- Grundplatte
- Verbindungsplatte

Die technischen Zeichnungen dieser Teile sind im Anhang A.7 zu finden.

Auslegung und Dimensionierung

Ziel ist es, die erarbeiteten Lösungsansätze zu realisieren und schliesslich auch zu optimieren. Da die FEM-Software über grössere Teile der Entwicklungszeit im Teamcenter nicht verfügbar war, mussten die CAD-Dateien mühsam exportiert und dann in einer Teamcenter unabhängigen Version von Unigraphics NX6 analysiert werden. Generell lässt der Bauraum aber eine etwas konservativere Auslegung zu als beim Omnidrive. Zudem lässt sich vor allem durch ein kluges Design viel Material und Gewicht sparen.

Führungssystem Beim Führungssystem ist es sehr kostengünstig und effektiv auf Normteile zurückzugreifen und es gibt zudem, dank Modulsystemen, zahlreiche Konfigurationsmöglichkeiten. Aus Recherchen bezüglich Linearführungselementen ist der Kontakt mit der igus GmbH entstanden. Diese zeichnet sich durch ihre grosse Erfahrung auf diesem Gebiet aus.

Da Schienensysteme für industrielle Anwendungen von den Dimensionen und vom Gewicht nicht geeignet sind, bieten sich vor allem Linearführungssysteme mit Rundprofilen an. Diese sind von der Grundstruktur einfach gehalten und damit sehr gut in Länge und Durchmesser zu variieren. Eine Seite des Rundprofils, respektive der Welle, wird fix montiert, während gegenüberliegend ein Gleitlager angebracht wird.

Die Wahl des Werkstoffs der Welle gestaltet sich relativ einfach. So eignen sich, aufgrund der geringen Dichte und der gewählten Lager, besonders Aluminium sowie Kohlefaser. Da Aluminium preisgünstiger und leichter nachzubearbeiten ist und Kohlefaserwellen lediglich ein Gewichtsersparen von unter 20 g erzeugen, fällt hier die Wahl klar auf Aluminiumwellen.



Abbildung 3.7: Linearflanschlager mit Gleitfolie [9]

Geeignete Gleitlager sind schnell gefunden. Auch hier muss auf Gewicht und Kosten geachtet werden und somit eignen sich Gleitlager mit spezieller Gleitfolie. Diese sind wesentlich leichter als gewöhnliche Linearkugellager. Der leicht höhere Gleitreibungsanteil der Gleitfolie ist bei der Verwendung in einer Federung sehr unkritisch, da die Bewegung ohnehin gedämpft werden muss.

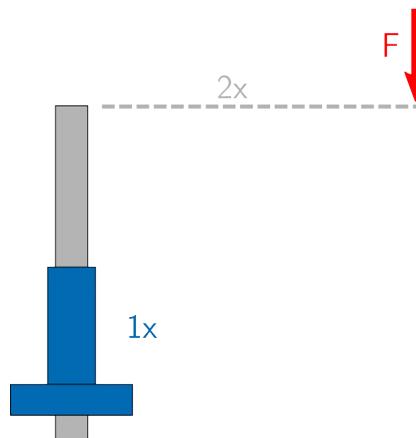


Abbildung 3.8: Konstruktionsbedingung bezüglich Verklemmen

Gerade bei linearen Führungssystemen muss darauf geachtet werden, dass diese nicht verklemmen. Als Richtwert gibt der Hersteller an, dass der Kraftangriffspunkt maximal um die doppelte Führungslänge zur Gleitrichtung verschoben sein darf. Die Betrag der Kraft muss hingegen nicht berücksichtigt werden. Daher sollten die Linearlager möglichst aussenliegend positioniert werden.

Feder/Dämpfer Der Unterschied zwischen einer Gasfeder und einer normalen Spiralfeder ist, dass bei Gasfedern die Federkraft zunächst unabhängig von der Kompression der Feder ist. Die Federkennlinie ist also nicht linear, sondern zunächst eine Waagerechte und somit ist

die Federkraft stets konstant. Glücklicherweise lässt sich durch baulich bedingte Massnahmen eine Progression erzeugen, sodass das Federverhalten einer Gasfeder annähernd dem einer vorgespannten Druckfeder entspricht (siehe Abbildung 3.9).

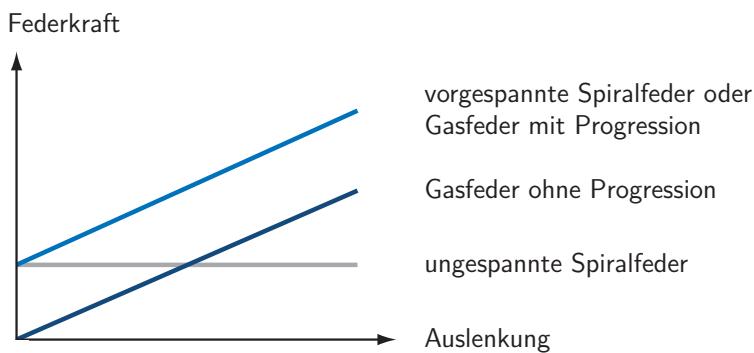


Abbildung 3.9: Darstellung der verschiedenen Federkennlinien

Auch eine gewisse Dämpfung lässt sich über eine Beschränkung der Ein-/Ausschubgeschwindigkeit erzeugen, welche aber nicht der eines mathematischen Dämpfers⁶ entspricht.

Zur Auslegung der Federkonstanten⁷ kommt ein Modell eines gedämpften Massenschwinger zum Einsatz. Dabei wird der Federweg auf 40 mm festgelegt. Dies ist ausreichend um kleine Schwellen ausfedern zu können. Über die ProVal Engineering Software⁸ wird ein real existierendes Fahrbahnprofil exportiert, welches, in MATLAB importiert, als Wegerregung den Massenschwinger anregt (siehe Abbildung 3.10). Auswahlkriterium für das Straßenprofil ist der International Roughness Index (IRI). Dieser wurde mit fünf gewählt, was einem älteren Asphalt entspricht. Zudem wird eine Stufe modelliert und das System damit, in einem separaten Test, ebenfalls angeregt. Über gemessene Kraft und Beschleunigung kann die Federkonstante optimal bestimmt werden.

Zusammen mit der Firma ECKOLD AG ist es nun möglich, eine passende Gasfeder zu konzipieren. Durch das Anbringen eines Ventils an der Gasfeder ist es möglich, über den Fülldruck die Härte der Gasfeder zu variieren. Zudem liefert die Firma ECKOLD AG die passenden

⁶Kraft proportional zur Geschwindigkeit

⁷Die Dämpfungskonstante ergibt sich aus der gewünschten kritischen Dämpfung.

⁸Fahrbahnanalysewerkzeug, dass in Zusammenarbeit mit öffentlichen Straßenbauämtern und führenden Unternehmen im Straßenbau der USA entwickelt wird.

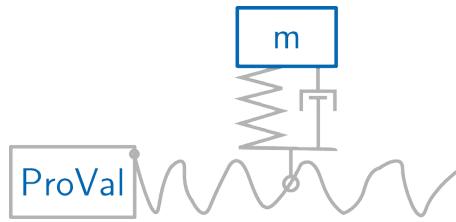


Abbildung 3.10: Prinzipskizze des Modells zur Federauslegung

Beschläge, sodass eine einfache, lösbare Verbindung zu den restlichen Bauteilen möglich ist.

Befestigung des Antriebs Hier steht nun dem Konstrukteur eine schwierige Aufgabe bevor. Diese wird mithilfe der CAD-Software gelöst werden. Dazu wird zunächst die Kugel modelliert und die Omniwheel mit den Antriebseinheiten im gewünschten Winkel darauf platziert. Da praktisch alle mechanischen Bauteile gleichzeitig entstehen, greift das Team hier auf das so genannte „Wave-Engineering“ zurück. Dabei können durch Bauraum- und Schnittstellendefinitionen Bauteile aufeinander referenziert und diese dann parallel erstellt werden.

Anhand der geometrischen Referenzen, kann der untere Teil der Aufhängung modelliert werden. Die Winkelstücke, welche die Antriebselemente mit der Grundplatte verbinden, werden zuerst modelliert, da sie die restliche Geometrie vorgeben. Da ein 45 Grad Winkel bei Fertigung „aus dem Vollen“ einen hohen Materialabtrag bedeutet und damit kostenintensiv ist, wird hierfür ein Biegeteil modelliert. Da dies aber gleichzeitig eine hohe Festigkeit, aber nicht zwingend Steifigkeit, aufweisen muss, wird dieses mit einer Dicke von vier mm dimensioniert. Durch Nuten sollen die Winkelstücke zudem gegenüber der Grundplatte verschiebbar sein, damit die Aufhängung an verschiedenen Kugelgrößen und Beschichtungen angepasst werden kann.

Bezüglich Festigkeit sind die Winkelstücke die kritischen Bauteile der Aufhängung. Eine FEM-Analyse zeigt jedoch, dass diese, trotz Biegeschwäche, ausreichend dimensioniert sind. Auch die Steifigkeit erweist sich als weitaus genügend, wobei eine sehr geringe Nachgiebigkeit bei Schlägen gegebenenfalls die Motoren schützt.

An die Grundplatte, als reines Verbindungselement, sind wenig funktionale Anforderungen gebunden. Als Grundform wird ein Kreisring gewählt, da die runde Form sehr gut mit der allgemeinen, runden Erscheinung des Ballbots harmoniert und die Aussparung in der Mitte

gewährt, dass die Grundplatte möglichst nah an der Kugeloberfläche platziert werden kann. Ansonsten sind zahlreiche Bohrungen für die Befestigung von den Winkelstücken, den Feder-Dämpfer-Elementen und dem Gleitlager charakteristisch. Da, aufgrund der planaren Form der Grundplatte, letztere noch ein wenig von der Kugel entfernt ist, kann dieser Platz für die Wellen beim Einfedern verwendet werden. Im Gegenzug ist oben der Bauraum durch das direkt anschliessende Skelett sehr begrenzt. Daher wurden die Gleitlager (Loslager) auf der Grundplatte, die Flanschwellenböcke (Festlager) auf der Verbindungsplatte positioniert.

Die Verbindungsplatte hat ebenfalls lediglich die Aufgabe einer Schnittstelle. Da die Linearführung sehr genau platziert werden muss und sich die Beschläge für die Gasfedern an der selben Position wiederholen, wird für die Verbindungsplatte die selbe Geometrie wie bei der Grundplatte gewählt. Da die Grundform des Skeletts quadratisch, die Aufhängung aber dreieckig ist, wirken die Löcher zur Befestigung des Skeletts willkürlich gewählt. Tatsächlich entsprechen diese aber genau zwei Befestigungsschrauben pro Skelettkante. Legt man geistig vier Geraden durch die Bohrungen, so ist die Form des Skeletts klar erkennbar.

Fertigung

Als Fertigungspartner für die Aufhängung (Grundplatte, Verbindungsplatte und Winkel) konnte das Paul Scherrer Institut (PSI) gewonnen werden. Dieses verfügt über einen breiten Erfahrungsschatz bei zahlreichen Fertigungsverfahren, sodass sowohl komplexe Fräselemente als auch Biegeteile kein Problem darstellen.

Der Kontakt mit PSI gestaltet sich unkompliziert, sodass Bauteilzeichnungen und exportierte CAD-Daten nach deren Fertigstellung direkt zur Auftragsbearbeitung eingereicht werden können und der Zeitplan problemlos eingehalten werden kann.

3.2.4 Skelett

Das Skelett soll möglichst einfach sein und modular. Dies führt im Konzeptprozess zu einem Gerüst mit verschiedenen Ebenen, welche in der Höhe verstellbar sind. Auf diesen Ebenen können dann die elektronischen Komponenten platziert werden und jederzeit beliebig verschoben werden. Das Ge-

wicht wurde vernachlässigt, da das Skelett Anfangs nur für den AS-Prototyp verwendet werden sollte und dieser eh leichter ist durch das Fehlen der Verschalung. Die Höhe des Skeletts soll zu Beginn klar höher sein als eigentlich benötigt, so kann jeder Zeit die Position der elektronischen Komponenten verstellt werden.

Grundform Die Überlegungen, welche Grundform die beste ist, waren sehr breit. Schnell wurde klar, dass ausser drei- und viereckig nichts in Frage kommt, da alle andern Varianten klar nochmals schwerer wären. Schlussendlich wurde für ein viereckige Grundform entschieden aus folgenden Gründen: Die Profile für eine Dreiecksanordnung sind rund anderthalb Mal so schwer als jene für ein Viereck. Weiter ist bei der Dreiecksanordnung auch das Anbringen der Querverstrebungen klar schwieriger und benötigt Spezialelemente, was sich auf den Preis und unnötig auf das Gewicht auswirken würde. Bei der Vierecksanordnung werden nur oben und unten Querprofile angebracht, welche stirnseitig durch Winkel mit den Längsprofilen verschraubt werden.

Ebenen Die Ebenen werden selbst hergestellt und bilden eine Kreisform, um den vorhandenen Platz im Innenraum des Ballbots möglichst gut auszunutzen. Das Material für diese Ebenen ist ein blaues Polymethylmethacrylat⁹. Für die Befestigung dieser Ebenen werden Winkelelemente an den Längsprofilen montiert und mit den Ebenen verschraubt.

Aufhängevorrichtung Zuoberst an den vier Längsprofilen werden Ringschrauben befestigt. Durch diese Ringschrauben kann der AS-Prototyp aufgehängt werden um zu Beginn während den ersten Tests ein Umfallen auf die Omniwheels zu verhindern.

Wärmeabtransport Der Wärmeabtransport wird hier nicht beachtet, da der AS-Prototyp nicht von einer Verschalung umgeben ist. Weiter ist auch über die Wärmeentwicklung der einzelnen elektronischen Komponenten zu Beginn noch nichts bekannt.

Verschalung Das Itemprofil, welches eine sehr grosse Stabilität gewährleistet und auch viele Befestigungsmöglichkeiten bietet, würde es erlauben, die Verschalung für Testzwecke an diesem Skelett zu befestigen.

⁹umgangssprachlich als „Plexiglas“ bekannt

3.3 Mechanische Komponenten: finaler Prototyp

Im Anschluss an den Bau des AS-Prototypen ist dieser nochmals überarbeitet und verbessert worden. Der finale Prototyp unterscheidet sich zum AS-Prototypen vor allem in folgenden Punkten:

Gegenhalter Es erweist sich als essentiell, eine Gegenhalter zu verwenden, um die Kraft noch besser über die Omniwheels auf die Kugel zu übertragen. Im Rahmen einer Bachelorarbeit [15] werden mehrere Konzepte für einen Gegenhalter entworfen. Schlussendlich wird aus verschiedensten Gründen, in erster Linie aber aus Zeit- und Komplexitätsgründen, ein rein mechanischer Gegenhalter verwendet, welcher sich leicht an den vorhandenen Komponenten des AS-Prototypen anbringen lässt.

Verschalung Das von den Industriedesignern entworfene Design wird umgesetzt, aus Zeitgründen können jedoch die beiden Mechanismen für die Park- und Lamellenbewegung nicht realisiert werden. Ein Konzept ist ausgearbeitet worden und auch das Material ist für einen Umbau bereit gewesen. Die Zeit war jedoch zu knapp, um nach einer so grundlegenden Änderung des Systems die Regelung neu auszulegen. Zudem bestand das Risiko, dass die ganze Dynamik von Rezero unter den vielen beweglichen Komponenten des Roboters leiden würde. So ist entschieden worden, auf die Mechanismen zu verzichten und die Verschalung ohne diese am Skelett des AS-Prototypen anzubringen.

Skelett Da die Verschalung am Skelett des AS-Prototypen angebracht wird, muss das Skelett leicht modifiziert werden. Es ist nötig, die Länge auf 410 mm zu kürzen. Auch müssen einige Ebenen verkleinert werden.

Weiter wird durch die Erfahrungen mit dem AS-Prototypen auch entschieden, die Platzierung der elektronischen Komponenten nochmals zu ändern, bevor diese endgültig verkabelt werden.

In den folgenden zwei Unterkapitel wird nun auf die Ausarbeitung des Gegenhalters und der Verschalung eingegangen.

3.3.1 Gegenhalter

Die Hauptaufgabe eines Gegenhalters für einen Ballbot besteht darin, zusätzlichen Anpressdruck zwischen der Kugel und den Omniwheels zu erzeugen. Ohne Gegenhalter wirkt lediglich die Normalkraft, welche aus der Gewichtskraft des Aufbaus besteht, auf die Kugel. Dementsprechend limitiert ist das übertragbare Motorenmoment auf die Kugel.

Ausgehend von der Kunststoffanalyse der Kugel in Abschnitt 3.2.1, wurde für den Gegenhalter ein klares Ziel definiert. Ohne Gegenhalter ist eine Momentübertragung von 3.5 Nm möglich. Um agile Bewegungen zu ermöglichen, sollten mindestens fünf Newtonmeter erreicht werden. Der Gegenhalter wird also darauf ausgelegt, diese Differenz ausgleichen.

Mechanischer Gegenhalter

Das Grundprinzip des mechanischen Gegenhalters ist aus der gleichen Designstudie wie das Konzept des Ballbots entstanden. Bereits in den Skizzen des Audi Snook, ersichtlich in Abbildung 3.11, ist eine Art Käfig abgebildet, welcher die Kugel unterhalb des Äquators umschließt.



Abbildung 3.11: Audi Snook: Konzept eines mechanischen Gegenhalters [5]

Auf einem ähnlichen Konzept baut der mechanische Gegenhalter auf. Die Aufhängung, die Beschichtung der Kugel sowie die Verschalung stehen in unmittelbaren Kontakt zum Gegenhalter. Sie stellen Randbedingungen auf, welche die Form und Implementierung beeinflussen. Insbesondere darf der Gegenhalter die Verschalung in ihrer Form nicht beeinträchtigen und die Aufhängung sollte durch den Gegenhalter nicht in ihrer Funktion behindert werden. Zuletzt darf die Oberfläche der Kugel während des Betriebs nicht durch den Gegenhalter beschädigt werden. Zudem soll eine schnelle und einfache Einstellung der erzeugten Kraft den Gegenhalter so flexibel wie möglich machen. Zusätzlich soll er das Gesamtsystem so wenig wie möglich beeinflussen. Sei dies durch sein Gewicht oder durch seine erzeugte Rollrei-

bung. Mit den genannten Systemgrenzen und Zielen wird der Gegenhalter ausgelegt, berechnet und anschliessend gefertigt.

Der Gegenhalter als Baugruppe besteht aus drei Bauteilen:

- Oberteil, der die Verbindung zwischen Gegenhalter und Aufhängung darstellt
- Federstahlblech, welches die einstellbare Krafeinleitung übernimmt
- Unterteil mit Kugelrolle, der die Kraft auf die Kugel überträgt

Die Ausgangslage für die Dimensionierung des Gegenhalters stellt Abbildung 3.12 dar.

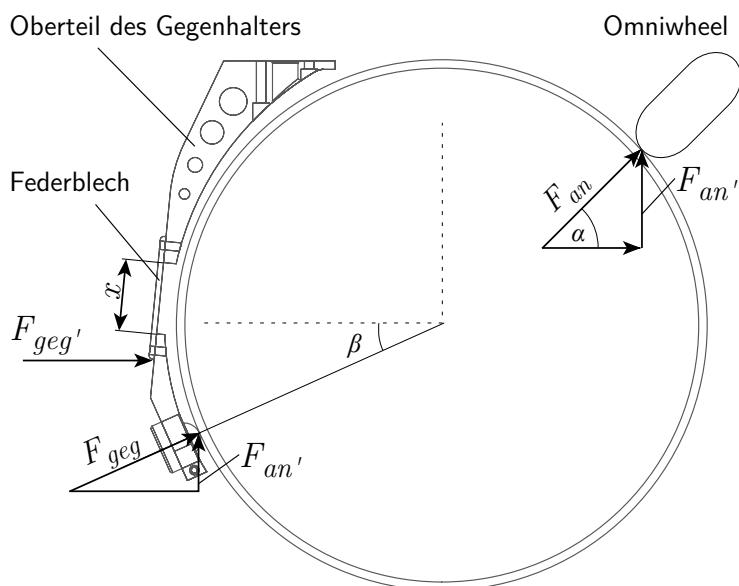


Abbildung 3.12: Aufbau des mechanischen Gegenhalters

Um eine präzise Berechnung des Halters vorzunehmen, werden der Ober- und Unterteil, welche aus Aluminium gefertigt werden, als starr betrachtet. Lediglich das Verbindungsstück in der Mitte besteht aus einem biegbaren Federstahl und übernimmt die Grundfunktion der Krafterzeugung. Ziel ist es, durch eine Verschiebung des unteren Ende des Halters und durch die daraus resultierende Verbiegung des Federstahls eine vertikale Kraft in Richtung der Omniwheels zu erzeugen. In Tabelle 3.1 sind alle gegebenen Werte und Funktionen zusammengefasst.

Die beiden wichtigsten Parameter für die Funktion des Gegenhalters sind das Federstahlelement sowie die Verschiebung, welche an der Kugelrolle am unteren Ende auftritt. Um ein funktionstüchtiges Design zu erstellen, ist mit

| Name | Beschreibung | Formel | Wert |
|-----------|-----------------------------|--------------------------------------|--------------------------|
| F_{an} | Kraft in Omniwheel-Richtung | Konstante | 25,28 N |
| $F_{an'}$ | Vertikale Kraft | $F_{an} = F_{an'} \cdot \sin(\beta)$ | 17,87 N |
| F_{geg} | Aufzubringende Kraft | $F_{geg} = F_{an'}/F_{an}$ | 47,72 N |
| $M_b(x)$ | Biegemoment | $x \cdot F_{geg'}$ | $f(x)$ |
| I_z | Trägheitsmoment | $h \cdot b^3/12$ | $f(h, b)$ |
| v | Verschiebung | Funktion | $f(x, h, b, F_{geg})$ |
| E | E-Modul | Konstante | 210000 N/mm ² |
| β | Gegenhalterwinkel | Konstante | 22° |
| α | Omniwheelwinkel | Konstante | 45° |

Tabelle 3.1: Definitionen und vorgegebene Werte

folgender Rechnung der Vorspannweg berechnet und danach das Federstahlstück dimensioniert worden:

$$v = \frac{x^3 \cdot F_{geg'}}{6 \cdot E \cdot I_z} \quad (3.1)$$

Zur Überprüfung der handschriftlich durchgeföhrten Rechnungen, ist zusätzlich eine FEM-Analyse vorgenommen worden (vgl. Abbildung 3.13). Die beiden Resultate sind fast identisch. Die FEM-Analyse der Biegung weicht bei der Analyse eines ein Millimeter dicken Federstahlstückes um weniger als einen Millimeter ab.

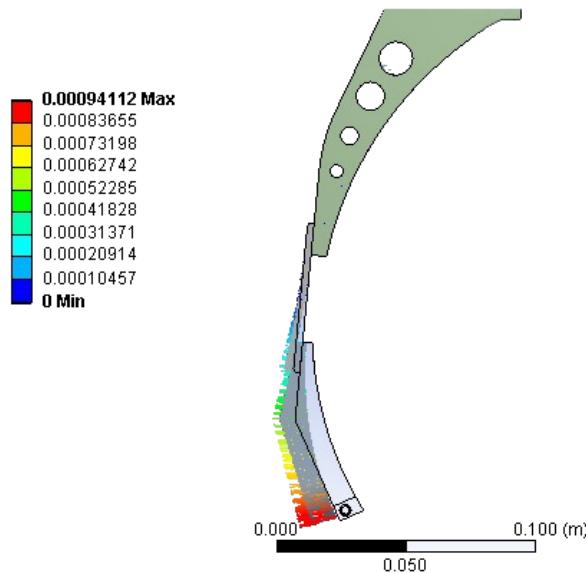


Abbildung 3.13: Veränderung des Vorspannelementes des Gegenhalters

In Abbildung 3.14 ist die Biegung in Abhängigkeit zur Dicke des Federstahls aufgetragen. Verschieden dicke Stücke sind gefertigt worden. So wird eine grosse Bandbreite an erzeugbaren Anpressdrücken möglich.

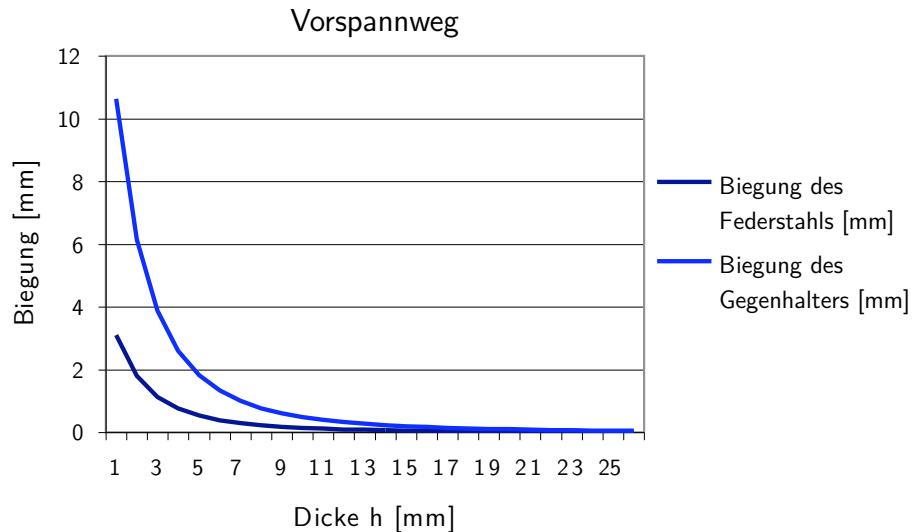


Abbildung 3.14: Biegung des Federstahlelementes und des Gegenhalters

Das CAD-Design richtet sich nach den ermittelten Bedingungen und Zielen. Um möglichst nicht die Verschalung zu behindern, wurde der Mechanismus so kompakt wie möglich gestaltet.

Die finale Version des mechanischen Gegenhalters ermöglicht, durch leicht auswechselbare Federstahlelemente, schnelle und zuverlässige Kraftanpassungen. Des Weiteren verwendet der Gegenhalter, zur Befestigung an der Grundplatte, die gleichen Bohrungen wie die Linearlager der Aufhängung. Daher müssen keine zusätzlichen Bohrungen angefertigt werden.



Abbildung 3.15: CAD Rendering des realisierten Gegenhalters

Zusätzlich zum mechanischen Gegenhalter wurde parallel ein magnetischer Gegenhalter konzipiert. Dieser wird jedoch nicht im finalen System implementiert. Für weitere Informationen zu diesem Gegenhalter sei an dieser Stelle auf [15] verwiesen.

3.3.2 Verschalung

Bewegungsformen der Verschalung

Die konzipierte Verschalung, welche im Abschnitt 2.9 beschrieben wird, soll zwei Bewegungen ausführen. Die eine ist der Parkiermechanismus und die andere ist die Lamellenbewegung. Im Folgenden wird auf diese zwei Bewegungsformen eingegangen und erläutert wie sie konzeptionell hätten umgesetzt werden sollen.

Parkiermechanismus

Der Parkiermechanismus ist nötig, um Rezero in eine Position zu bringen, in dem die Motoren abgeschaltet werden können, ohne dass Rezero umfällt. Mögliche Lösungen für die Realisierung eines solchen Mechanismus sind in Abschnitt 2.8.4 erläutert. Die gewählte Lösung ist das Absenken der Verschalung über die Kugel. Das hat zur Folge, dass die ganze Verschalung sich für das Parken auf und ab bewegen muss. Als Motor für den Mechanismus wird ein Linearmotor gewählt (siehe Abschnitt 4.3.7). Eine Veranschaulichung des konzipierten Mechanismus ist der Abbildung 3.16 zu entnehmen



Abbildung 3.16: Parkiermechanismus an oberster, mittlerer und unterster Position

Lamellenbewegung

Die in Unterkapitel 2.9 vorgestellte Lamellenbewegung soll Rezero eine gewisse Lebendigkeit verleihen. Mit Hilfe der Lamellenbewegung soll Rezero fähig sein, Emotionen und Reaktionen darzustellen. Dazu muss der Mechanismus sehr schnell eine beliebige Position einnehmen und in dieser dann auch starr verharren können. Für die Umsetzung des Lamellenmechanismus und des darüber liegenden, elastischen Stoffes wird das in Abbildung 3.17 dargestellte Konzept erarbeitet.

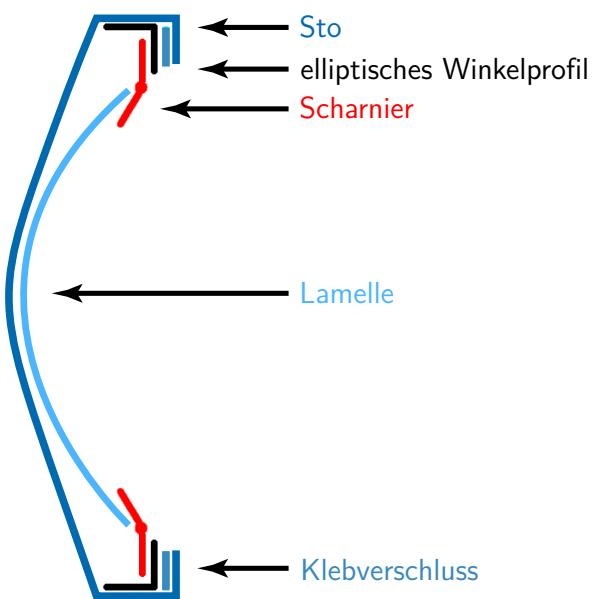


Abbildung 3.17: Konzept der Lamellenbewegung

Es wird ein elliptisches Winkelprofile aus GFK¹⁰ erstellt (siehe Abschnitt 3.3.2). Danach wird jede Lamelle an beiden Enden mit Hilfe von Scharnieren an diesen Winkelprofilen befestigt. Der Einsatz von Scharnieren erlaubt eine Verminderung der Kraft, die benötigt wird um die Lamellen zu beugen. Das Material der Lamellen ist PET¹¹, was ein Durchbiegen ohne bleibende Spuren erlaubt. Um Rezero herum werden total vierzig Lamellen benötigt. Diese werden dann durch den elastischen Stoff verdeckt, sodass die einzelnen Lamellen in nicht ausgebauchten Zustand nicht erkennbar sind. Der Stoff wird mit Hilfe eines Klettverschlusses auf der Innenseite des elliptischen Winkelprofils befestigt, was ein leichtes Auswechseln des Stoffes ermöglicht. Um den gewünschten Lamelleneffekt zu erhalten, muss das obere Winkel-

¹⁰Glasfaserkunststoff

¹¹Polyethylenterephthalat

profil bis zu 40 mm nach unten bewegt werden. Die Kraft, welche für eine solche Bewegung benötigt ist, wird im Abschnitt 4.3.8, zusammen mit der Evaluation des Motors, analysiert.

In Darstellung 3.18 kann die Platzierung der beiden ausgewählten Modellbauservos oberhalb des Linearmotors begutachtet werden.

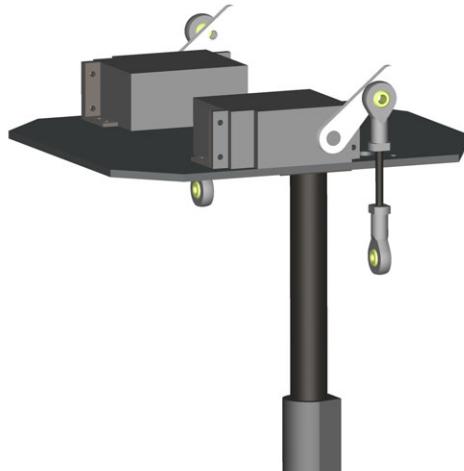


Abbildung 3.18: Die beiden Modellbauservos mit Hebelarm und Pendelstütze sind auf einer Platte montiert, welche wiederum auf dem Linearmotor befestigt ist.

Natürlich ist auch eine Führung der beiden Mechanismen erforderlich. Auch hier werden diverse Lösungen evaluiert; solche mit einer Führung für beide Mechanismen, aber auch solche mit zwei verschiedenen Führungen. Schlussendlich ist jedoch eine einzelne Linearführung gewählt worden. Dies ist aus Gewichts- und Komplexitätsgründen erfolgt. Für die Realisierung wird hier auf die gleichen Komponenten von igus wie bei der Linearführung der Aufhängung zurückgegriffen (siehe Abbildung 3.19).

Planungsphase

Das von den Industriedesignern gelieferte CAD-Design musste zu Beginn nochmals neu erstellt werden, um eine Wave-Grundlage zu haben, welche sich einfacher und gleichmässiger an die vorhandenen Komponenten des AS-Prototypen anpassen lässt. So kann das Design schliesslich problemlos skaliert werden, um den benötigten Innenraum zur Verfügung zu haben. Für die Platzierung der elektronischen Komponenten des finalen Prototypen muss ein neues Konzept erarbeitet werden. Problematisch sind dabei IMU und Akku. Die IMU muss auf der Hochachse und so nahe am Schwerpunkt wie



Abbildung 3.19: Linearführung in den drei Bewegungszuständen

möglich platziert werden um Scheinbeschleunigungen zu vermeiden. Dies führt dazu, dass die IMU einen speziellen Platz im System erhält. Beim Akku stellt sich die Frage, wo der beste Platz ist, da der Akku mit seinem Gewicht von 1,5 kg doch erheblich die Lage des Schwerpunktes beeinflussen kann. Daher ist der Akku im Aufbau so weit oben als möglich platziert worden.

Somit resultiert letztendlich die in Abbildung 3.20 dargestellte Anordnung der Komponenten.

Zuoberst in dem Bild ersichtlich sind beiden Ultraschallsensoren und der Laserdistanzsensor. Beide müssen im obersten Teil an der Verschalung angebracht werden, um jederzeit, auch während der Lamellenbewegung, brauchbare Messwerte zu liefern.

Für die spätere Realisierung wurde das Design in drei Teile aufgeteilt:

- Oberteil
- Mittelteil
- Unterteil

Die Realisation des Mittelteils wurde in Abschnitt 3.3.2 über die Lamellenbewegung bereits ausführlich beschrieben.

Bei den andern beiden Teilen war der Herstellungsprozess eine grosse Herausforderung. Es wurden verschiedenste Prozesse wie, 3D-Plotten, Tiefziehen, Sintern oder auch Fräsen in Betracht gezogen. Doch kein Verfahren war bezüglich dem Verhältnis Gewicht zu Stabilität und dem Preis ebenbürtig mit einem GFK-Verfahren. So wird der Ober- und Unterteil mit Glasfasern realisiert. Dies bedeutet, dass, bis auf Hinterstiche, jede beliebige Form realisiert werden kann.

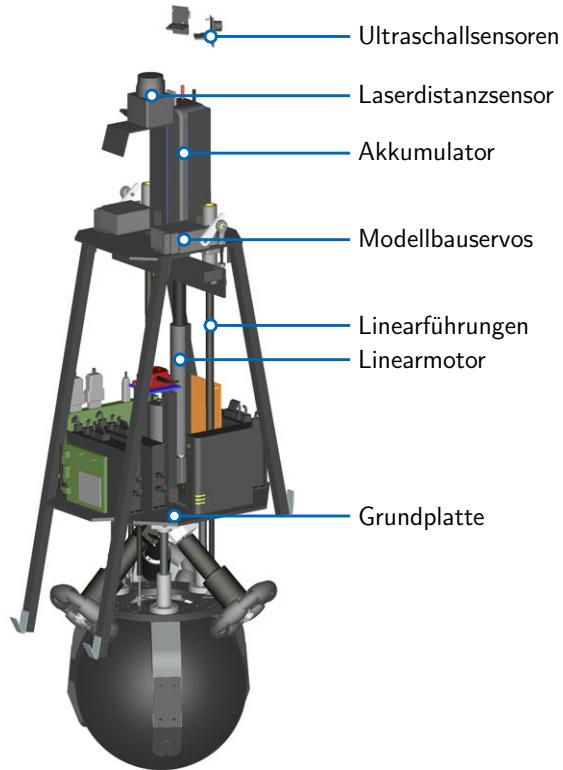


Abbildung 3.20: Platzierung der elektronischen Komponenten

Neben all diesen Design-Aspekten ist auch ein Konzept zu entwickeln, wie die Verschalung ohne grösseren Aufwand abgenommen werden kann, um die elektronischen Komponenten zu erreichen. Schlussendlich ist eine Verbindung zwischen den drei Teilen mit Magneten und Zentrierstiften konzipiert worden. Somit ist es möglich, den Oberteil vom Mittelteil zu trennen, ohne Schrauben zu lösen. Folglich ist der Akku sofort erreichbar und kann einfach ausgewechselt werden, sobald er entladen ist. Für das Abnehmen des Mittelteils ist die Verbindung zwischen dem oberen elliptischen Winkelprofil und dem Mechanismus der Lamellenbewegung zu lösen. Zur Verbindung des unteren elliptischen Winkelprofil mit dem Unterteil ist erneut eine Kombination von Magneten und Zentrierstiften konzipiert. Am Schluss muss dann nur noch die Verschraubung vom Parkiermechanismus zum Unterteil gelöst werden, um die ganze Verschalung vom Roboter abzunehmen. Mit diesem Konzept ist eine Lösung gefunden worden, welche keine von Aussen sichtbaren Befestigungselemente wie Schrauben oder Bolzen benötigt.

In Abbildung 3.21 ist das fertige Konzept im CAD mit transparenter Verschalung dargestellt.



Abbildung 3.21: Ansicht des fertigen Konzepts

Realisationsphase

Für die Erstellung einer GFK-Verschalung braucht es zunächst eine Urform der abzuformenden Geometrie. Hierbei wird eine Positivform verwendet, da diese preisgünstiger als eine Negativform ist. Erstere wird vom Industriepartner Honegger forming erstellt. Die beiden zu laminierenden Geometrien werden in der Mitte halbiert und aus einem Modellbaumaterial gefräst. So entstehen vier Urformen. Alle Urformen haben beim Abschluss zum Mittelteil noch einen Absatz (siehe Abbildung 3.22), mit Hilfe dessen die beiden elliptischen Winkelprofile des Mittelteils angefertigt werden können.

Mit Hilfe dieser Urformen lassen sich Negative aus Glasfasern herstellen. Diese Negative werden dann geschliffen und poliert und werden danach als Form für die positive verwendet. So kann exakt die Urform kopiert werden.



Abbildung 3.22: Die rechte Hälfte der Urform vom Oberteil

Als nächstes muss für den Laserdistanzsensor und die beiden Ultraschallsensoren ein Spalt ausgeschnitten werden beziehungsweise die Löcher gebohrt werden, um die Sensoren mit Hilfe von Aluminiumwinkeln zu platzieren. Auch für den Gegenhalter muss an der Positivform eine Öffnung herausgeschnitten werden. Nach Abschluss diverser kleinerer und grösserer Arbeiten an den Positivformen, können die jeweiligen Hälften zusammenklebt und verschliffen werden.

All diese Arbeiten können im Composite Lab ausgeführt werden, welches speziell für die Fertigung von GFK-Bauteilen eingerichtet ist.

Schlussendlich können Ober- und Unterteil bei einem weiteren Industrie Partner, *Seetal Suisse*, lackiert werden, womit beide Teile fertiggestellt sind.

Für den Mittelteil kann die gleichen Urformen verwendet werden, um die beiden elliptischen Winkelprofile aus Glasfasern herzustellen. Für die Lamellen wird ein genauer Schnittplan erstellt, um sie aus einer grossen PET-Platte heraus zu lasern. Anschliessend wird alles wie beschrieben montiert und mit dem Stoff überzogen. Letzterer wurde zuvor für den Mittelteil massgeschneidert. Zum Abschluss werden noch die Zentrierstifte und Magnete angebracht (siehe Abbildung 3.24).



Abbildung 3.23: Laminieren im Composite Lab



Abbildung 3.24: Detailansichten des Mittelteils

Aktuelle Situation

Wie anfangs Kapitel beschrieben, ist es aus Zeit Gründen nicht möglich gewesen, die Verschalung zusammen mit den beiden Mechanismen auf dem Ballbot zu implementieren. Folglich ist die Verschalung am verkleinerten Item-Gestell fixiert. Statt Verbindungen zum Parkier- und Lamellenmechanismus, wird die Verschalung nun direkt am Item-Gestell befestigt.

4 Elektronik

Im mechatronischen Gesamtsystem des Ballbots spielt die Elektronik eine zentrale Rolle. Um die gestellten Anforderungen bestmöglich zu erfüllen, muss ein durchdachtes Konzept für die elektronische Hardware ausgearbeitet werden. Durch individuelle Vergleiche und Evaluationen werden passende Komponenten gesucht und ausgewählt. Im Folgenden wird das Vorgehen erläutert und begründet. Die Rahmenbedingungen sind in Abschnitt 2.8.1 festgelegt worden. Wie in Kapitel 3 beschrieben, ist der Parkiermechanismus sowie die Lamellenbewegung nicht mehr umsetzbar gewesen. Die benötigten elektronischen Komponenten sind dennoch evaluiert worden. Des Weiteren hat ein Systemkurzschluss während der Endphase des Projektes beide Rechner irreparabel beschädigt. Neben dem beschriebenen Ersatz gewisser Komponenten, ist in der Folge das gesamte System mit einem neuen Erungskonzept versehen worden.

4.1 Signalverarbeitung

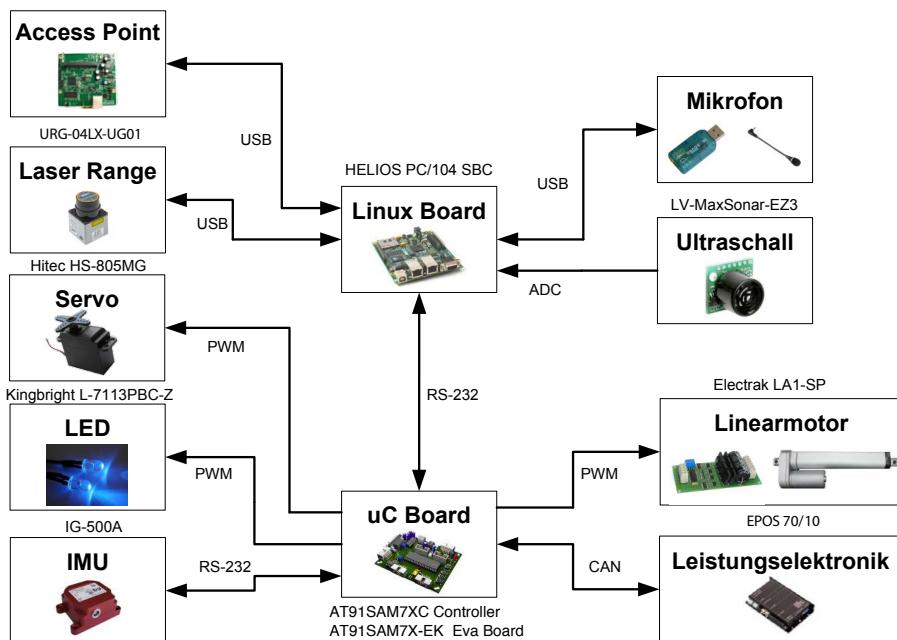


Abbildung 4.1: Schaltbild des Systems

Alle Sensoren liefern Signale, die es zu verarbeiten gilt. Diese Signalverarbeitung wird, zusammen mit der Systemüberwachung, von einer zentralen Recheneinheit übernommen. Zur Stabilisierung des Ballbots werden vorwiegend Daten der IMU und der Winkelencoder verwendet. Die Verarbeitung der Signale dieses Regelkreises hat höchste Priorität, da ein Fehler oder Ausfall sofort zum Versagen des Systems führt.

Für die weiteren Aufgaben wie Objekterkennung, Kollisionsverhinderung und Orientierung werden die Interaktionssensoren, konkret Laserdistanzsensor, Ultraschallsensoren und Mikrofone, eingesetzt. Die Verarbeitung dieser Daten ist sekundär und benötigt mehr Rechenkapazität.

Die zum Einsatz kommenden Recheneinheit soll die folgenden Ansprüche erfüllen:

- kleine Dimensionen (Platzlimite im Ballbot)
- leicht (Gewicht minimieren → bessere Dynamik)
- ausbaufähig, erweiterbar
- schnell (dynamische, leistungsfähige Regelung und Verarbeitung der Daten des Laserdistanzsensors)
- benötigte Schnittstellen aufweisen (Bedienung der verschiedenen Sensoren und Motoren)
- Kommunikationsschnittstellen (CAN, RS232, USB)
- sparsam (geringer Verbrauch der Akkuleistung)
- geringe Kosten
- Benutzerfreundlichkeit (schnelles Einarbeiten möglich)

Es bietet sich die Möglichkeit, entweder einen Mikrocontroller oder ein Linuxboard einzusetzen. Beim alleinigen Einsatz eines Mikrocontrollers stellt sich das Problem, dass ein erheblicher Programmieraufwand geleistet werden muss, um den Laserdistanzsensor zu implementieren. Auch die Ausbaufähigkeit ist sehr begrenzt. Falls jedoch nur ein Linuxboard eingesetzt wird, ist die Rechenleistung für eine dynamische Regelung des Systems nicht ausreichend. Da immer konsequent zwischen Stabilisierung und Interaktion unterschieden worden ist, liegt die Auf trennung der entsprechenden Datenverarbeitung nahe. Die Stabilisierungsaufgabe könnte durch einen echtzeitfähigen Mikrocontroller übernommen werden, diejenige der Kommunikation und Interaktion von einem Linuxboard. Der folgende Abschnitt prüft dieses Konzept.

Konzept Kombination Mikrocontroller und Linuxboard

Die gekoppelte Verwendung der beiden Recheneinheiten bietet attraktive Eigenschaften, die eine optimale Funktionalität des Systems gewährleisten. Einerseits können die verschiedenen Anforderungen der Komponenten besser berücksichtigt werden, andererseits erfolgt eine gegenseitige Entlastung und die Vermeidung eines Kapazitätsengpasses in kritischen Situationen. Nachstehend sind einige Vor- und Nachteile aufgezählt:

- + Rechengeschwindigkeit ermöglicht dynamische Regelung
- + Komplexe Algorithmen verarbeitbar
- + Kollisionserkennung mittels Laserdistanzsensor gut lösbar
- + zahlreiche Inputs und Outputs
- + CAN vorhanden (Controller für verwendete Maxon Motoren)
- + PWM-Output (ermöglicht ein Pulsieren der LEDs)
- + Erweiterungsfähigkeit (z.B. für die Interaktion zwischen Ballbot und Mensch)
- hohe Kosten für die Kombination
- Schnittstelle und Protokoll zwischen Mikrocontroller und Linuxboard muss eingerichtet werden
- Bauraum und Gewicht

Aufgrund der überwiegenden Vorteile hat sich das Team für dieses Konzept entschieden. Der Mikrocontroller wird die Datenverarbeitung der Aktoren und der IMU bewältigen, da bei der Stabilisierungsaufgabe vor allem Rechengeschwindigkeit gefragt ist. Zusätzlich werden die LEDs über den Mikrocontroller angesteuert. Das Linuxboard kümmert sich um die Signale des Laserdistanzsensors, die Ultraschallsensoren, die Mikrofone und die externe Kommunikation. Da das Linuxboard, wie der Name andeutet, mit einem Betriebssystem ausgerüstet ist, werden sich viele Aufgaben im Blick auf Treiber und Schnittstellen besser lösen lassen, als dies mit einem Mikrocontroller der Fall wäre. Die Kommunikation zwischen den beiden Recheneinheiten erfolgt über eine serielle Schnittstelle mittels RS-232-Protokoll. Auf diese Weise können aufgezeichnete Messdaten und Sollwerte ausgetauscht werden. Die Evaluation der beiden Computer findet sich in den Abschnitten 4.3.4 und 4.3.5.

4.2 Energieversorgung

Alle elektrischen Systemkomponenten müssen mit Energie versorgt werden, jedoch werden verschiedene Eingangsspannungen verlangt. Ausserdem gilt es Massnahmen zur Notabschaltung des System einzuplanen, die entweder automatisch oder durch menschliches Eingreifen ausgelöst werden können. Dazu ist das in Abbildung 4.2 dargestellte Energieversorgungskonzept ausgearbeitet worden.

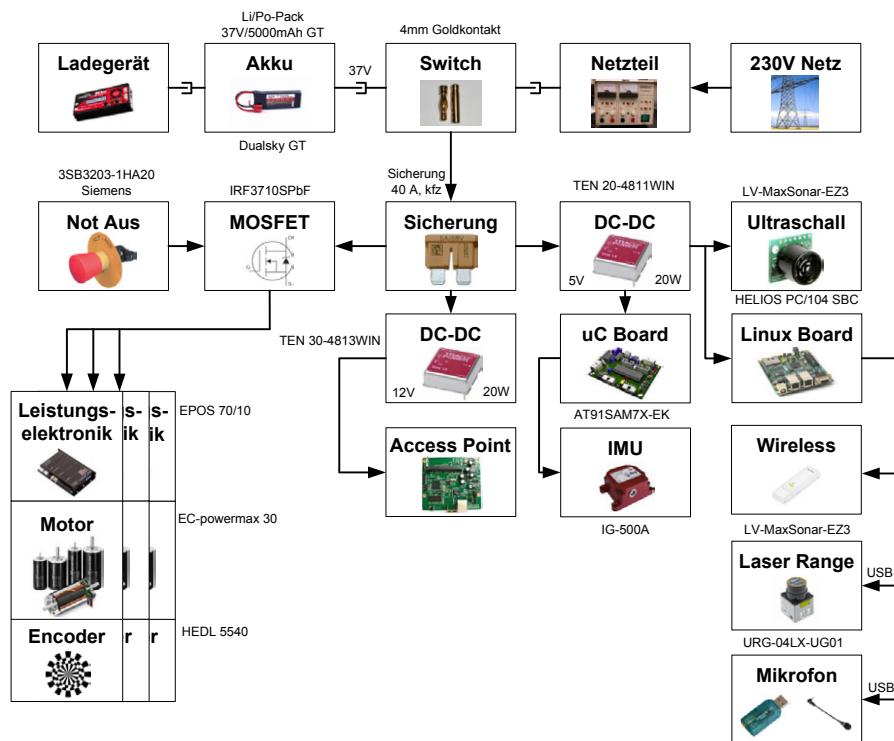


Abbildung 4.2: Übersicht der Energieversorgung

Die Bereitstellung der Energie wird über einen Lithium-Polymer-Akku sichergestellt. In der Entwicklungsphase soll es zudem möglich sein, den Ballbot zusätzlich über ein Netzgerät zu betreiben. Die höchste Spannung, die vom Akku geliefert werden kann, wird für die Motoren und deren Leistungselektronik gebraucht. Um sicherzustellen, dass im Notfall die Motoren gestoppt werden können, so dass das System und seine Umgebung nicht beschädigt werden, ist der Einbau eines Notausschalters eingeplant worden.

Durch zwei DC/DC Wandler wird die Akkuspannung auf 12 V für den Access-Point bzw. auf 5 V für die Recheneinheiten und die IMU reduziert.

4.3 Evaluation der elektronischen Komponenten

Um das komplexe System des Ballbots in seinem vollen Potential ausschöpfen zu können, wird eine breite Palette von elektronischen Komponenten benötigt. Die Auswahl dieser Elemente ist mittels des morphologischen Kas- tens im Abschnitt 2.6 und einer anschliessenden Bewertungstabelle erfolgt. Die detaillierte Evaluation und darauffolgende Auswahl wird in den folgenden Abschnitten für alle benötigten elektronischen Bauteile erläutert.

4.3.1 Stabilisierungssensoren

Da die Stabilisierungsaufgabe im Mittelpunkt des Projektes steht, wird auf die Bewältigung dieses Teils besonders viel Wert gelegt. Dabei ist die Zuverlässigkeit der Sensorsignale eine sehr wichtige Eigenschaft. Als Stabilitäts- sensoren kommen (siehe Abschnitt 2.8.3) deshalb eine „Inertial Measurement Unit“ (IMU) in Kombination mit Winkelencodern zum Einsatz. Im Folgenden wird auf die Evaluation dieser Komponenten eingegangen.

IMU

Da die Kernfunktion des Ballbots so fundamental auf den Messungen der IMU aufbaut, muss diese Komponente sehr sorgfältig gewählt werden. Darum werden an die IMU folgende Anforderungen gestellt.

- drei Gyroskope¹
- hochwertiges, schnelles Modell
- Schnittstelle mit Mikrocontroller: USB, CAN oder RS232
- Sensorfilterung und -fusion wird von der IMU übernommen
- keine OEM-Version²
- Magnetometer abschaltbar, wenn vorhanden.

Drei Gyroskope werden benötigt, damit auch eine kontrollierte Drehung um die eigene Achse möglich wird. Moderne Gyros verwenden entweder Glas- fasertechnologie (FOG [7]) oder Ringlaser (RLG [27]) oder basieren auf MEMS³-Technologie und unterscheiden sich bezüglich Preis und Genauigkeit. Nur MEMS-Modelle sind für das Fokusprojekt finanziell tragbar; die Genauigkeit dieser Systeme ist aber absolut ausreichend.

¹Ein Gyroskop ist ein Sensor zur Messung von mechanischer Rotation.

²„Original Equipment Manufacturer“-Version, ohne Schnittstellen und Gehäuse

³„Micro-electrical mechanical System“, siehe [1]

Da die Magnetometer wegen den grossen Ströme der Leistungselektronik höchstwahrscheinlich unbrauchbare Messungen liefern, müssen diese ignoriert werden können.

Bei einem Preis-/Leistungsvergleich sind vier vielversprechende Exemplare gefunden und einander gegenübergestellt⁴ worden. Diese unterscheiden sich in vielen Punkten nur marginal. Messbereiche, zulässige Winkelraten, Sensitivität und Messgenauigkeit der Sensoren sowie der Leistungsverbrauch sind bei allen Geräten nahezu gleich.

Die wichtigsten Unterscheidungsmerkmale sind die Ausgaberaten der Sensoren, Masse, Preis und Gewicht sowie die unterstützten Schnittstellen.

Aus dem Vergleich lässt sich erkennen, dass die Ausgaberate der Sensor signale zwischen hundert und tausend Hertz am meisten variiert. Da alle anderen Komponenten, die in den Lagewinkelregelkreis involviert sind, wesentlich höhere Ausgaberaten haben, ist die Datenausgabefrequenz der IMU die kritischste Systemgrösse. So messen beispielsweise Winkelencoder alle mit über einem Kilohertz.

Es muss die minimal benötigte Frequenz der IMU berechnet werden, welche eine Stabilisierung des Systems überhaupt ermöglicht. Für verschiedene Ballbot-Systeme und invertierte Pendel wird die Frequenz der schnellsten instabilen Polstelle berechnet. Diese liegt, trotz konservativer Rechnung, bei nur ca. sechs Hertz. Es handelt sich folglich um ein verhältnismässig langsames System. Grundsätzlich sollte es also mit jeder IMU möglich sein, das System zu stabilisieren.

Ein Blick auf die Frequenzen anderer Ballbots lässt jedoch erkennen, dass eine Regelfrequenz von unter hundert Hertz in der Praxis sehr selten ist[11]. Grundsätzlich gilt, je schneller die Mess- und Regelrate, desto robuster ist das System. Aus diesem Grund soll eine möglichst schnelle IMU verwendet werden.

Die *MTi* von XSens und *IG-500A* von SBG sind die einzigen Modelle, welche alle Anforderungen bezüglich Geschwindigkeit, Magnetometer und Sensorfusion erfüllen. Die Qualität der Sensordaten ist bei beiden Geräten praktisch identisch. Im Gegensatz zur *MTi*, welche mit 120 Hz arbeitet, bietet die *IG-500A* den Vorteil einer höheren Ausgabefrequenz von 166 Hz und zusätzlich die Möglichkeit mit 500 Hz auf die unfusionierten, aber kalibrierten Sensordaten zuzugreifen. Weil die *MTi* für die Notfalllösung einen Windows-basierten Rechner benötigt, fällt die Wahl, trotz positiver Erfahrungen mit

⁴Siehe Anhang A.23 und A.24

der *MTi* an der ETH und des leicht höheren Preises, auf die *IG-500A* von SBG-Systems.

Die *IG-500A* wird mit verschiedenen Sensorkombinationen geliefert. Für die Gyros stehen Messbereiche von $150^\circ/\text{s}$, $300^\circ/\text{s}$ oder $600^\circ/\text{s}$ zur Auswahl, für die Beschleunigungssensoren werden 2 g, 5 g oder 18 g Varianten angeboten. Bei Simulationen von extremen Bewegungen anhand des erstellten Ballbotmodells werden maximale Winkelgeschwindigkeiten von $60^\circ/\text{s}$ und Beschleunigungen von maximal 1,3 g gemessen. Wegen der viel längeren Lieferzeiten für spezielle Kombinationen und der geringen Unterschiede bezüglich Genauigkeit zwischen den verschiedenen Varianten wird die Standardversion mit $300^\circ/\text{s}$ und 5 g Sensoren bestellt. Diese Modell ist mit abschaltbaren und kalibrierbaren Magnetometern ausgestattet und gibt die Messdaten bereits kalmangefiltert in Eulerwinkel oder Quaternionen aus.



Abbildung 4.3: Die Inertial Measurement Unit IG-500A (Foto Team Ballbot)

Winkelencoder

Um den Implementierungsaufwand so gering wie möglich zu halten, sollen die Encoder ebenfalls vom Motorenhersteller⁵ bezogen werden. Maxon bietet digitale Inkrementalencoder, DC-Tachos und Resolver an. Weil DC-Tachos und Resolver ungeeignet für Positionieraufgaben sind oder eine aufwändige Auswertelektronik benötigen, wird ein Inkrementalencoder gewählt. Hier stehen wiederum mehrere Technologien zu Auswahl, aufgrund von Tabelle 4.1 und der benötigten, präzisen Position bei geringen Drehzahlen kommt der optische Encoder *HEDL 5540* zum Einsatz.

⁵Siehe dazu Abschnitt 4.3.3

| Eigenschaft | MR | MEnc | Optisch | MILE |
|------------------------|-----|------|---------|------|
| Line Driver möglich | X | | X | X |
| Indexkanal möglich | X | | X | X |
| präzise Position | | | X | X |
| sehr kleine Drehzahl | | | X | |
| sehr hohe Drehzahl | (X) | X | | X |
| Staub, Schmutz, Öl | X | X | | X |
| ionisierende Strahlung | | X | | |

Tabelle 4.1: Eigenschaften von verschiedenen, digitalen Inkrementalencodern [22]

4.3.2 Interaktionssensoren

Um die Fähigkeiten von Rezero optimal zeigen zu können, ist ein Demonstrationskonzept⁶ entwickelt worden. Die dort genannten Fähigkeiten, wie Wahrnehmung der Umgebung und Interaktion mit ihr, erfordern eine Reihe von Sensoren, die im Folgenden genauer untersucht werden.

Da Rezero seine ganze Umgebung wahrnehmen können soll, sein Sichtfeld also 360° abdecken muss, muss ein Sensor oder eine Sensorkombination gesucht werden, die dieses Kriterium erfüllt. Im Abschnitt 2.8.3 wird erläutert, dass eine dreidimensionale Wahrnehmung nicht zur Diskussion steht.

Laserdistanzsensor

Ein Laserdistanzsensor bietet die Möglichkeit mit einer gewissen Abtastrate einen Bereich, definiert durch planaren Sichtwinkel und Sichtweite, zu erfassen. Es gilt einen Laserdistanzsensor zu finden, welcher einen möglichst grossen Sichtwinkel und eine hohe Sichtweite bietet. Dies bei möglichst hoher Abtastrate, damit eine schnelle Erkennung von Hindernissen gewährleistet ist.

Folgende Kriterien dienen der Beurteilung der Modelle:

- detektierbarer Winkel
- messbare Distanzen
- Grösse und Gewicht
- Winkelauflösung
- Scanzeit

Der Markführer für Laserdistanzsensoren ist die Firma Hokuyo. Vier vielversprechende Modelle dieses Anbieters sind genauer untersucht worden. Im

⁶siehe Abschnitt 2.2.4

Anhang A.12 befindet sich ein ausführlicher Vergleich dieser Modelle. Schnell zeigt sich, dass der maximal detektierbare Winkel bei 240° liegt. Unter den Lösungen mit dieser Eigenschaft findet man eine maximal wahrnehmbare Distanz von 5,6 m. Grösse und Gewicht sprechen zusätzlich für das Modell *URG-04LX-UG01*. Die Scanfrequenz ist beim *UBG-04LX-F01* zwar ungefähr dreimal höher, dafür ist dieses Modell doppelt so teuer wie der *URG-04LX-UG01*. Da der Laserdistanzsensor vorwiegend im langsamen Interaktionsmodus eingesetzt wird, ist eine Abtastzeit von 100 ms/Scan, die der Favorit aufweist, ausreichend. Der Entscheid fällt darum klar für das Modell *URG-04LX-UG01* aus.



Abbildung 4.4: Der verwendete Laserdistanzsensor von Hokuyo (Foto Team Ballbot)

Aufgrund der geringen Höhe des Ballbots schneidet sich die Erfassungsebene des Sensors bereits bei kleinem Neigungswinkel mit dem Untergrund. Die Sichtweite nimmt also während beschleunigten Bewegungen merklich ab. Auf eine kardanische Aufhängung des Sensors oder eine justierbare Spiegeloptik ist wegen der hohen Komplexität verzichtet worden.

Daher muss untersucht werden, wo der Laserdistanzsensor im System optimalerweise platziert wird. Einerseits wird die Sichtweite bei einem geneigten System höher, je weiter oben die Montage erfolgt, andererseits sollen im Ruhezustand (ausbalanciert) auch niedrige Hindernisse, wie z.B. Kleinkinder wahrgenommen werden. Darum wird der Laserdistanzsensor in einer geringen Höhe von ca. siebzig Zentimetern im Hüllenkopf montiert.

Bei hohen Beschleunigungen und demzufolge hohen Neigungswinkeln von bis zu 20° ist die Sichtweite des Laserdistanzsensors in Fahrtrichtung, abhängig vom Neigungswinkel, beschränkt. Mit der Montagehöhe $h = 70$ cm und dem

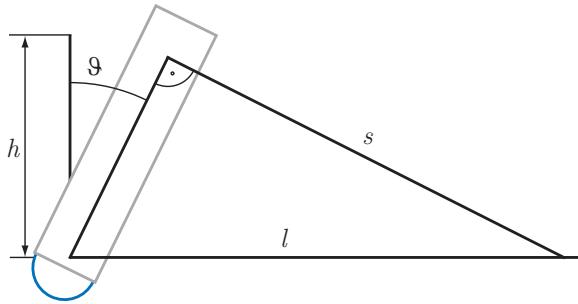


Abbildung 4.5: Sichtweite und Bremsweg des Ballbots

Neigungswinkel ϑ ergibt sich die Sichtweite in Beschleunigungsrichtung zu

$$l = \frac{h}{\sin(\vartheta)} \quad (4.1)$$

wie in Abbildung 4.5 ersichtlich. Bei einer gegebenen konstanten Beschleunigung, also einem maximalen Neigungswinkel, steht immer eine feste Distanz zum vollständigen Abbremsen zur Verfügung, unabhängig von der gefahrenen Geschwindigkeit. Der Roboter soll in Sichtweite noch zum Stillstand kommen können. Es interessiert daher die maximal erlaubte Geschwindigkeit, um bei maximalen Neigungswinkel, innerhalb der Reichweite des Laserdistanzsensors, zum Stillstand zu kommen. Unter der Annahme, dass die Motorenmomente gross genug sind um instantane Winkeländerungen zu ermöglichen, ergibt sich die Bedingung:

$$v_{max} = \frac{g \cdot \tan(\vartheta_{max}) \cdot t}{2} \quad (4.2)$$

Dabei wird der Zusammenhang zwischen Neigungswinkel und Beschleunigung aus Abschnitt 2.5.3 verwendet. Es ist wichtig zu erkennen, dass der Ballbot sich nie mit maximaler Beschleunigung oder Geschwindigkeit fortbewegen kann. Um abbremsen zu können, muss der Schwerpunkt der Kugel den Schwerpunkt des Aufbaus überholen. Dazu ist aber eine Erhöhung der Beschleunigung respektive der Geschwindigkeit nötig.

Die maximale Sichtweite des Laserdistanzsensors beträgt 5,6 m. Mit der Annahme der Montagehöhe von 0,7 m, ergibt sich so ein Neigungswinkel von $7,13^\circ$ und ein maximaler Bremsweg von 5,64 m. Unter der Annahme, dass bei einer Vollbremsung die Neigungswinkeländerung von 0° auf -20° in vernachlässigbar kurzer Zeit stattfindet und der Winkel dann bei -20° gehalten

wird, ergibt sich eine Abbremszeit von 1,78 s und eine maximale Geschwindigkeit von 3,17 m/s.

Schliesslich soll auch der Fall einer Vollbremsung während einer beschleunigten Bewegung untersucht werden. Wenn der Ballbot bei maximaler Beschleunigung eine Neigung von $\vartheta = 20^\circ$ hat und der Laserdistanzsensor somit steil nach unten blickt, hat der Laserdistanzsensor eine Sichtweite von $l = 0,7/\sin(20^\circ) = 2,05$ m. Um jetzt innerhalb dieser zwei Meter abbremsen zu können, muss folgendes gelten

$$v_{max} \cdot t = g \cdot \tan(\vartheta_{max} = 20^\circ) \cdot \frac{t^2}{2} = 2,05 \text{ m} \quad (4.3)$$

Man erhält die kürzest mögliche Abbremszeit $t = 1,07$ s bei maximaler Abbremsung von

$$-a = -g \cdot \tan(\vartheta) = -9,81 \cdot \tan(20) = -3,57 \text{ m/s}^2 \quad (4.4)$$

und daraus die Höchstgeschwindigkeit von $v_{max} = 1,91$ m/s.

Diese Zahlen zeigen die Bewegungsgrenzen des Systems auf, unter der Bedingung, dass nicht erst in unbekanntem Terrain gestoppt und damit ein gewisses Kollisionsrisiko in Kauf genommen werden will. Die Annahme, dass Neigungswinkeländerungen instantan möglich sind, ist dabei unrealistisch. Untersuchungen bei der Entwicklung des Kollisionsvermeidungsalgorithmus' haben allerdings gezeigt, dass solch hohe Beschleunigungen für eine zufriedenstellende Funktionalität nicht nötig sind.

Ultraschallsensoren

Da das System seine ganze Umgebung wahrnehmen soll, der Laserdistanzsensor jedoch nur einen Winkel von 240° abdecken und ein zweites Exemplar aus Kostengründen nicht verwendet werden kann, müssen weitere Sensoren gesucht werden, die diese Lücke von 120° zu schliessen vermögen. Dabei geht es vorrangig um die Möglichkeit, Hindernisse die sich im toten Winkel des Laserdistanzsensors befinden, zu erfassen. Breit gestreute Ultraschallsensoren ermöglichen es, den ungefähren Abstand zu diesem zu bestimmen. Die genaue Ortung kann jedoch nicht vorgenommen werden. Dies ist jedoch nicht schlimm, da sich der Ballbot gegebenenfalls um die eigene Achse drehen kann, bis sich das Hindernis im Erfassungsbereich des Laserdistanzsensors befindet.

Auf der Suche nach Ultraschallsensoren ist das Team allerdings auf das Problem gestossen, dass die meisten Modelle einen engen und konzentrierten Messbereich aufweisen, da dies in vielen Applikationen gefragt ist, für den Ballbot jedoch ein möglichst breites Streufeld verlangt wird.

Zur Bestimmung, welche und wie viele Sensoren für einen vollen Sichtbereich nötig sind, dient folgende Überlegung: Die persönliche Distanz eines Menschen ist nach Siems und Götzner⁷ in einem Kreis mit Radius von 1,5 m um eine Person definiert. Dringt eine fremde Person in diesen Bereich ein, verspürt man einen Drang zur Reaktion. Der Ballbot soll ebenfalls jedes Hindernis in diesem Bereich entdecken, es müssen also so viele Sensoren angebracht werden, dass eine Person in einem Abstand von 1,5 m Entfernung vom Ballbot erkannt wird.

Mit der Silhouettenbreite eines Kindes von circa $s = 30$ cm berechnet sich die minimal benötigte Anzahl Sensoren in Abhängigkeit der Kegelbreite b bei Persönlichkeitsradius $R = 1,5$ m und nicht-einsehbarem Winkel δ in guter Näherung zu

$$\text{Anzahl Sensoren} = \frac{2\pi R\delta}{360(s + b)} \quad (4.5)$$

Nach der Evaluation verschiedener Modelle, hat ein Gespräch mit den Betreuern ergeben, dass am ASL breit streuende Ultraschallsensoren für ein Projekt verwendet werden, die dazu noch eine sehr grosse Reichweite von ca. sechs Meter haben. Diese sind für die gesuchte Anwendung wie geschaffen und können kostenlos verwendet werden. Es handelt sich dabei um die Modelle *LV-MaxSonar-EZ3* von MaxBotix, mit folgenden Spezifikationen:

- Leistungsaufnahme: 2,5–5,5 V
- Detektierbarer Bereich: 0–6,45 m mit einer Auflösung von einem Zoll
- Interface Output Format: PWM, analoge oder serielle digitale Ausgabe
- Detektierfrequenz: 20 Hz
- Operationsfrequenz: 42 kHz

Sie weisen jeweils einen Winkel von ca. 60° auf. Deshalb ist beschlossen worden, zwei Stück in den Ballbot einzubauen. Somit können, im Gegensatz zur Annahme für die obenstehende Formel, auch Hindernisse, die schmäler als 30 cm sind, erkannt werden. In einer ersten Phase ist der PWM-Ausgang mit dem analogen verglichen worden, worauf aufgrund der besseren Qualität der

⁷aus [19], Seite 237

analoge Ausgang mit einem Tiefpass gewählt worden ist. Nach dem Verlust des Linuxboards ist dieses durch einen *fitPC2*⁸ ersetzt worden, der keinen ADC-Eingang mehr aufweist, dafür vier USB-Anschlüsse. Der Sensoroutput erfolgt nun über eine serielle Schnittstelle und wird mittels TTL-Konverter in den USB-Anschluss des *fitPC2* angehängt. Damit ist leider keine getrennte Ansteuerung mehr möglich, wie das beim ADC-Eingang der Fall war.

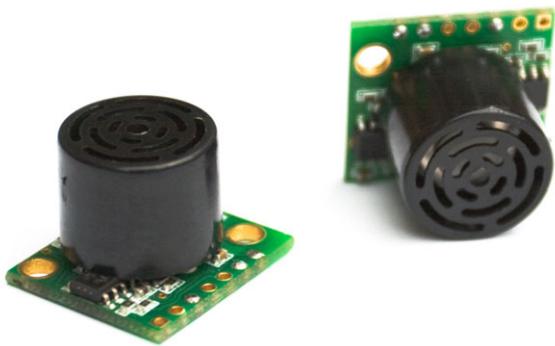


Abbildung 4.6: Die Ultraschallsensoren LV-MaxSonar-EZ3 (Foto Team Ballbot)

Mikrofon

Innerhalb des Demonstrationskonzeptes ist die Idee entwickelt worden, dem Ballbot die Fähigkeit zu verleihen, Geräusche wahrzunehmen. Dazu ist mindestens ein Mikrofon notwendig. Falls die zeitlichen Kapazitäten ausreichen, bietet sich die Möglichkeit, mittels eines zweiten Mikrofons eine Geräuschlokalisierung zu implementieren. Die Wirkung von Rezero würde dadurch natürlich markant verstärkt.

Falls eine Ortung stattfinden soll, müssen qualitativ hochwertige Modelle erstanden werden; für das alleinige Wahrnehmen von Geräuschen reicht ein günstiges Modell.

Für den Anschluss des Mikrofons wurde anfangs eine USB-Soundkarte eingeplant, die am Linuxboard angeschlossen wird. Da das Linuxboard aufgrund technischer Defekte durch den *fitPC2* ersetzt worden ist, könnte nun allerdings auf die Soundkarte verzichtet werden und das Mikrofon direkt an den Audio-/Mikrofoneingang angeschlossen werden.

Aufgrund von Zeit- und Ressourcenknappheit ist jedoch am Ende des Projektes auf die Implementierung verzichtet worden.

⁸vgl. Abschnitt 4.3.5

4.3.3 Antriebsmotoren mit Getriebe

Um die Kugel anzutreiben werden drei Motoren eingesetzt. Die Motoren müssen eine hohe Leistungen liefern, dürfen aber nicht zu viel Platz in Anspruch nehmen. Da am ASL gute Erfahrungen mit Maxon Motoren gemacht worden und sie als zuverlässig und genau gelten, hat das Team beschlossen, auch Maxon Motoren einzusetzen. Um möglichst geeignete Modelle für den Ballbot zu finden, sind folgende Anforderungen gestellt worden:

| | Anforderung |
|------------|-------------------|
| Gewicht | möglichst gering |
| Länge | maximal 140 mm |
| Drehmoment | mindestens 5 Nm |
| Drehzahl | bis ca. 400 U/min |
| Spannung | maximal 37 V |
| Strom | maximal 140 A |

Tabelle 4.2: Anforderungen an die Motoren

Da die Motoren wechselnden Belastungen ausgesetzt sind und sehr genau arbeiten sollen, eignen sich „DC-Brushless“-Motoren, auch EC-Motoren genannt, am besten. Diese bieten unter anderem die Vorteile, dass sie gute Regeleigenschaften und eine hohen Überlastbarkeit für kurze Zeiträume aufweisen.

Nach den Berechnungen, vergleiche dazu den Abschnitt 2.5.3, ergibt sich für einen maximalen Neigungswinkel von 20° ein benötigtes Motorenmoment von 3,5 Nm. Um eine dynamische Bewegung zu erreichen, soll jedoch ein möglichst hohes Moment erzeugt werden können, damit eine schnelle Regelbarkeit gewährleistet ist. Erste Simulationen zeigen, dass mit ca. 5 Nm das gewünschte Verhalten erreicht wird. Nach einem Vergleich von Leistung und Gewicht zwischen allen Maxon Modellen hat sich das Team für die *EC-powermax*-Reihe entschieden. Unter Berücksichtigung der weiteren Kriterien, vorwiegend Grösse und Gewicht, ist versucht worden, das geeignetste Modell dieser Reihe zu finden. Bei diesen Randbedingungen liefert nur der *EC-powermax* 200 W Motor eine genügend hohe Leistung⁹.

Weil die Nenndrehzahl dieses Motor viel zu hoch ist, wird zusätzlich ein Getriebe benötigt. Maxon bietet diese praktischerweise ebenfalls an. Die Wahl des Typs und der Übersetzung wird im Folgenden erläutert.

⁹Berechnungen und ausführlicher Vergleich ist im Anhang A.17 zu finden



Abbildung 4.7: Einer von drei EC-powermax 200 W Motoren (Foto Team Ballbot)

Getriebe

Grundsätzlich stellt sich die Frage, ob ein „Harmonic Drive“-Getriebe¹⁰ verwendet werden soll. Eine genaue Abklärung¹¹ hat aber ergeben, dass sich der zusätzliche Kostenaufwand nicht auszahlen würde.

Es gibt für jeden Motor verschiedene passende Planetengetriebe¹² mit zugehörigen Über- oder Untersetzungen. In diesem Fall werden die Getriebe der Baureihe *GP-42 C* miteinander verglichen. Um das passende Modell auszuwählen, werden die Kennwerte mit unterschiedlichen Untersetzungswertverhältnissen des Getriebes betrachtet.

| Untersetzung (i) | 12 | 15 | 19 | 21 | 26 |
|----------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Nennmoment [Nm] | 1,1 | 1,4 | 1,8 | 1,9 | 2,4 |
| Max. Dauermoment LE [Nm] | 1,7 | 2,3 | 2,7 | 3,0 | 3,7 |
| Max. Moment [Nm] | 4,3 | 5,4 | 6,8 | 7,6 | 9,4 |
| Max. Drehzahl [rpm] | 998,2 | 798,6 | 630,5 | 570,4 | 460,7 |
| Max. Geschwindigkeit [m/s] | 8,9 | 7,1 | 5,6 | 5,1 | 4,1 |

Tabelle 4.3: Ein Vergleich der technischen Spezifikationen mit unterschiedlichen Getrieben

Das wichtigste Kriterium ist das hohe Drehmoment. Dabei muss aber eine Drehzahl von mindestens 400 U/min zur Verfügung stehen. Es ist anhand Tabelle 4.3 leicht ersichtlich, dass das Getriebe mit der Untersetzung 26:1 den Anforderungen am besten gerecht wird.

¹⁰Ein Getriebe mit einem elastischen Übertragungselement, das sich durch hohe Übersetzung, Steifigkeit und Spielfreiheit auszeichnet

¹¹Siehe Anhang A.18

¹²Eine spezielle Bauform eines kompakt bauenden Zahnrad-Getriebes. Charakteristisch sind die drei koaxial angeordneten Wellen.

Leistungselektronik

Um die Motoren zu regeln wird die passende Positioniersteuerung *EPOS 70/10* von Maxon verwendet. Diese kann mit einer Spannung von bis zu siebzig Volt betrieben werden und liefert einen maximalen Dauerstrom von zehn Ampère. Angesteuert wird sie über einen CAN Bus des Mikrocontrollers.

4.3.4 Mikrocontroller

Der Mikrocontroller benötigt eine Reihe von Schnittstellen. Die Daten der IMU werden mittels USB oder RS232 übermittelt. Die Motoren kommunizieren mit CAN¹³ oder RS-232. Um mit dem Linuxboard zu kommunizieren, kann eine USB-, CAN- oder RS-232-Schnittstelle benutzt werden. Mit grosser Wahrscheinlichkeit wird der Mikrocontroller mit Fliesskommazahlen operieren müssen. Deshalb wird eine integrierte „Floating-Point-Unit“ oder, falls ein genügend hoher Systemtakt gegeben ist, ein „Software-Floating-Point“-Operator bevorzugt. Aufgrund bestehender Vorkenntnisse wird eine Atmel AVR-Architektur gewählt. Folgende Prozessoren kommen für einen Einsatz in Frage:

- AT90CAN128 (8-Bit) mit Entwicklungsplatine (Display 3000)
- AT91SAM7X (32-Bit) mit Entwicklungsboard AT91SAM7X-EK
- AT91SAMA3 (32-Bit) mit Entwicklungsboard AT91SAM7A3-EK

Die erste Variante besteht aus einem 8-Bit AVT basierten CMOS-Mikrocontroller mit RISC-Architektur. Der Prozessor verfügt über eine CAN- und zwei USART-Schnittstellen, einen 16 MHz-Systemtakt und 128 kB Flashspeicher.

Das zweite Modell ist ein 32-Bit ARM basierter Mikrocontroller mit RISC-Architektur. Er verfügt über einen CAN-Controller und zwei USART- und eine USB-Schnittstelle, weist einen 18 MHz-Systemtakt auf und verfügt über 256 kB highspeed Flash-SRAM. Der interne Flashspeicher kann via JTAG-ICE-Interface programmiert werden.

Das dritte Exemplar ist ein 32-Bit ARM basierter Mikrocontroller mit RISC-Architektur. Er besitzt zwei CAN-Controller, drei USART- und eine USB-Schnittstelle. Der Systemtakt beträgt 18 MHz; ein schneller Flash-SRAM Speicher von 256 kB ist ebenfalls vorhanden. Der integrierte Flashspeicher

¹³Controller Area Network ist ein asynchrones, serielles Bussystem

kann ebenfalls via JTAG-ICE-Interface programmiert werden.

Da Variante drei die Kriterien am Besten erfüllt, ist dieses Modell ausgewählt worden. Da leider die Lieferfrist aus unbestimmten Gründen im Voraus nicht bestimmbar gewesen ist und da möglichst bald mit der Einarbeitung begonnen werden sollte, ist man auf das Modell *AT91SAM7X* mit Entwicklungsboard *AT91SAM7X-EK* ausgewichen. Dieses Modell hat sich während der Testphase als zuverlässig erwiesen. Ein starker Nachteil ist jedoch der Fakt, dass Floating-Point Operationen emuliert werden und nicht hardwarebasiert erfolgen. Darum benötigen diese Rechnungen besonders viel Zeit und es muss auf grosse Rechnungen verzichtet werden. Faktisch bedeutet das, dass die verschiedenen Regler ohne Probleme funktionieren. Sobald aber eine umfänglichere Funktion, wie z.B. ein Kalmanfilter dazukommen, bewältigt das Board den Rechenaufwand nicht in der zur Verfügung stehenden Zeit. Eine Fixpoint-Umrechnung zu Integers kann dem Abhilfe leisten.

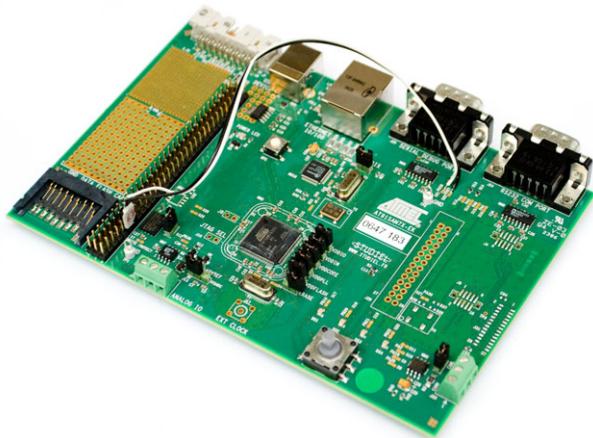


Abbildung 4.8: Entwicklungsboard AT91SAM7X-EK mit Atmel Mikrocontroller (Foto Team Ballbot)

4.3.5 Linuxboards

Wie beim Mikrocontroller sollen auch beim Linuxboard die benötigten Schnittstellen für die Kommunikation mit den Sensoren verfügbar sein. Benötigt werden folgende Kommunikationsmöglichkeiten:

- Laserdistanzsensor und Mikrofon über USB
- Kommunikation mit Low-Level-Controller über RS232
- Ultraschallsensoren über Analog- oder Digital-IO
- externen Steuergerät über WLAN/Bluetooth

Heliosboard

In Absprache mit den Betreuern hat sich das Team für das *Helios* Linux-board mit dem Entwicklungskit *HLV800-256AV SBC* entschieden, da dieses alle genannten Kriterien erfüllt. Zusätzlich bietet dieses Modell den Vorteil, dass auf vorhandenes Wissen an der ETH zugegriffen werden kann. Das Entwicklungskit ist mit einem vorinstallierten Linux-Betriebssystem ausgestattet und bietet somit eine angenehmere Handhabung der zu implementierenden Algorithmen, als dies ohne Betriebssystem der Fall wäre. Ein Systemtakt von 800 MHz ist für die Erfüllung der gestellten Aufgaben ausreichend. Weiterer Vorteil ist die äusserst geringe Baugrösse im Format PC/104 sowie der niedrige Energieverbrauch.

Einige Details des gewählten Boards, hergestellt von *Diamond-Systems*, sind in untenstehender Tabelle 4.4 aufgelistet.

| | Octavio-HLV |
|-------------------------|------------------------------------|
| Prozessor | 800 MHz Vortex86DX |
| Arbeitsspeicher | 256 MB DRAM |
| Speicherkapazität | 128 MB oder 1 GB IDE Flashspeicher |
| USB Schnittstellen | 4 x USB 2.0 |
| Serielle Schnittstellen | 2 x RS232 |
| Eingangsleistung | 5 V DC $\pm 5\%$ @ 5 W maximal |
| Arbeitstemperatur | -40°C bis +85°C |
| Unterstützte Systeme | Linux 2.6 oder Windows CE 6.0 |
| Gewicht | 810,8 g |

Tabelle 4.4: Spezifikation des Helios Boards

fitPC

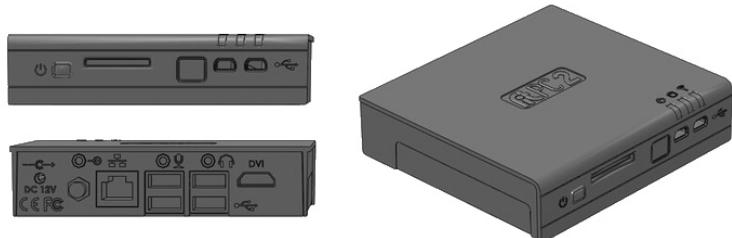


Abbildung 4.9: Der eingesetzte fitPC2 [18]

Im Projektverlauf hat der Helios Single Board Computer (kurz: SBC) einen Defekt erlitten. Aufgrund von Zeitknappheit und den gemachten Erfahrun-

gen hat sich gezeigt, dass ein kompakter, schnell verfügbarer Ersatz in einer vergleichbaren Grösse (PC/104) gesucht werden muss. Die Kompilierung eines Helios-spezifischen Linuxkernels hat ausserdem viel Zeit in Anspruch genommen. Daher sollte der Ersatzrechner direkt mit Ubuntu arbeiten können und möglichst alle verwendeten Schnittstellen aufweisen.

Auf spezifische Hardware, die einen speziellen Kernel bzw. besondere Treiber benötigt, soll aufgrund von Zeitmangel verzichtet werden. Daher kommen vor allem konventionelle Single Board Computer bzw. Mainboards in Frage. Hier bieten sich vor allem die Formate Mini-, Nano- oder Pico-ATX an. Während Mini-ATX deutlich grösser und schwerer als das Helios Board ist, sind Pico-ATX Boards fast identisch in Grösse und Gewicht. Allerdings ist dieser Standard sehr jung und es existieren sehr wenige Boards.

In der intensiven Ersatzsuche ist ein Single Board Computer namens *fitPC2* gefunden worden, der bis auf den A-D-Wandler alle benötigten Schnittstellen zur Verfügung stellt. Da dieser für den Endkundenmarkt sowie auch für private Anwendungen gedacht ist, wird er mit einem vorinstalliertem Betriebssystem geliefert. Zur Auswahl stehen Windows sowie das vom Team benötigte Ubuntu. Des weiteren stellt der Hersteller Software Paketquellen zur Verfügung, die Treiber- und Softwarewartung vereinfachen. Er weist mit einem Intel Atom 1,6 GHz Prozessor eine genügend hohe Leistung bei geringer Grösse und angemessenem Leistungsverbrauch von maximal acht Watt auf. Des weiteren ist er, im Gegensatz zu konventionellen Single Board Computern vollständig passiv gekühlt. Neben einer Ethernet Schnittstelle stehen sechs USB-Anschlüsse zur Verfügung. Die fehlende serielle Schnittstelle kann durch einen USB-zu-Seriell-Adapter ersetzt werden. Interessant ist auch, dass der *fitPC2* bereits ein Wirelessmodul integriert hat. Da dies allerdings eine deutlich niedrigere Sendeleistung als der Access-Point besitzt, wird diese nicht verwendet und, um den Energieverbrauch zu senken, deaktiviert. Des weiteren ist im *fitPC2* eine 160 GB Festplatte verbaut. Sollten sich Stösse als kritisch erweisen, kann alternativ von einer SD-Karte gebootet werden oder die Festplatte durch einen SSD-Speicher ersetzt werden. Geliefert wird der *fitPC2* mit Gehäuse, wodurch er besser geschützt ist als das Heliosboard. Dieses lässt sich über einen Bajonett-Verschluss äusserst leicht (de-)montieren. Im Nachhinein konnte durch RISC (Rosenberg Information Systems Consulting), dem Importeur des *fitPC2s*, beim Hersteller CompuLab aus Haifa ein Sponsoring gewonnen werden. So steht der *fitPC2* dem Team kostenfrei zur Verfügung.

| | fitPC2 |
|-------------------------|---------------------------------|
| Prozessor | 1,6 GHz Intel Atom |
| Arbeitsspeicher | 1 GB DDR-RAM |
| Speicherkapazität | 160 GB Festplatte (2,5 Zoll) |
| USB Schnittstellen | 6 x USB 2.0 (davon 2 Mini-USB) |
| Sonstige Schnittstellen | WLAN (integriert), Infrarot |
| Eingangsleistung | 12 V DC $\pm 5\%$ @ 8 W maximum |
| Arbeitstemperatur | 0°C bis +45°C |
| Unterstützte Systeme | Windows XP oder Ubuntu 9.10 |
| Gewicht | 370 g |

Tabelle 4.5: Spezifikation des fitPCs

4.3.6 Akkumulator

Ein sehr wichtiges Element ist der Akku, der es dem System ermöglicht, sich frei zu bewegen. Zwei Kriterien sind besonders kritisch: die lange Laufzeit und das Gewicht. Natürlich wünscht man sich einen möglichst langen, kabellosen Betrieb, jedoch darf die damit verbundene Gewichtsbelastung das System nicht überstrapazieren. Einige, gängige, zur Auswahl stehende Speichertypen sind folgende:

- LiPo (Lithium-Polymer-Akku)
- Lilon (Lithium-Ionen-Akku)
- BleiGel (Blei-Akku)
- NiMH (Nickel-Metallhydrid-Akku)
- NiCd (Nickel-Cadmium-Akku)
- LiS (Lithium-Schwefel-Akku)

Da der Ballbot ein hohes Leistungspotential aufweisen soll, besteht das Risiko, dass einige Komponenten über kurze Zeiträume sehr viel Strom beziehen, wodurch die Akkuleistung stark beeinträchtigt wird. Trotzdem muss die Versorgung aller Komponenten gewährleistet sein. Aus diesem Grund wird ein Akku mit möglichst hoher Energie- und Leistungsdichte angestrebt. Im Vergleich der Komponenten scheiden aufgrund dieses Kriteriums die Typen BleiGel, NiCd und NiMH aus.

Die grösste Energiedichte wird vom LiS-Akku geliefert. Da diese Technologie aber noch in Entwicklung und wenig verbreitet ist, wird sie vorerst nicht berücksichtigt. Jedoch besteht durchaus die Möglichkeit, zukünftig auf eine Neuentwicklung umzustellen.

Weiter betrachtet werden folglich LiPo- und Lilon-Akkus, wobei die LiPo-Technologie gemäss aktuellen Erkenntnissen eine höhere Energiedichte aufweist. Diese Ionenakkus werden vorwiegend in portablen Geräten mit kleinen Dimensionen und langen Betriebszeiten eingesetzt. Darum und aufgrund des kurzfristigen hohen Leistungsbezuges ist dieser Speichertyp für ein System wie den Ballbot ungeeignet. Nachfolgend werden einige Vor- und Nachteile eines Lithium-Polymer Akkus aufgezeigt:

- + Hohe Leistungs- und Energiedichte
- + Grosser Dauerentladestrom
- + Markt bietet fertige Akkupacks an
- + geringer Memoryeffekt (Kapazitätsverlust bei häufiger Teilentladung)
 - teures Produkt und spezielles Ladegerät benötigt
 - Risiko der Zerstörung und Explosion bei falschem Umgang
 - Ladeströme sind niedrig, d.h. verhältnismässig lange Aufladezeit

Der Produktpreis liegt im prognostizierten Budgetrahmen und ist daher tragbar. Das benötigte Ladegerät wird durch das Institut bereitgestellt. Unter Beachtung der Betriebsanleitung des Akkus kann eine fachgerechte Behandlung ermöglicht und Schäden für die Umgebung verhindert werden. Die lange Aufladezeit muss in Kauf genommen werden. Durch eine vorausplanende Organisation können Wartezeiten weitgehend vermieden werden.

In den Tabellen 4.6 und 4.7 werden die Leistungsaufnahme und die Effizienz der Komponenten dargestellt, woraus sich die Akkulaufzeit berechnen lässt. Dafür werden die durchschnittlichen Leistungsaufnahmen der einzelnen Komponenten betrachtet. Dabei spielen die Motoren eindeutig die Hauptrolle, da sie mit ihrer Leistungsaufnahme alle anderen Komponenten klar dominieren, wie der Tabelle 4.6 entnommen werden kann. Aufgrund der Dreiecksanordnung befinden durchschnittlich 1,5 Motoren im Eingriff. Somit wird eine Durchschnittsleistung von 300 W gefordert. Aufgrund dieser Zahlen und unter Berücksichtigung der Leistungsaufnahme aller anderen Komponenten lässt sich eine Laufzeit von maximal dreissig Minuten berechnen¹⁴.

Durch den Vergleich verschiedener Alternativen, welche diese Anforderungen erfüllen, findet sich ein geeignetes Modell von Dualsky. Es besteht aus zehn in Serie geschalteten Zellen, die eine totale Klemmenspannung von 37 V liefert und eine Kapazität von 5000 mAh aufweist. Damit aufgrund der kleinen

¹⁴Siehe Anhang A.20

| Komponente | Leistungsaufnahme [W] |
|-----------------------|-----------------------|
| Leistungselektronik | 5 |
| Encoder | 0,5 |
| Hallsensoren | 0,15 |
| Motor | 200 |
| IMU | 0,72 |
| Mikrofon | 0,1 |
| Ultraschallsensor | 0,015 |
| Atmel Mikrocontroller | 3 |
| Linuxboard | 5 |
| Laserdistanzsensor | 2,5 |
| LED-Beleuchtung | 8,1 |
| Bluetoothmodul | 0,2 |

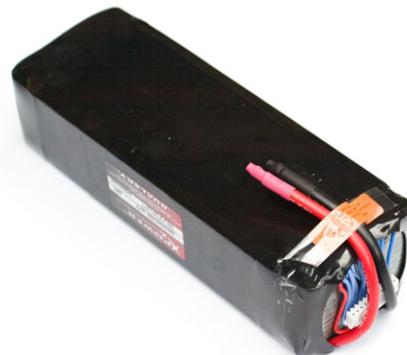
Tabelle 4.6: Leistungsaufnahme der Komponenten

| Komponente | Effizienz [%] |
|---------------------|---------------|
| Leistungselektronik | 93 |
| DC/DC Wandler 15 V | 91 |
| DC/DC Wandler 5 V | 88 |

Tabelle 4.7: Effizienz der Komponenten

Ladeströme keine Wartezeiten für den Akkubetrieb entstehen, werden zwei Exemplare erworben.

Während den zahlreichen Tests sind erstaunliche Laufzeiten von bis zu sechs Stunden pro Akkuladung erreicht wurden. Es ist zu beachten, dass zum Zeitpunkt dieser Evaluation noch kein Access-Point dafür aber eine LED-Beleuchtung vorgesehen gewesen ist. Daher berücksichtigt diese Evaluation den 15 V anstatt den 12 V DC/DC Wandler.

*Abbildung 4.10:* Lithium-Polymer Akkumulator von Dualsky (Foto Team Ballbot)

4.3.7 Motor für den Parkiermechanismus

Bei der Evaluation des Motors für die Parkierbewegung ist der Entscheid relativ schnell auf einen Linearmotor gefallen. Grund dafür war, dass so kein zusätzliches Getriebe benötigt wird, beziehungsweise kein Mechanismus entworfen werden muss, um eine Drehbewegung in eine Linearbewegung zu transformieren. Die Richtlinien für die Evaluation eines solchen Motors sind der Tabelle 4.8 zu entnehmen.

| Eigenschaft | Anforderung |
|---|-------------|
| Richtgrösse für das Gewicht (inkl. Steuerungseinheit) | max. 0,8 kg |
| Hublänge | min. 115 mm |
| Dynamische Last | min. 150 N |
| Spannung | 36 V |
| Geschwindigkeit | min. 20 m/s |
| Potentiometer (für Feedback) | essentiell |

Tabelle 4.8: Richtlinien bei der Evaluation eines Linearmotors

Mit einer Spannung von 36 V besteht der Vorteil, dass der Motor direkt an den Akku angeschlossen werden kann, ohne dass noch ein zusätzlicher DC/DC Wandler benötigt wird. Das Potentiometer wird benötigt um die aktuelle Motorposition zu bestimmen.

Einen Motor mit diesen Anforderungen zu finden, hat sich als schwierige Aufgabe herausgestellt. Vor allem die Einschränkungen bei der Spannung und beim Gewicht lassen nicht viele Lösungen zu. Schlussendlich steht nur ein passender Linearmotor, der die oben erwähnten Anforderungen erfüllt, zur Auswahl: *Electrak SP-36-09A08* von Thomsen Linear¹⁵ (4.11).



Abbildung 4.11: Linearmotor von Thomsen Linear der Electrak SP Serie [17]

Mit der Geschwindigkeitsangabe von ≈ 35 mm/s bei einer Belastung von 200 N folgt, dass der Motor für die benötigte Distanz von 115 mm zum Anheben der Verschalung nur 3,3 s braucht.

¹⁵siehe Anhang A.10

4.3.8 Motor für die Lamellenbewegung

Bevor ein Motor für den Mechanismus der Lamellenbewegung ausgewählt und evaluiert werden kann, muss die Kraft bestimmt werden, die benötigt wird, um die Lamellen zu beugen, sowie den Stoff zu dehnen. Dazu sind verschiedenste Messungen [14] durchgeführt worden. Schlussendlich werden folgende zwei Kräfte angenommen:

$$F_{\text{Lamellen}} \cong 70 \text{ N} \quad F_{\text{Stoff}} \cong 80 \text{ N} \quad (4.6)$$

Für die gesamte Kraft F_{tot} kann natürlich das Gewicht der Verschalung oberhalb der Lamellen wieder abgezogen werden.

$$m_{\text{Oberteil}} \cong 1,5 \text{ kg} \quad (4.7)$$

Daraus folgt schliesslich die total benötigte Kraft von

$$F_{\text{tot}} = F_{\text{Lamellen}} + F_{\text{Stoff}} - F_{\text{Oberteil}} = 135 \text{ N} \quad (4.8)$$

Dies würde für einen Linearmotor sprechen, jedoch ergeben sich folgende Nachteile:

- Gewicht und Platz: Linearmotoren sind sehr gross und schwer
- Die Geschwindigkeit bei Linearmotoren ist sehr stark begrenzt
- Die Einschaltdauer ist auf 25% beschränkt.¹⁶

Folglich ist eine Lösung mit einem Linearmotor nicht sinnvoll. Bei allen alternativen Motoren ist eine Rotationsbewegung mit Hilfe eines Mechanismus' in eine Translationsbewegung umzuwandeln. Es bietet sich an, dies mit einem Hebelarm und einer Pendelstütze zu realisieren. Möchte man beim Betrieb eines solchen Motors eine optimale Momentübertragung erzielen, ist zudem ein Getriebe nötig. Das einfachste ist die Verwendung von Modellbauservos, welche bereits ein Getriebe und sogar eine kleine Steuerungseinheit eingebaut haben, wodurch die gewünschte Position mithilfe eines PWM¹⁷-Signals exakt angefahren werden kann. Jedoch sind die maximalen Momente von Modellbauservos nicht sehr gross. Um zu überprüfen, ob eine Verwendung dennoch in Frage kommt, muss folglich das nötige Moment berechnet werden.

¹⁶nach einem Einsatz von 15 s sollte der Motor 45 s ruhen

¹⁷Pulsweiten Modulation

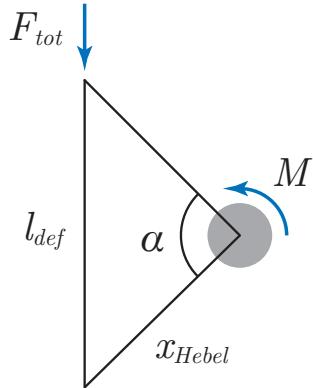


Abbildung 4.12: Berechnung des benötigten Momentes

$$x_{Hebelarm} = \frac{l_{def}}{2 \cdot \sin(\alpha/2)} \quad (4.9)$$

Wie in Abschnitt 3.3.2 beschrieben, ist die nötige Distanz $l_{def} = 40$ mm. Kombiniert man dies mit einem Winkel $\alpha = 90^\circ$, resultiert die folgende Länge:

$$x_{Hebelarm} = \frac{40 \text{ mm}}{2 \cdot \sin(90^\circ/2)} = 28,28 \text{ mm} \cong 30 \text{ mm} \quad (4.10)$$

Mit dieser Länge des Hebelarmes und der berechneten Kraft folgt das Moment, welches vom Motor aufgebracht werden muss:

$$M_{benoetigt} = F_{tot} \cdot x_{Hebelarm} = 4,05 \text{ Nm} \quad (4.11)$$

Servos, welche für eine grosses Moment ausgelegt sind, haben eine Nenngrösse von ungefähr

$$M_{Servo} = 18\text{--}20 \text{ kg/cm} = 1,77\text{--}1,96 \text{ Nm} \quad (4.12)$$

Folglich kann auch bei einer Verwendung von zwei Servos nicht genügend Kraft erzeugt werden, um die Lamellen zu biegen und den Stoff zu dehnen. Aus diversen Gründen [14] ist entschieden worden, trotzdem zwei Servos zu verwenden, diese aber mit zwei Zugfedern zu unterstützen. Die zwei Zugfedern werden so dimensioniert, dass das Kräftegleichgewicht ohne Einsatz der beiden Servos genau in der Mitte, also bei einer Auslenkung

von zwanzig Millimetern, liegt. Somit variiert die benötigte Kraft der beiden Servos nur noch zwischen -75 N und $+80 \text{ N}$ (siehe Tabelle 4.9).

| d | F_{Oberteil} | F_{Feder} | $F_{\text{Lamellen-Stoff}}$ | F_{Servos} |
|-------|-----------------------|--------------------|-----------------------------|---------------------|
| 0 mm | 15 N | 60 N | 0 N | -75 N |
| 20 mm | 15 N | 50 N | $\approx 80 \text{ N}$ | 15 N |
| 40 mm | 15 N | 40 N | 135 N | 80 N |

Tabelle 4.9: Kräftevergleich an verschiedenen Positionen

Die Visualisierung dieser Kräfte kann Abbildung 4.13 entnommen werden.

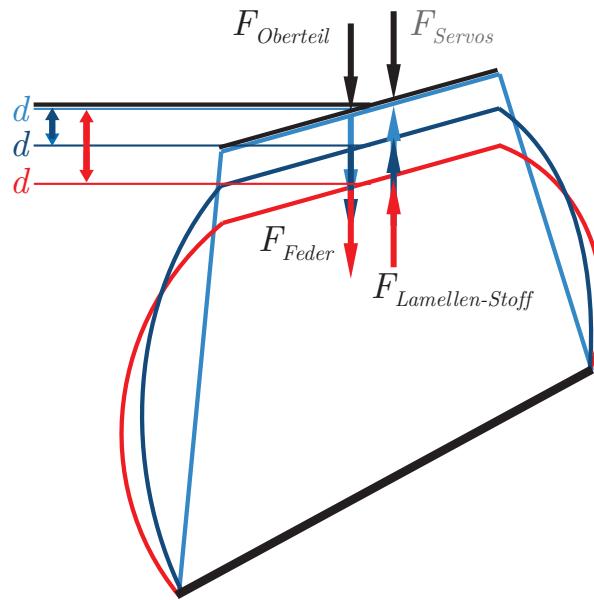


Abbildung 4.13: Kräftegleichgewicht mit Feder

Somit ist eine Realisierung mit zwei Modellbauservos möglich. Es werden zwei *HITEC HS-805MG* Servos mit einem sehr grossen Moment von $1,94 \text{ Nm}$ eingesetzt.¹⁸ Folglich resultiert folgender Sicherheitsfaktor:

$$F_{\text{Servos}} = \frac{2 \cdot M_{\text{Servos}}}{x_{\text{Hebelarm}}} = 129,3 \text{ N} \quad SF = \frac{120 \text{ N}}{80 \text{ N}} = 1,6 \quad (4.13)$$

¹⁸siehe Anhang A.11

4.3.9 Weitere Komponenten

Notaus-Schalter

Um ausreichende Sicherheit für System und Umgebung zu garantieren, muss die Möglichkeit bestehen, den Stromkreis der Motoren zu unterbrechen, damit ein Stillstand des System erfolgt. Da Ströme bis zu zehn Ampère auftreten, muss auch der Schalter für diese Grösse dimensioniert werden. Die meisten Notaus-Schalter sind für Spannungen von 230 V, aber dementsprechend kleine Nennströme ausgelegt. Aus diesem Grund wird als MOSFET¹⁹ ein *IRF3710SPbF* verwendet, der einen maximalen „Drain-Source“-Strom²⁰ von 57 A aufweist.

Später ist das Notauskonzept leicht modifiziert worden, anstatt der Motorströme wird nur noch die Energiezufuhr des EPOS unterbrochen, was den Einsatz von weniger leistungsfähigen Schaltern ermöglicht.

Sicherung

Um den Schutz der Komponenten zu gewährleisten, wird eine Kfz-Schmelzsicherung mit einem Nennstrom von vierzig Ampère in den Hauptstromkreis eingebaut. Sie weist einen kleinen Innenwiderstand und damit wenig Verlustleistung auf. Im Schmelzfall, d.h. bei Eintreten zu hoher Ströme, unterbricht sie alle Stromkreise. Dadurch wird verhindert, dass z.B. der Mikrocontroller einen Kurzschluss verursachen sollte, der Stromkreis der Motoren unterbrochen wird und diese somit nicht unkontrolliert weiterlaufen.

DC/DC Wandler

Als Wandler werden ein *TEN 30-4812WI* und ein *TEN 20-4811WI* verwendet. Diese Modelle stellen Spannungen von 12 V und 5 V zur Verfügung, mit sehr hohen Wirkungsgraden von 87%, respektive 88%. Die Eingangsspannungsbereiche betragen 18–75 V.

LEDs

Aus Zeitgründen ist auf die Beleuchtung des Ballbots verzichtet worden. Diese hätte aus einer Parallelschaltung von jeweils vier in Serie geschalteten Dioden bestanden. Über einen MOSFET ist es möglich, die LEDs zu dimmen.

¹⁹Metall-Oxid-Halbleiter-Feldeffekttransistor

²⁰Strom zwischen Eingangs- und Ausgangsstrom des Schalters



Abbildung 4.14: Der 5 V DC/DC Wandler TEN 20-4811WI (Foto Team Ballbot)

Die Ansteuerung des MOSFET selbst erfolgt über einen PWM²¹-Ausgang des Mikrocontrollers.

Externe Kommunikation

Damit das System durch eine Steuerung angesprochen und kontrolliert werden kann, wird ein Kommunikationsinterface und -kanal benötigt.

Im morphologischen Kasten ist aus den vielfältigen Möglichkeiten die Bluetoothsteuerung als Favorit ausgewählt worden, da dessen Reichweite genügend gross ist und es sich dabei um eine gängige Technologie handelt.

Da letztendlich die Steuerungs- und Datenaufzeichnungsmethoden während des Verlaufs des Projekts deutlich erweitert worden sind, wird eine höhere Bandbreite benötigt. Da sich die beiden Linuxboards auch ideal über Remote-Konsole (SSH) steuern lassen, eignet sich hier vor allem WLAN.

Anfangs bereiteten im Kernel fehlende Wireless Treiber starke Probleme. So kam zunächst ein USB WLAN Stick zum Einsatz. Obwohl die Treiberprobleme durch eigens kompilierte Kernel gelöst wurden, konnte keine dauerhaft stabile Verbindung aufgebaut werden. Daher kommt nun ein Access-Point zum Einsatz. Dabei handelt es sich um den G-570 von Zyxel. Dieser Access-Point unterstützt die nötigen WLAN-Protokolle und kann via Ethernet ohne zusätzliche Treiber an das Linuxboard angeschlossen werden. Ein positiver Nebeneffekt ist, dass kein weiterer Access-Point aufgestellt werden muss, die Reichweite aber dennoch sehr hoch ist. Je nach Einstellung der Sendeleistung, liegt der Energieverbrauch im Bereich von einem bis acht Watt. Aus Platzgründen ist die Elektronik des Access-Points aus dem Gehäuse entnommen und direkt auf dem Ballbot montiert.

²¹Pulsweitenmodulation

5 Systemmodellierung, Regelung und Simulation

5.1 Überblick

Dieses Kapitel gibt einen Überblick über die Systemmodellierung und Regelung des Ballbots. Die Regelung hat die Aufgabe, das grundsätzlich instabile System zu stabilisieren und vorgegebenen Sollwerten zu folgen. Die Steuerung besteht aus der Erzeugung dieser Sollwerte für den Regler anhand eines manuellen Inputs, Programmsteuerungen oder äusseren Einflüssen. Abbildung 5.1 gibt einen Überblick über die einzelnen Bestandteile der Regelung und Steuerung, wobei die Steuerung in Kapitel 6 diskutiert wird. Dieses Kapitel dient zur Übersicht der Systemmodellierung, Regelung und Simulation, welche in der Bachelorarbeit „Modeling and Control of a Ballbot“ [25] detailliert behandelt werden.

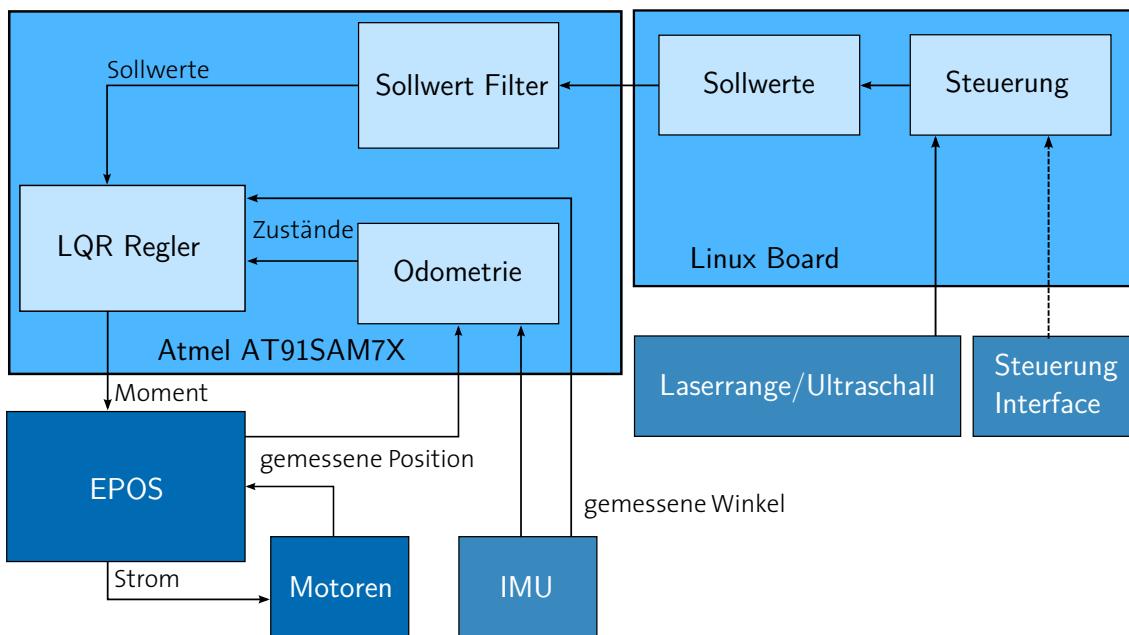


Abbildung 5.1: Übersicht Regelung und Steuerung

Sämtliche, bestehende Ballbots basieren auf einer planaren Systemmodellierung, bauen aber auf verschiedenen Regelstrategien auf. Im Folgenden wird eine Übersicht der verwendeten Regelungskonzepte gegeben:

- Carnegie Mellon Universität (erste Version)
Zustandsregler mit zusätzlichem, inneren PI-Regler für die Drehgeschwindigkeit der Kugel [32]
- Carnegie Mellon Universität (zweite Version)
Kaskadierte Regelschaltung mit innerem PID für die Winkelstabilisierung und äusserem PID für die Positionsregelung [34]
- Tohoku Gakuin Universität
PD-Regler [20]
- Universität Adelaide
Zustandsregler mit zusätzlicher, integraler Wirkung [11]

5.2 Detailkonzept

Da das System „Ballbot“ grundsätzlich instabil ist, ist die Regelung einer der zentralen Punkte, die absolut entscheidend für ein gut funktionierendes System sind. Den Grundstein für die Reglerauslegung, liefert die Systemmodellierung. Bei dieser ist es wichtig, dass die dem System zugrunde liegende Dynamik in einem angemessenen Genauigkeitsgrad erfasst wird.

In einem ersten Schritt wird der Ballbot als zwei unabhängige, planare, invertierte Pendel aufgefasst. Das ist eine erhebliche Vereinfachung, welche die Komplexität der nachfolgenden Rechnungen in einem hohen Massen senkt, um so in relativ kurzer Zeit einen stabilisierenden Regler auslegen zu können. Diese Vereinfachung wird auch bei allen bereits bestehenden Systemen so angewendet und es zeigt sich, dass die Grunddynamik für erste Tests ein einem vernünftigen Massen erfasst wird.

Weil sich dieses Projekt zum Ziel gesetzt hat, die Bewegungsmöglichkeiten des Ballbots auszureißen, ist auch ein verbessertes Regelsystem anzustreben. So wird in einem zweiten Schritt ein genaueres, dreidimensionales Modell erstellt, welches sämtliche Kopplungen der planaren Modelle korrekt erfasst und Umrechnungen von virtuellen Modellen auf das reale System unnötig macht. Anhand des verbesserten Modells wird weiter ein nichtlinearer Regler entworfen, um die erheblichen Nichtlinearitäten des Systems besser zu berücksichtigen.

Die Simulation begleitet alle Systemmodellierungsschritte und bildet die Grundlage für viele Elemente, wie zum Beispiel die Reglerauslegung, Filterdesign sowie die verschiedenen Steuerungskonzepte.

5.3 Planares System

5.3.1 Systemmodellierung

Bei der planaren Systemmodellierung wird der Ballbot als drei entkoppelte, zweidimensionale Subsysteme betrachtet. Zwei davon sind identisch und sind vom Grundaufbau einem invertierten Pendel (yz- und xz-Systeme) ähnlich. Das dritte beschreibt die Rotation um die eigene Achse (xy-System, siehe Abb. 5.2)

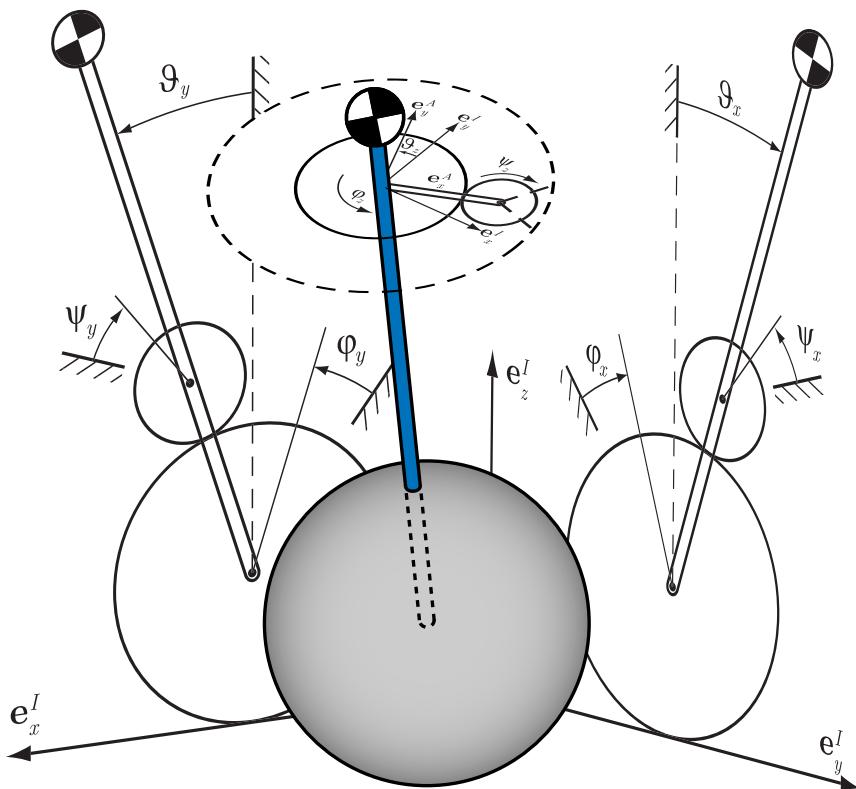


Abbildung 5.2: Aufteilung in drei planare Systeme

Das reale Antriebssystem von Rezero, bestehend aus drei Omnidrehrädern, wird in jedem planaren Modell als ein virtuelles Antriebsrad modelliert. Dies entspricht offensichtlich nicht der realen Anordnung weshalb Umrechnungen nötig sind (siehe Abschnitt 5.3.3).

Annahmen

Zusätzlich zu den bereits beschriebenen, geometrischen Vereinfachungen, werden folgende Annahmen getroffen:

- Das System wird als folgende drei Starrkörper aufgefasst: Kugel (K), Antrieb (Omniwheels und Motoren, W) und Aufbau (A). Dies sind die Körper, welche die Dynamik bestimmen.
- Es wird kein Schlupf modelliert, da dieser durch geeignete Konstruktion zu minimieren versucht wird und es zudem das Modell erheblich komplizierter machen würde.
- Die Reibung wird vernachlässigt.
- Die Motordynamik ist viel schneller als die restliche Dynamik, weshalb sie vernachlässigt wird. Die Leistungselektronik der Motoren übernimmt dessen Regelung.
- Die Feder-Dämpfer-Elemente werden vernachlässigt.
- Die Kugel bewegt sich nur in horizontaler Richtung.
- Die Deformation von Starrkörpern, insbesondere der Kugelbeschichtung, wird vernachlässigt.

Vorgehen

Es wird das Vorgehen nach Lagrange II angewandt, da dieses für Probleme dieser Art besser geeignet ist als die Newton/Euler-Methode. Das Vorgehen ist folgendes:

1. Minimalkoordinaten \vec{q} festlegen
2. Kinetische und potentielle Energien aller Starrkörper bestimmen
3. Nichtpotential Kräfte bestimmen und in Abhängigkeit von den Minimalkoordinaten ausdrücken
4. Lagrange-Gleichung aufstellen und nach $\ddot{\vec{q}}$ auflösen

Die Lagrange-Gleichung lautet:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{\vec{q}}} \right)^T - \left(\frac{\partial T}{\partial \vec{q}} \right)^T + \left(\frac{\partial V}{\partial \vec{q}} \right)^T - \vec{f}_{NP} = 0 \quad (5.1)$$

wobei

$$T = T_K + T_W + T_A$$

$$V = V_K + V_W + V_A$$

Die Berechnung der Bewegungsgleichungen wird für das yz-System, welches mit dem xz-System identisch ist sowie für das xy-System beschrieben.

Parameter

Tabelle 5.1 listet die Parameter der zu modellierenden Systeme auf.

| Beschreibung | Variable |
|--|-----------------|
| Masse Kugel | m_K |
| Masse der Motoren und Omniwheel | m_W |
| Mass des Aufbaus | m_A |
| Radius der Kugel | r_K |
| Radius der Omniwheel | r_W |
| Radius of des Aufbaus (Zylinder) | r_A |
| Abstand Kugelmittelpunkt Massenschwerpunkt Aufbau | l |
| Trägheitsmoment Ball | Θ_K |
| Trägheitsmoment Motoren und Omniwheels | Θ_W |
| Trägheitsmoment Motoren und Omniwheels in xy-Ebene | $\Theta_{W,xy}$ |
| Trägheitsmoment des Aufbaus | Θ_A |
| Trägheitsmoment des Aufbaus in xy-Ebene | $\Theta_{A,xy}$ |
| Gravitationskonstante | g |
| Getriebeuntersetzung | i_{Gear} |
| Omniwheel Kontaktpunktwinkel | α |

Tabelle 5.1: Parameter der planaren Systeme

Koordinaten

Um das System zu beschreiben, werden die Koordinaten, wie in Abbildung 5.2 gezeigt, verwendet. $\vartheta_{x,y,z}$ repräsentieren die Orientierungswinkel des Aufbaus, $\varphi_{x,y,z}$ die Abrollwinkel der Kugel und $\psi_{x,y,z}$ die Winkel der virtuellen Omniwheeldrehung.

Folgende Minimalkoordinaten werden gewählt:

$$\vec{q}_{xy} = \begin{bmatrix} \varphi_z \\ \vartheta_z \end{bmatrix} \quad \vec{q}_{yz} = \begin{bmatrix} \varphi_x \\ \vartheta_x \end{bmatrix} \quad \vec{q}_{xz} = \begin{bmatrix} \varphi_y \\ \vartheta_y \end{bmatrix} \quad (5.2)$$

Der Winkel des Antriebes kann dann in Abhängigkeit von den anderen geschrieben werden:

$$\dot{\psi}_x = \frac{r_K}{r_W}(\dot{\varphi}_x - \dot{\vartheta}_x) - \dot{\vartheta}_x \quad (5.3)$$

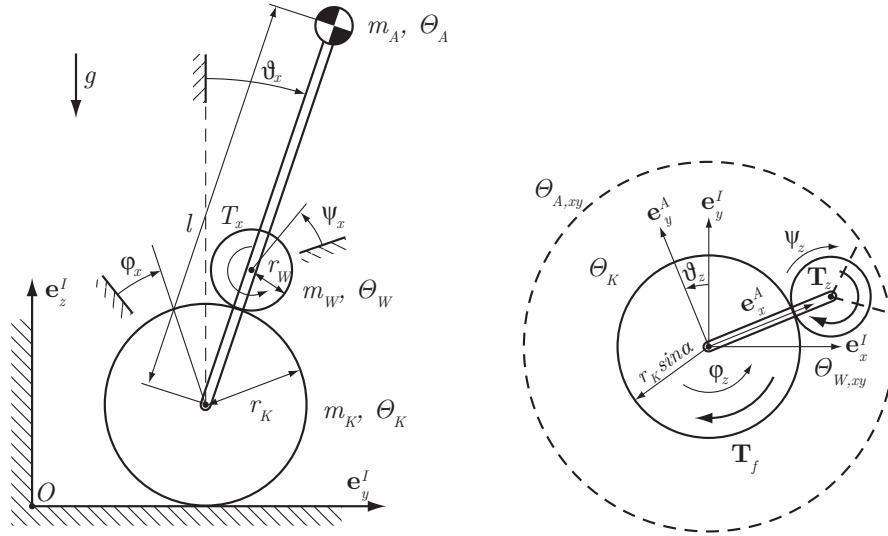


Tabelle 5.2: Skizze der planaren Modelle, Abbildung von Parametern und Koordinaten

Bindungsgleichungen

Alle Koordinaten können als Funktion der Minimalkoordinaten ausgedrückt werden, was nötig ist, um die Bewegungsgleichungen herzuleiten.

Die Position der Kugel, des Omnidrives sowie des Aufbaus können mit Hilfe der Abrollbedingung folgendermassen geschrieben werden:

$$x_K = \varphi_x r_K \quad (5.4)$$

$$x_W = \varphi_x r_K + \sin \vartheta_x \cdot (r_K + r_W) \quad (5.5)$$

$$x_A = \varphi_x r_K + \sin \vartheta_x \cdot l \quad (5.6)$$

Analog gilt dies für die y-Koordinaten.

Für die Rotation der virtuellen Antriebsräder werden folgende Bindungsgleichungen aufgestellt:

$$\dot{\psi}_x = \frac{r_K}{r_W} (\dot{\varphi}_x - \dot{\vartheta}_x) - \dot{\vartheta}_x \quad (5.7)$$

$$\dot{\psi}_y = \frac{r_K}{r_W} (\dot{\varphi}_y - \dot{\vartheta}_y) - \dot{\vartheta}_y \quad (5.8)$$

$$\dot{\psi}_z = \frac{r_K}{r_W} \cdot \sin \alpha \cdot (\dot{\varphi}_z - \dot{\vartheta}_z) \quad (5.9)$$

Bindungskräfte

Um Bauteile für die dynamischen Kräfte auszulegen, werden mit Hilfe der Newton/Euler-Methode die Bindungskräfte des Systems berechnet (siehe

Abb. 5.3). Für die detaillierten Berechnungen und Lösungen, sei auf [25] bzw. den Anhang A.13 verwiesen.

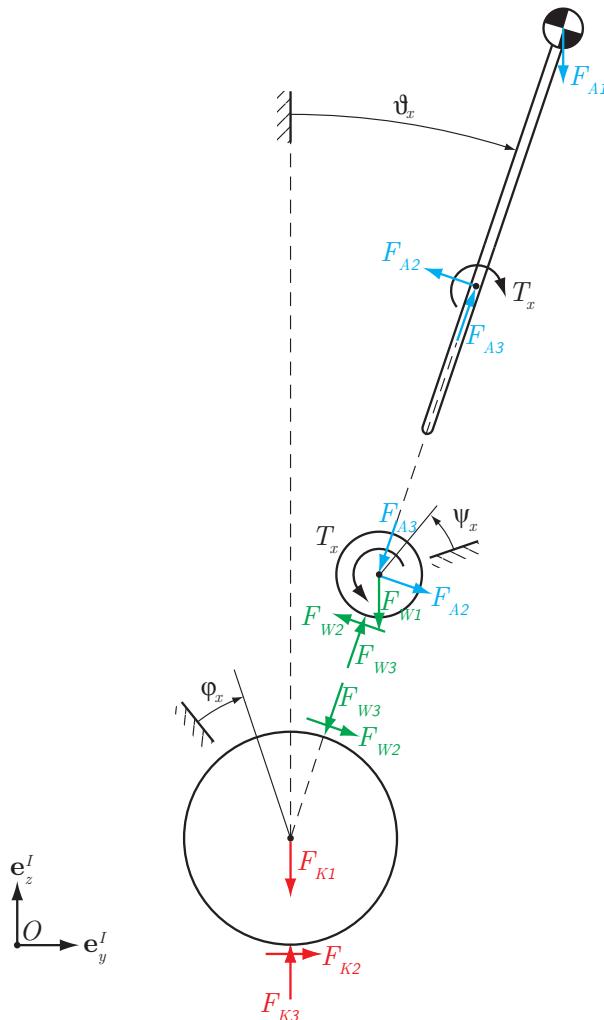


Abbildung 5.3: Visualisierung der inneren Kräfte

Energien

Die Berechnungen der Energien, der Bewegungsgleichungen und der Reglerauslegung wird im Folgenden beispielhaft am yz-System diskutiert.

Die kinetische Energie der Kugel in der yz-Ebene besteht aus einem Translations- und einem Rotationsterm (5.10).

$$T_{K,yz} = \underbrace{\frac{1}{2} \cdot m_K \cdot (r_K \cdot \dot{\varphi}_x)^2}_{\text{Translation}} + \underbrace{\frac{1}{2} \cdot \Theta_K \cdot \dot{\varphi}_x^2}_{\text{Rotation}} \quad (5.10)$$

Die Potentielle Energie ist konstant und beeinflusst daher die Dynamik nicht.

$$V_{K,yz} = m_K \cdot g \cdot r_K \quad (5.11)$$

Die kinetische Energie des virtuellen Antriebsrades besteht analog aus einem Translations- und einem Rotationsteil, wobei ein zusätzlicher Kopplungsterm eingeführt werden muss (5.12).

$$\begin{aligned} T_{W,yz} &= \frac{1}{2} m_W \left(\underbrace{(r_K \dot{\varphi}_x)^2}_{\text{Translation}} + \underbrace{2 \cdot (r_K + r_W) \cos \vartheta_x \dot{\vartheta}_x (r_K \dot{\varphi}_x) + (r_K + r_W)^2 \dot{\vartheta}_x^2}_{\text{Kopplung}} \right) \\ &\quad + \underbrace{\frac{1}{2} \Theta_W \left(\frac{r_K}{r_W} (\dot{\varphi}_x - \dot{\vartheta}_x) - \dot{\vartheta}_x \right)^2}_{\text{Rotation}} \end{aligned} \quad (5.12)$$

Die potentielle Energie des Omniwheels ist eine einfache Funktion des Aufbauneigungswinkels ϑ_x .

$$V_{W,yz} = m_W \cdot g (r_K + (r_K + r_W) \cdot \cos \vartheta_x) \quad (5.13)$$

Die Energien des Aufbaus sind wiederum sehr ähnlich zu dem des Antriebsrades:

$$T_{A,yz} = \frac{1}{2} m_A \left((r_K \dot{\varphi}_x)^2 + 2 \cdot l \cos \vartheta_x \dot{\vartheta}_x (r_K \dot{\varphi}_x) + l^2 \dot{\vartheta}_x^2 \right) + \frac{1}{2} \Theta_A \dot{\vartheta}_x^2 \quad (5.14)$$

$$V_{A,yz} = m_A g (r_K + l \cos \vartheta_x) \quad (5.15)$$

Nichtpotentialkräfte

Die Nichtpotentialkräfte \vec{f}_{NP} sind zum Beispiel Reibung oder externe Kräfte, welche auf das System wirken. Im vorliegenden Fall ist dies das Motoren-drehmoment T_x , welches direkt auf die Koordinate ψ_x wirkt. Mit (5.7) kann der Einfluss des Motorenmomentes auf die Minimalkoordinaten beschrieben werden.

$$\vec{f}_{NP,yz} = \begin{bmatrix} \frac{r_K}{r_W} T_x \\ - \left(1 + \frac{r_K}{r_W} \right) T_x \end{bmatrix} \quad (5.16)$$

Bewegungsgleichungen

Wie in Abschnitt beschrieben, können nun die Bewegungsgleichungen hergeleitet werden.

Für das yz-System sieht die Lösung in Matrix-Schreibweise folgendermassen aus:

$$M_x(\vec{q}, \dot{\vec{q}})\ddot{\vec{q}} + C_x(\vec{q}, \dot{\vec{q}}) + G_x(\vec{q}) = f_{NP} \quad (5.17)$$

wobei die Massen und Trägheitsmatrix M_x , Koriolliskräfte C_x und Gravitationskräfte G_x folgendermassen definiert sind:

$$M_x = \begin{bmatrix} m_{tot}r_K^2 + \Theta_K + \left(\frac{r_K}{r_W}\right)^2\Theta_W & -\frac{r_K}{r_W}r_{tot}\Theta_W + \gamma r_K \cos \vartheta_x \\ -\frac{r_K}{r_W}r_{tot}\Theta_W + \gamma r_K \cos \vartheta_x & \frac{r_{tot}^2}{r_W^2}\Theta_W + \Theta_A + m_A l^2 + m_W r_{tot}^2 \end{bmatrix} \quad (5.18)$$

$$C_x = \begin{bmatrix} -r_K \gamma \sin \vartheta_x \dot{\vartheta}_x^2 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (5.19)$$

$$G_x = \begin{bmatrix} 0 \\ -g \sin \vartheta_x \gamma \end{bmatrix} \quad (5.20)$$

Für das System in der xy-Ebene gilt schlussendlich die Bewegungsgleichung (5.22).

$$\ddot{\varphi}_z = -\frac{(r_W^2 \Theta_{A,xy} + r_K^2 \Theta_{W,xy} \sin^2 \alpha) \cdot T_f + r_K r_W \Theta_{A,xy} \sin \alpha \cdot T_z}{r_W^2 \Theta_{A,xy} \Theta_K + r_K^2 (\Theta_{A,xy} + \Theta_K) \Theta_{W,xy} \sin^2 \alpha} \quad (5.21)$$

$$\ddot{\vartheta}_z = -\frac{r_K \sin \alpha (r_K \Theta_{W,xy} \sin \alpha \cdot T_f + r_W \Theta_K \cdot T_z)}{r_W^2 \Theta_{A,xy} \Theta_K + r_K^2 (\Theta_{A,xy} + \Theta_K) \Theta_{W,xy} \sin^2 \alpha} \quad (5.22)$$

5.3.2 Reglerauslegung

Ein linearer Regler wird basierend auf der Systemmodellierung ausgelegt. Dazu müssen die Bewegungsgleichungen linearisiert werden und in die Zustandsraumdarstellung gebracht werden.

$$\dot{\vec{x}} = \begin{bmatrix} \dot{\vec{q}} \\ \ddot{\vec{q}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{\vec{q}} \\ M_x^{-1}(f_{NP} - (C_x + G_x)) \end{bmatrix} \quad (5.23)$$

Da die erwarteten Betriebspunkte und Eingangssignale von der gleichen Größenordnung sind, wird auf eine Normierung verzichtet.

Mit dem Zustandsvektor $\vec{x} = [\varphi_x, \vartheta_x, \dot{\varphi}_x, \dot{\vartheta}_x]$, dem Eingang $u = T_x$ und dem Systemausgang $\vec{y} = \vec{x}$ ist die Zustandsraumdarstellung gegeben durch

$$\dot{x} = Ax + Bu, \quad y = Cx + Du \quad (5.24)$$

Für alle Zustände um Null linearisiert, erhält man folgende, numerisch ausgewertete Systemmatrizen:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & -31,4603 & 0 & 0 \\ 0 & 16,3333 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 13,4993 \\ -2,8567 \end{bmatrix} \quad C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad D = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Für die zwei planaren Modelle in der yz- und xz-Ebene wird eine Linear Quadratic Regulator (LQR) State Feedback Regler verwendet. Da alle Zustände von den Sensoren gemessen werden, ist ein LQR-Regler ein sinnvoller Ansatz.

Die Gewichtungsmatrizen Q und R werden experimentell optimiert [25]. Mit Hilfe des MATLAB-Befehls `lqr` kann die Regler-Matrix K ermittelt werden. Das vollständige Regelschema ist in Abbildung 5.4 abgebildet.

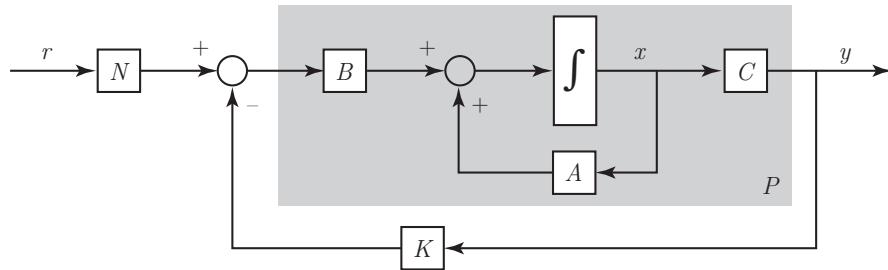


Abbildung 5.4: Blockschema des Regelkreises

Drei verschiedene Regler werden am System implementiert. Der Positionsregler nutzt alle Zustände, um den Ballbot zu stabilisieren und versucht das System auf einem Positionssollwert zu halten. Ein Geschwindigkeitsregler verwendet nur einen Teil der Zustände und regelt die Geschwindigkeit des Ballbots. Mit den Zuständen $x = [\vartheta_x, \dot{\vartheta}_x]$ regelt der Beschleunigungsregler nur den Neigungswinkel des Aufbaus und kann so theoretisch unendliche Geschwindigkeit erreichen.

Für das relativ einfache xy-Modell wird ein PD-Regler experimentell mit den Regelverstärkungen $k_p = -0.5$ und $k_d = -0.3$ ausgelegt. Das System kann

stabilisiert werden, wenn auch nicht sehr gut. Daher wird dieses Konzept nicht weiterverfolgt.

5.3.3 Umrechnungen

Drehmomententransformation

Die planaren Modelle verwenden virtuelle Antriebsräder zur Systemstabilisierung. Das reale System jedoch, hat eine Antriebsstruktur, die sich stark von jener der planaren Modelle unterscheidet. Da die ausgelegten Regler auf dem echten System implementiert werden, müssen die virtuellen Systeminputs auf die realen Motoren transformiert werden.

Ein Antriebselement des realen Systems ist auf der linken Seite in Abbildung 5.5 gezeigt. Es treibt die Kugel tangential zu einer Kreislinie auf der Kugel an und ist im Winkel α angeordnet. Rechts in der Abbildung 5.5 ist die Ansicht von oben auf das reale Antriebssystem veranschaulicht.

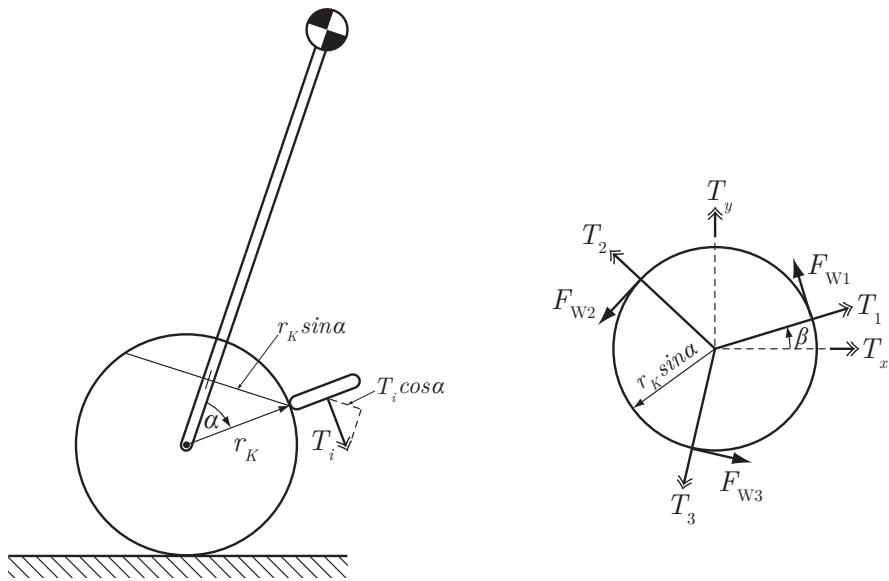


Abbildung 5.5: Momente und Tangentialkräfte

Die Umrechnung wird mit Hilfe des Gleichgewichtes zwischen den Tangentialkräften der virtuellen und der realen Motoren auf der Kugel berechnet (5.25). Die Rechnungsschritte dazu sind [25] zu entnehmen.

$$T_{KW,1} + T_{KW,2} + T_{KW,3} = T_{KW,x} + T_{KW,y} + T_{KW,z} \quad (5.25)$$

Die analytische Transformation zwischen virtuellen und realen Antriebsmomenten ist mit folgenden Formeln beschrieben:

$$T_1 = \frac{1}{3} \cdot \left(T_z + \frac{2}{\cos \alpha} \cdot (T_x \cdot \cos \beta - T_y \cdot \sin \beta) \right) \quad (5.26)$$

$$T_2 = \frac{1}{3} \cdot \left(T_z + \frac{1}{\cos \alpha} \cdot \left(\sin \beta \cdot (-\sqrt{3}T_x + T_y) - \cos \beta \cdot (T_x + \sqrt{3}T_y) \right) \right) \quad (5.27)$$

$$T_3 = \frac{1}{3} \cdot \left(T_z + \frac{1}{\cos \alpha} \cdot \left(\sin \beta \cdot (\sqrt{3}T_x + T_y) + \cos \beta \cdot (-T_x + \sqrt{3}T_y) \right) \right) \quad (5.28)$$

Trägheitsmomententransformation

Dieser Abschnitt beschreibt den Prozess, eine geeignete Annäherung der Trägheitsmomente der virtuellen Antriebsräder zu berechnen.

Für diese Transformation werden die Geschwindigkeiten der realen und virtuellen Omniwheel verglichen und daraus folgende Formeln abgeleitet (Details siehe Anhang A.14):

$$\Theta_{W,x} = \Theta_{W,y} = \frac{3}{2} \cos^2(\alpha)(\Theta_{OW} + i^2 \Theta_M) \quad (5.29)$$

$$\Theta_{W,z} = 3 \cdot (\Theta_{OW} + i^2 \cdot \Theta_M) \quad (5.30)$$

Beim Vergleich der numerischen Werte für die Energien der Kugel, des Antriebsrades und des Aufbaus, lässt sich feststellen, dass die Größenordnung dieser gleich ((5.31)–(5.33)). Deshalb ist es sinnvoll, bei der Systemmodellierung alle drei Starrkörper in den Berechnungen mit einzubeziehen.

$$E_K = 8.35 \text{ J} \quad (5.31)$$

$$E_A = 3.75 \text{ J} \quad (5.32)$$

$$E_W = 2.95 \text{ J} \quad (5.33)$$

5.3.4 Verifikation

Abbildung 5.6 zeigt die Systemantwort der Simulation des planaren Modells und des realen Systems auf einen Geschwindigkeitssollwertsprung. Der Sollwertschritt ist in diesem Fall eine positive Auslenkung von $\dot{\varphi}_x$, was einer Translation in y-Richtung entspricht. Dies wiederum stellt eine planare Bewegung dar.

Die Übereinstimmung der Systemantworten ist generell gut. Kleinere Unterschiede zwischen den simulierten und gemessenen Daten ist hauptsächlich auf Rauschen und auf die Vereinfachungen des planaren Modells zurückzuführen.

Um diese Verifikation durchzuführen, wird der gleiche Regler in der Simulation und am echten System verwendet. Eine klassische Feed-Forward Verifikation ist in diesem Fall nicht möglich, da es sich um ein instabiles System handelt.

Offensichtlich kann dieser Regler das System stabilisieren und erreicht eine akzeptable Systemleistung. Daraus kann geschlossen werden, dass die Systemmodellierung das reale System zu einem vernünftigen Grad abzubilden vermag. Weitere Plots sind [25] zu entnehmen.

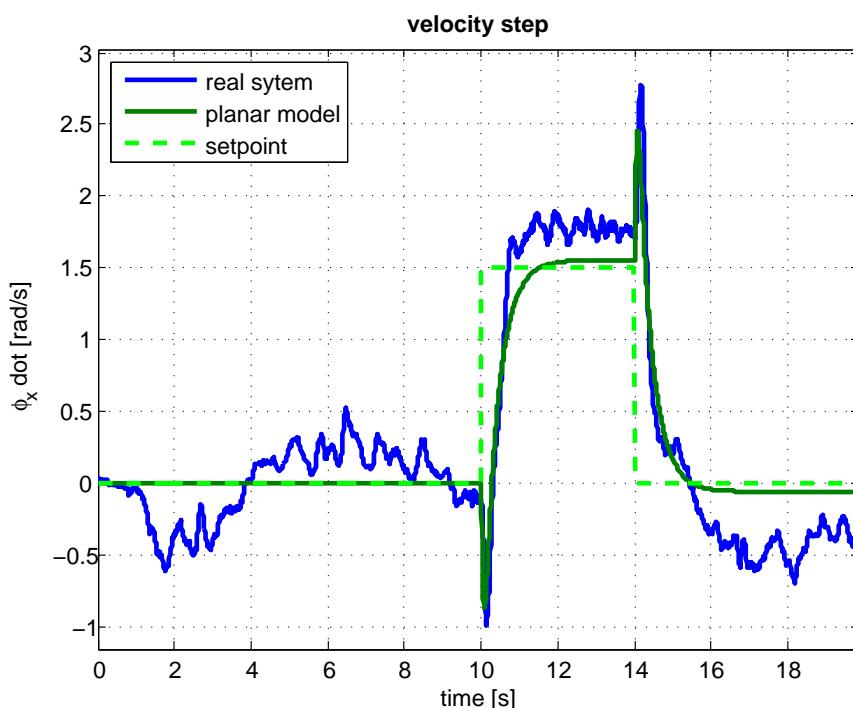


Abbildung 5.6: Systemantworten auf einen Geschwindigkeitssprung von 0 rad/s auf 1,5 rad/s

Nachteile des planaren Modells

Beim Trennen des Systems in drei unabhängige, planare Modelle, werden alle Kopplungseffekte vernachlässigt. Mit diesem Ansatz ist klar, dass bei einer Fahrt in y -Richtung (yz -Ebene) und bei gleichzeitiger Drehung um die z -Achse (xy -Ebene) kein Einfluss auf das xz -Modell ausgeübt wird (Abbildung 5.7). Es ist klar, dass ein solches Verhalten nicht der Realität entsprechen kann.

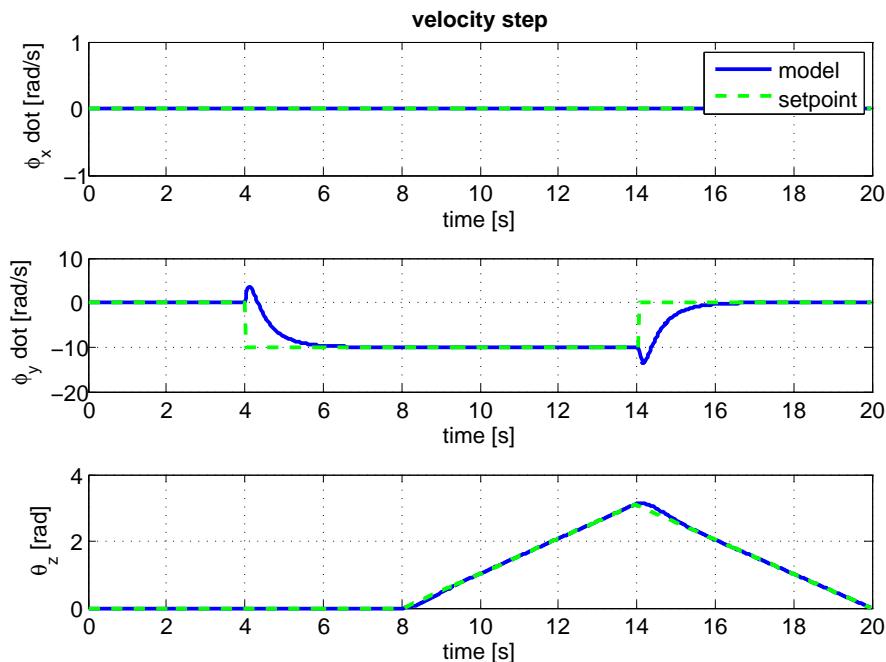


Abbildung 5.7: Fahrt in x -Richtung (Mitte) und gleichzeitige Drehung um die z -Achse (unten) hat keinen Einfluss auf die Bewegung in y -Richtung (oben)

Ein weiterer Nachteil der planaren Systemmodellierung sind die vielen Transformationen, die nötig sind, damit die Parameter vom echten System auf die virtuellen Modelle übertragen werden können oder auch von letzteren übernommen werden können (siehe 5.3.3).

5.4 3D System

5.4.1 Systemmodellierung

Modellbeschreibung

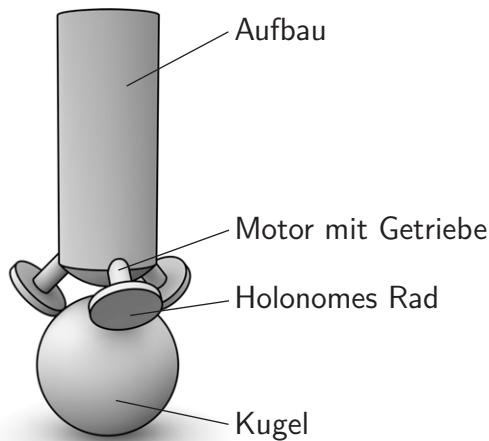


Abbildung 5.8: Geometrisches Modell der dreidimensionalen Systemmodellierung

Das vorgeschlagene Modell besteht, wie in Abbildung 5.8 ersichtlich, aus fünf verschiedenen Starrkörpern:

- eine Kugel
- drei holonome Antriebsräder
- ein Aufbau mit drei Motoren mit Getriebe

Die Kugel kann sich in jede Richtung, ausser um die Achse vertikal zum Boden, frei drehen. Sie ist stets in einem beliebigen Punkt in Kontakt mit dem Boden. Drei holonome Räder verbinden zu jeder Zeit und über drei Punkte den oberen Teil des Systems mit der Kugel. Jedes dieser Omnidriven ist über einen Motor mit Getriebekopf fest mit dem Aufbau verbunden. Die Räder können sich nur um die Motorenachse im aufbaufesten Koordinatensystem bewegen. Die Antriebsräder können Kräfte nur in tangentialer Richtung ihrer Drehung auf die Kugel übertragen.

Die Eingänge des Systems sind die drei Drehmomente T_1, T_2, T_3 welche vom Motor erzeugt und vom Getriebe übersetzt werden. Die Sensoren sind so platziert, dass alle Zustände des Systems direkt gemessen werden können.

Annahmen

Zusätzlich zu den geometrischen Vereinfachungen, werden dieselben Annahmen wie in Abschnitt 5.3.1 getroffen. Da die Kugeldrehung um die Achse vertikal zum Boden nicht modelliert ist, wird hohe Bohrhaftreibung im Kontaktspunkt zwischen Kugel und Boden angenommen.

Parameter

Zusätzlich zu denen in Tabelle 5.1 angegeben Parametern, sind jene in Tabelle 5.3 relevant.

| Beschreibung | Variable |
|------------------------------------|-----------------------------|
| Trägheit der Kugel | Θ_K |
| Trägheit des Aufbaus | $\Theta_{A,x,y,z}$ |
| Trägheit des Motors und Omniwheels | Θ_W |
| Motorenanordnungswinkel | $\beta_1, \beta_2, \beta_3$ |

Tabelle 5.3: Zusätzliche Parameter des 3D-Modells

Das Trägheitsmoment von Motor mit Omniwheel Θ_W ist ein Skalar und ist ausschliesslich für die Rotation um die Motorenachse im aufbaufesten System gegeben. Um die räumliche Trägheit bei der Bewegung des Aufbaus ebenfalls zu berücksichtigen, wird deren Trägheit demjenigen des Aufbaus hinzugezählt. Dies resultiert in einer vereinfachten, aber äquivalenten Energieformulierung (siehe 5.4.1).

Koordinaten

Im Folgenden werden die Koordinaten, die Koordinatensysteme und deren Beziehungen beschrieben.

Das interiale Bezugssystem wird mit I bezeichnet. Mit einer Drehung um die interiale z-Achse e_z^I um ϑ_z entsteht das Koordinatensystem L . Das System A' wird mit einer Rotation um die y-Achse im L -system e_y^L mit ϑ_y beschrieben. Zum Schluss wird das aufbaufeste Koordinatensystem A mit einer Drehung um $e_x^{A'}$ mit ϑ_x erreicht.

Die Winkelgeschwindigkeitsvektoren des Systems werden folgendermassen beschrieben:

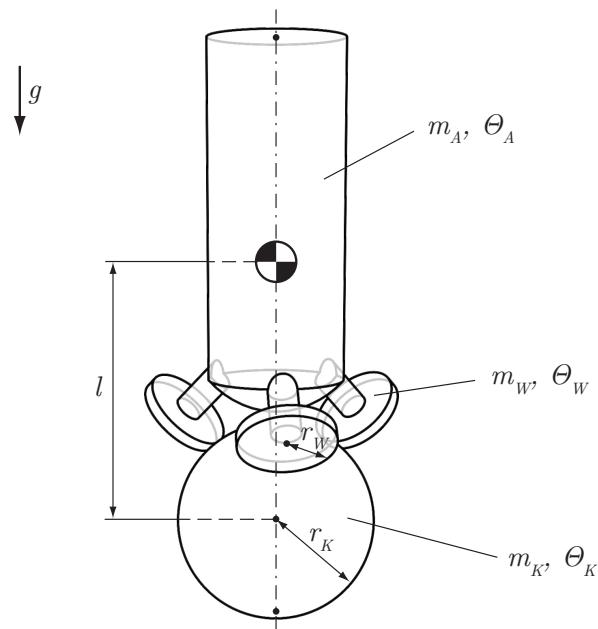


Abbildung 5.9: Geometrische Parameter des 3D-Modells

$$I \xrightarrow{\vartheta_z} L \xrightarrow{\vartheta_y} A' \xrightarrow{\vartheta_x} A$$

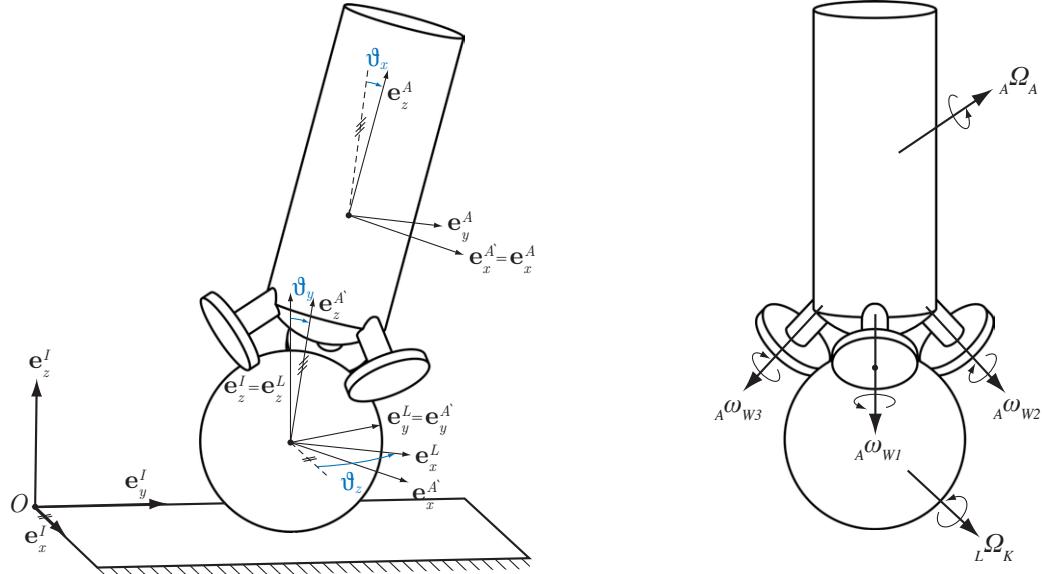


Abbildung 5.10: Coordinate systems

- $\vec{\Omega}_K$: Winkelgeschwindigkeit der Kugel
Parametrisierung von $\vec{\Omega}_K$ im Koordinatensystem L :

$${}_L\vec{\Omega}_K = \begin{bmatrix} \dot{\varphi}_x \\ \dot{\varphi}_y \\ 0 \end{bmatrix} \quad (5.34)$$

- ω_W : Winkelgeschwindigkeit eines Omniwheels relativ zum Koordinatensystem A in Richtung der Motorenachse

Parametrisierung von ω_W im Koordinatensystem A :

$${}_A\omega_{W1} = \dot{\psi}_1 \quad {}_A\omega_{W2} = \dot{\psi}_2 \quad {}_A\omega_{W3} = \dot{\psi}_3 \quad (5.35)$$

- $\vec{\Omega}_A$: Winkelgeschwindigkeit des Aufbaus

Um die Winkelgeschwindigkeit des Aufbaus mit den Variablen ϑ_x , ϑ_y und ϑ_z ausdrücken zu können, muss die zeitliche Änderung der Tait-Bryan-Winkel $\vec{\vartheta}$ Jacobi-transformiert werden. Parametrisierung von $\vec{\Omega}_A$ im Koordinatensystem A:

$${}_A\vec{\Omega}_A = \underline{J} \cdot \dot{\vec{\vartheta}} = \begin{bmatrix} \dot{\vartheta}_x - \sin \vartheta_y \cdot \dot{\vartheta}_z \\ \cos \vartheta_x \cdot \dot{\vartheta}_y + \cos \vartheta_y \cdot \sin \vartheta_x \cdot \dot{\vartheta}_z \\ -\sin \vartheta_x \cdot \dot{\vartheta}_y + \cos \vartheta_x \cdot \cos \vartheta_y \cdot \dot{\vartheta}_z \end{bmatrix} \quad (5.36)$$

Zur Herleitung der Bindungsgleichungsbeziehungen zwischen $\vec{\Omega}_A$, $\vec{\Omega}_K$ und ω_W sei auf A.15 verwiesen.

Energien

Für jeden Körper muss die kinetische und die potentielle Energie berücksichtigt werden. Am Beispiel des Aufbaus, soll dieser Prozess erklärt werden. Im Anhang A.15 werden alle weiteren Schritte im Detail beschrieben.

Der Drehpunkt wird in diesem Beispiel nicht Schwerpunkt des Aufbaus, sondern im Kugelmittelpunkt gewählt, was mit einem Kopplungsterm berücksichtigt wird.

$$\begin{aligned} T_A &= \underbrace{\frac{1}{2} \cdot m_A \cdot I \dot{\vec{r}}_P^T \cdot I \dot{\vec{r}}_P}_{\text{Translation}} + \underbrace{m_W \cdot (\underline{R}_{AI} \cdot I \dot{\vec{r}}_P) \cdot ({}_A\vec{\Omega}_A \times {}_A\vec{r}_{PSA})}_{\text{Kopplung}} \\ &\quad + \underbrace{\frac{1}{2} \cdot {}_A\vec{\Omega}_A^T \cdot {}_A\Theta_A \cdot {}_A\vec{\Omega}_A}_{\text{Rotation}} \end{aligned} \quad (5.37)$$

${}_A\vec{r}_{PSA}$ beschreibt den Vektor vom Kugelmittelpunkt P zum Aufbauschwerpunkt SA im Referenzsystem A .

Die potentielle Energie des Aufbaus ist somit folgendermassen gegeben:

$$V_A = -m_A \cdot \vec{G} \cdot \underline{R}_{IA} \cdot {}_A\vec{r}_{PSA} \quad \text{mit } \vec{G} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -g \end{bmatrix} \quad (5.38)$$

Nichtpotentialkräfte

Die Nichtpotentialkräfte f_{NP} sind die Drehmomente T_1 , T_2 und T_3 und wirken direkt auf ${}_A\omega_{W1}$, ${}_A\omega_{W2}$ und ${}_A\omega_{W3}$. Da die Parameter $\dot{\psi}_1$, $\dot{\psi}_2$ und $\dot{\psi}_3$ nicht Komponenten der Minimalkoordinaten \vec{q} sind, wird eine polynomiale Separation durchgeföhrt, sodass

$${}_A\omega_{Wi} = \underline{J}_{Ti} \cdot \dot{\vec{q}} \quad \text{für } i = 1, 2, 3 \quad (5.39)$$

gilt.

Damit kann f_{NP} geschrieben werden als

$$f_{NP} = \underline{J}_{T1} \cdot T_1 + \underline{J}_{T2} \cdot T_2 + \underline{J}_{T3} \cdot T_3. \quad (5.40)$$

Bewegungsgleichungen

Analog zur planaren Systemmodellierung (5.3.1) wird die Lagrange-Methode verwendet, um die Bewegungsgleichungen herzuleiten.

Als Minimalkoordinaten \vec{q} werden folgende Koordinaten gewählt:

$$\vec{q} = [\vartheta_x \quad \vartheta_y \quad \vartheta_z \quad \varphi_x \quad \varphi_y]^T \quad (5.41)$$

Mit 5.1 und

$$T = T_K + T_A + T_{W1} + T_{W2} + T_{W3} \quad (5.42)$$

$$V = V_A \quad (5.43)$$

werden nun die Differentialgleichungen des Systems hergeleitet.

Die Rechnungen wurden mit der Softwarelösung Mathematica durchgeföhrt, dauern aber dennoch bis zu acht Stunden. Da das Resultat ein entsprechendes Ausmass annimmt, wird auf die Darstellung an dieser Stelle verzichtet. Details sind wiederum A.15 zu entnehmen.

5.4.2 Reglerauslegung

In einem ersten Schritt wird ein linearer Regler mit LQR entworfen. Dazu muss das System linearisiert und in die Zustandsraumdarstellung gebracht werden:

$$\dot{\vec{x}} = A \cdot \vec{x} + B \cdot \vec{u} \quad \vec{y} = C \cdot \vec{x} + D \cdot \vec{u} \quad (5.44)$$

$$\vec{x} = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ x_5 \\ x_6 \\ x_7 \\ x_8 \\ x_9 \\ x_{10} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \vartheta_x \\ \dot{\vartheta}_x \\ \vartheta_y \\ \dot{\vartheta}_y \\ \vartheta_z \\ \dot{\vartheta}_z \\ \varphi_x \\ \dot{\varphi}_x \\ \varphi_y \\ \dot{\varphi}_y \end{bmatrix} \quad \vec{u} = \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \end{bmatrix} \quad \vec{h} = \vec{x} \quad (5.45)$$

Linearisierung um Null

Alle Zustände werden um Null linearisiert, da der Ballbot primär versucht, den Aufbau senkrecht zum Boden und die Position konstant zu halten. Dabei kann der Ballbot in jede beliebige Richtung kippen, weshalb eine Linearisierung einen sinnvollen Kompromiss darstellt.

$$A_0 = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 37.69 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 37.73 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ -73.02 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & -73.09 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad B_0 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 4.02 & -2.01 & -2.01 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 3.485 & -3.485 \\ 0 & 0 & 0 \\ -10.76 & -10.76 & -10.76 \\ 0 & 0 & 0 \\ -13.48 & 6.738 & 6.738 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & -11.68 & -11.68 \end{bmatrix}$$

Abbildung 5.11: Systemmatrizen A_0 und B_0 für die Linearisierung um Null für alle Zustände

Die Matrix C_0 ist eine 10×10 Einheitsmatrix und D_0 eine 10×3 Nullmatrix. Abbildung 5.11 zeigt, dass bei einer Linearisierung um Null, das System in

drei unabhängige, planare Systeme zerlegt werden kann. Die rot und blau markierten Einträge von A_0 und B_0 sind zwei identische Systeme für die yz- und xz-Ebene (siehe Abschnitt 5.3.1) und die schwarz markierten Einträge repräsentieren das System der xy-Ebene. Weiter sieht man an der Matrix B_0 den unterschiedlichen Einfluss der Motoren auf die jeweiligen Subsysteme.

Linearisierung um einen beliebigen Betriebspunkt

Mit einer Linearisierung um einen beliebigen Betriebspunkt kann gezeigt werden, dass sich das System Ballbot sehr stark nichtlinear verhält und relative hohe Kopplungseffekte auftreten. Für eine genaue Abhandlung sei auf [25] verwiesen.

Linearer Regler

Analog zu Abschnitt 5.3.2 wird ein LQR-Regler ausgelegt. Dabei werden folgende Gewichtungsmatrizen verwendet:

$$Q = \text{diag}(100, 50, 100, 50, 40, 20, 20, 10, 20, 10) \quad (5.46)$$

$$R = \text{diag}(100, 100, 100) \quad (5.47)$$

Die Werte für Q sind ähnlich gewählt wie in 5.3.2 beschrieben und R wird so gewählt, dass beim normalen Betrieb die Motoren ihre maximalen Drehmomente nicht überschreiten.

Ein Beispiel einer resultierenden Reglermatrix K ist nachfolgend gegeben.

$$K = \begin{bmatrix} 22,34 & 4,63 & -0,00 & -0,00 & -0,36 & -0,29 & 0,36 & 0,53 & -0,00 & -0,00 \\ -11,17 & -2,32 & 19,34 & 4,01 & -0,36 & -0,29 & -0,18 & -0,26 & 0,31 & 0,46 \\ -11,17 & -2,32 & -19,34 & -4,01 & -0,36 & -0,29 & -0,18 & -0,26 & -0,31 & -0,46 \end{bmatrix}$$

Nichtlinearer Regler

Aufgrund der starken Nichtlinearitäten des Systems, kann ein nichtlinearer Regler die Leistungsfähigkeit weiter optimieren. Dazu wird die Methode Gain Scheduling gewählt und kann erfolgreich simuliert werden. Aufgrund der Datenmengen und der Rechenleistung wird jedoch nur eine vereinfachte Version am realen System implementiert. Eine ausführliche Beschreibung des nichtlinearen Reglers wird in [25] gegeben.

5.4.3 Verifikation

Tabelle 5.4 zeigt eine Übersicht über die verschiedenen Sollwerte und Systemantworten des realen Systems und der Simulation auf den verschiedenen Achsen. Die Übereinstimmung erfüllt die Erwartungen und auch die Koppelungseffekte sind klar zu erkennen.

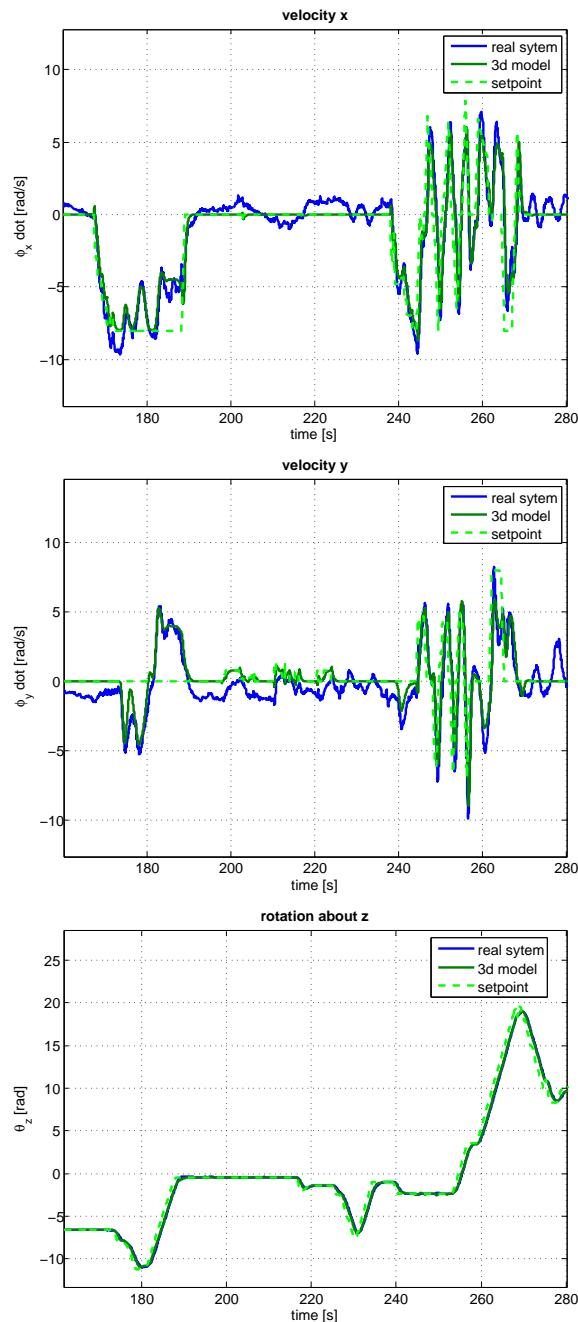


Tabelle 5.4: Komplexe Sollwerte von einer Joysticksteuerung

5.4.4 Vergleich zum planaren System

Die grössten Unterschiede zwischen dem planaren und dem 3D-Modell, welche die Dynamik des Systems beeinträchtigen, sind die Kopplungseffekte der verschiedenen Achsen (5.3.4 und 5.4.3).

Abbildung 5.12 zeigt, dass der planare Regler am 3D-System komplexen Sollwerten nicht folgen kann, zu oszillieren beginnt und unter Umständen das System nicht stabilisieren kann. Dies zeigt, dass ein Regler, basierend auf einem planaren System, nicht im Stande ist, komplizierte Bewegungen zu regeln.

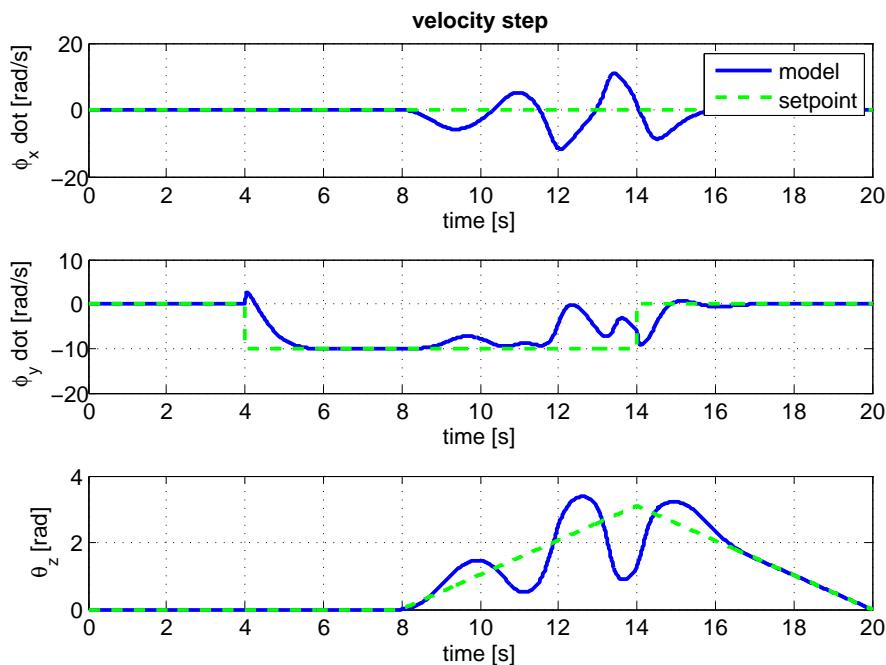


Abbildung 5.12: Simulation des 3D-Modells mit planarem Regler

5.5 Simulation

5.5.1 Implementation in Simulink

Um die Systemmodellierung testen und verifizieren zu können, wird die nicht-linearen Bewegungsgleichungen in MATLAB/Simulink implementiert (siehe Abbildung 5.13). Ausserdem wird die Simulation als Grundlage für viele Softwareentwicklungen genutzt, um deren Verhalten auf dem System vorab zu testen und zu optimieren. Aus diesem Grund soll die Simulation die Realität so gut wie möglich abbilden (siehe Kap. 5.5.3)

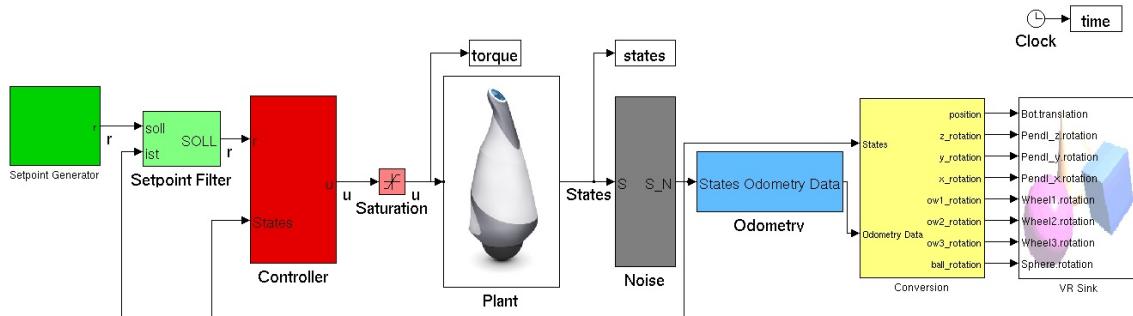


Abbildung 5.13: Simulink Blockschema der obersten Ebene

Um die Handhabung mit der Simulation zu vereinfachen, wird eine graphische Benutzeroberfläche (GUI) entwickelt (siehe Abbildung 5.14). Mit dieser kann die gewünschte Regelung und Eingabemethode gewählt, die Simulation gestartet und unterbrochen und ein Aufnahmeprotokoll angezeigt werden.

5.5.2 Visualisierung

Um die Resultate der Simulation darzustellen, wird eine dreidimensionale Darstellung des Systems mit der *3D Animation Toolbox* entwickelt. Mit dieser Software ist es relativ einfach, eine räumliche Darstellung von Geometrien in Echtzeit zu visualisieren. Abbildung 5.15 zeigt eine Aufnahme aus der 3D-Visualisierung.

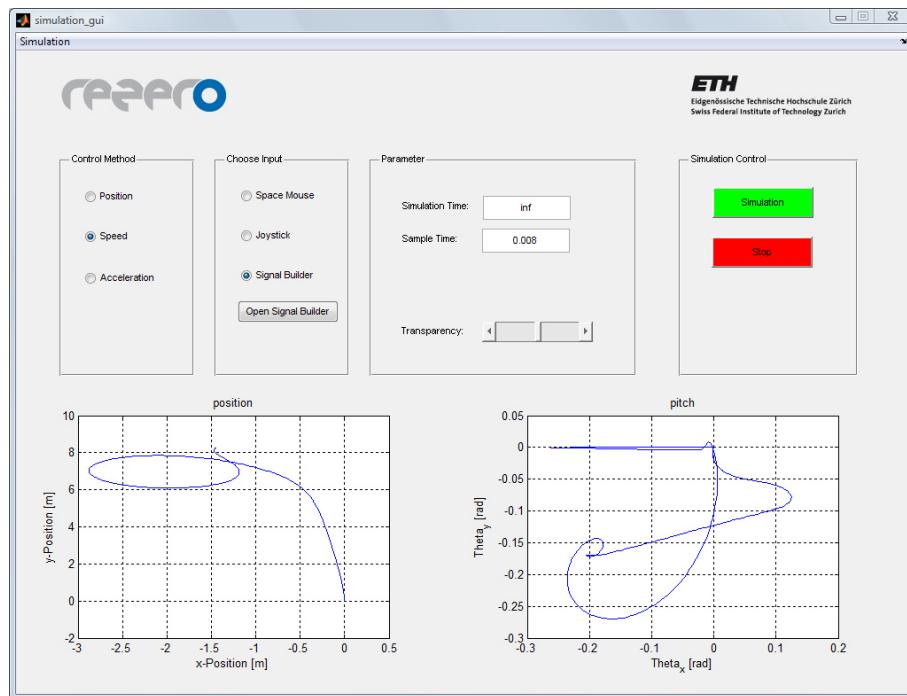


Abbildung 5.14: Graphische Benutzeroberfläche der Simulationsumgebung

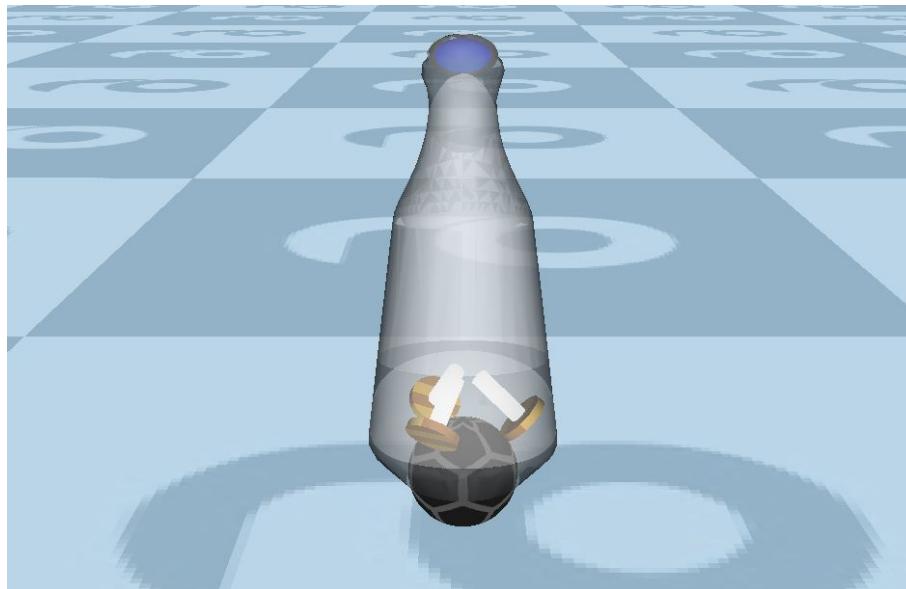


Abbildung 5.15: Screenshot der 3D-Visualisierung in Simulink

5.5.3 Fehlermodell

Um den Effekt des Rauschens und der Totzeit mit in die Simulation einfließen zu lassen, werden verschiedene Fehlerquellen in Simulink modelliert.

Rauschen

Es wird die Annahme getroffen, dass das Signalrauschen einzig die Signale der IMU stört und dass der Quantisierungsfehler der Encoder vernachlässigt werden kann. Das dynamische Rauschen aller drei Achsen der IMU wird unter konstanter Drehrate gemessen und in Simulink direkt dem entsprechenden Signal addiert.

Totzeit

Zusätzlich zum Sensorrauschen wird eine Totzeit von 0,01 s zur Regelstrecke hinzugefügt, welche die Zeit der Signalverarbeitung darstellt (bei einer Abtastfrequenz von 160 Hz wäre die maximale Totzeit 0,007 s).

5.5.4 Kalmanfilter

Messresultate am realen System haben gezeigt haben, dass das Rauschen der Gyroskope im Vergleich mit den anderen Messwerten, wie z.B. denjenigen der Winkelencoder, verhältnismässig stark ist. Aufgrund der Rückkopplung kommt es somit zu unerwünscht hohen Motorenmomenten. Eine Filterung kann diese Problematik lösen. Ein simpler Tiefpassfilter sorgt für gemässigtere Werte, bewirkt jedoch eine zeitliche Verzögerung, die im System nicht tolerierbar ist (siehe Abb. 5.16).

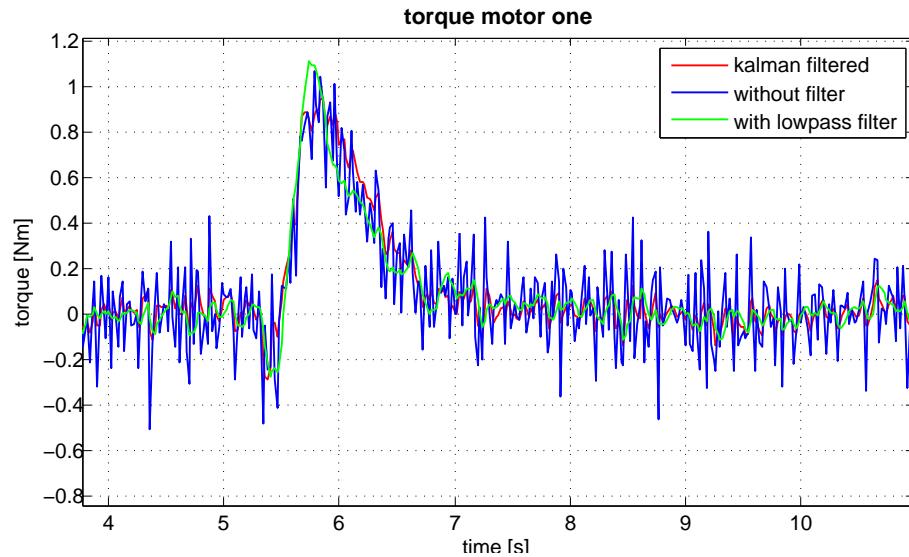


Abbildung 5.16: Vergleich von Tiefpass- und Kalmanfilter

Darum ist ein Echtzeitfilter gesucht worden, der keine Zeitverzögerung aufweist. Die typische Lösung ist ein Kalmanfilter. Das Grundprinzip liegt darin, dass mittels eines Systemmodells, sowie einem bekannten Mess- und Prozessrauschen, der nächste Systemzustand geschätzt wird. Im folgenden Zeitschritt wird mittels der aktuellen Messung die im letzten Zeitschritt gemachte Approximation korrigiert und die Differenz mittels der sogenannten Kalmanverstärkung gewichtet. Damit resultiert ein geglätteter Wert, der zwischen Schätzung und Messung liegt.

Das Kalmanfilter ist sehr rechenintensiv. Da jede Rechnung aus Fliesskommazahlen besteht, diese jedoch vom Mikrocontroller nicht hardware- sondern softwarebasiert ausgeführt werden müssen, sprich, die Operationen werden emuliert, ist es nicht möglich, innerhalb der gegebenen Zeit von 1,5 ms die kompletten Operationen auszuführen. Darum ist versucht worden, alle Rechnungen in Fixkommazahlen durchzuführen, was eine enorme Zeiter sparnis von etwas einem Faktor dreissig einträgt. Alle Umrechnungen sind Bitshiftoperationen, die manuell ausgeführt werden müssen und darum sehr fehleranfällig sind. Dabei muss ständig darauf geachtet werden, keine Integeroverflows zu generieren.

Im aktuellen System ist eine erste Version der gemachten Fixpunkttechnun gen implementiert. Diese ist in der Simulation in MATLAB/Simulink getestet worden und funktioniert in vielen Fällen. Beim Einsatz auf dem realen System ist jedoch Vorsicht geboten, da Verbesserungspotential vorhanden ist.

5.6 Implementierung

5.6.1 Sollwertfilter

Um sicherzustellen, dass die Sollwerte in einem Bereich liegen, in welchem das System ohne Destabilisierungsgefahr arbeiten kann, wird ein Sollwertfilter implementiert. Der Filter legt zwischen jeden Ist- und Sollzustand eine Rampe und limitiert die maximalen Sollwerte (siehe Abbildung 5.17).

5.6.2 Programmierung des Mikrocontrollers

Der Regler wird mit einer Regelfrequenz von 157,8 Hz auf einem Mikrocontroller implementiert. Da dieser Regeltakt relativ hoch ist, kann der kontinuierliche Regler aus der Simulation direkt portiert werden. Der Regler und alle Umrechnungen werden in C-Code geschrieben.

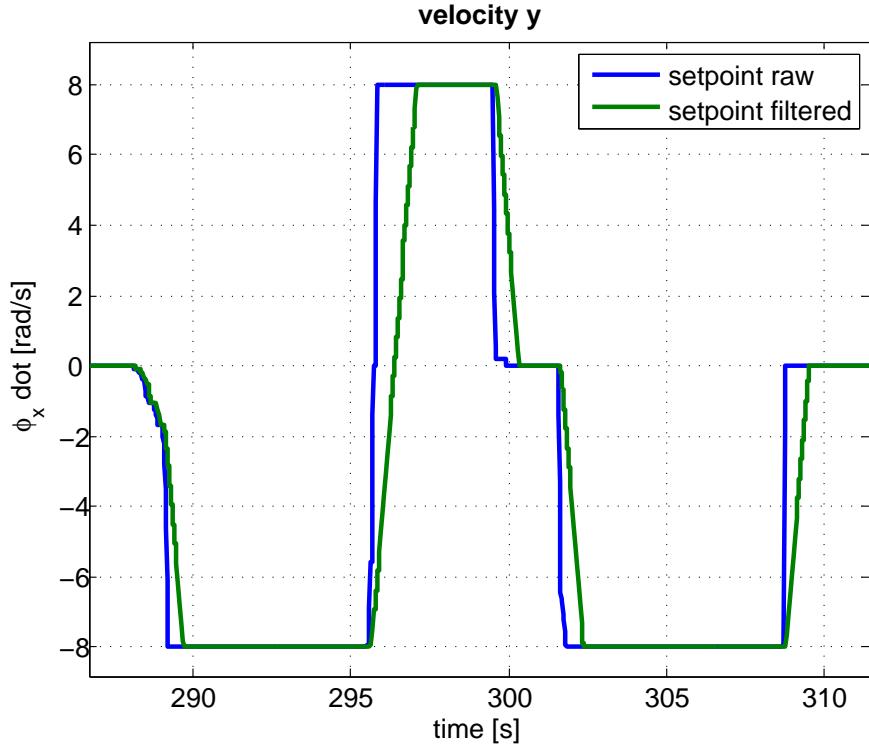


Abbildung 5.17: Einfluss des Sollwertfilters

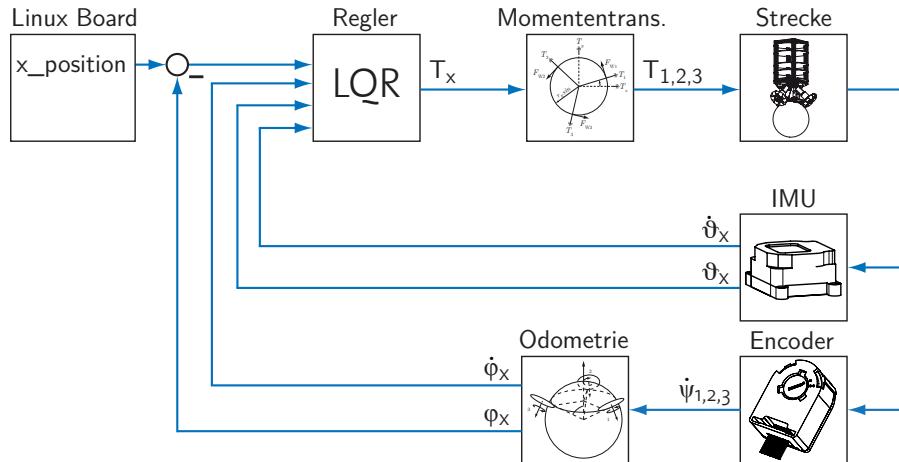


Abbildung 5.18: Struktur der Implementierung auf dem Low-Level-Controller

Abbildung 5.18 zeigt die Übersicht der implementierten Regelstruktur. Die IMU und die Encoder erstellen eine Messung der Systemzustände, welche durch die Odometrie verrechnet werden. Nach der Berücksichtigung der Sollwerte, wertet der Regler diese Daten aus und sendet die Drehmomentsollwerte der Motoren an die Leistungselektronik.

6 Steuerung

6.1 Detailkonzept

Um die Stabilisierung des Ballbots jederzeit gewährleisten zu können, werden, wie bereits in Kapitel 4 beschrieben, zwei Boards verwendet. Die Regelung wird vom Mikrocontroller übernommen, während das Linuxboard die rechenintensivere Datenverarbeitung übernimmt. Die frei verfügbare Software „Robotic Operating System“ (kurz ROS) wird dazu benutzt, die Kommunikation zwischen den angebundenen Sensoren, dem Mikrocontroller und den Steuerungsblöcken „Protokollsteuerung“, „manuelle Steuerung“ und „Hinderniserkennung“ zu organisieren. Vor der Übergabe der Steuersollwerte an die Regelung auf dem Mikrocontroller werden sie durch einen Sollwertfilter geglättet. Dieser High-Level-Controller beschränkt Sprünge unter Berücksichtigung der maximalen Beschleunigung und Geschwindigkeit des Ballbots. Abbildung 5.1 stellt die wichtigsten Elemente grafisch dar.

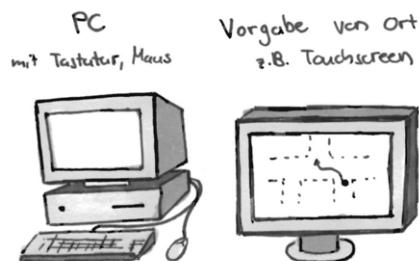


Abbildung 6.1: Steuerungsvarianten im Agilitätsmodus

6.1.1 Hard- und Softwaresetup

Betriebssystem

Auf beiden Single Board Computern kommt ein Linux-Betriebssystem zum Einsatz. Dieses benötigt wenig Ressourcen und unterstützt zahlreiche Hardware. Um auf aktuelle Software zurückzugreifen, werden aktuelle Linux Dis-

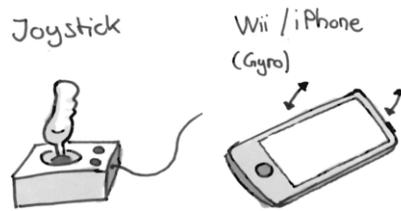


Abbildung 6.2: Steuerungsvarianten im Interaktionsmodus

tributionen verwendet. Auf dem defekten Helios-Board kam Debian 5.0 zum Einsatz, während auf dem fitPC Ubuntu 9.10 vorinstalliert ist.

Robot Operating System

Als Entwicklungs- und Laufzeitumgebung kommt ROS zum Einsatz. Auch wenn es der Name suggeriert, handelt es sich hierbei nicht um ein eigenständiges Betriebssystem. ROS ist ein Open Source Projekt, das es sich zum Ziel gesetzt hat, eine Umgebung für die Entwicklung von Roboter Tools zur Verfügung zu stellen. Da es mittlerweile bereits vielerorts eingesetzt wird und von den einzelnen Projekten Software zur Verwendung freigegeben wird, besitzt ROS zahlreiche vorgefertigte Module, sogenannte Packages. Einige Packages sind z.B. für die Ansteuerung von Hardware wie verbreiteten Sensoren geschrieben. Andere stellen mathematische oder physikalische Algorithmen oder Analysewerkzeuge zur Verfügung.

Der grösste Vorteil von ROS ist die hohe Flexibilität. So kann in C++ oder Python Code geschrieben werden. In ROS geschriebene Programme verhalten sich dabei wie alleinstehende Software. Allerdings kann durch ROS die Kommunikation zwischen verschiedenen ausführbaren Dateien, sogenannten Nodes, übernommen werden. Mehrere Nodes bilden dabei ein Package. ROS ist also hervorragend dazu geeignet, Schnittstellen zu definieren und einzelne Programme zu einem funktionierenden Ganzen zusammenfügen.

Innerhalb von ROS kommen drei verschiedene Datenaustauschstrukturen zum Einsatz:

- Topics
- Services
- Parameterserver

Topics kann man mit einem Forensystem oder einer Mailingliste vergleichen. Hierbei werden Daten zu einem bestimmten Thema (dem sogenannten To-

pic) von einer Node publiziert. Andere Nodes, die von den publizierten Daten gebrauch machen wollen, können dieses Topic abbonieren. Sobald neue Daten zu diesem Topic publiziert werden, werden entsprechende Funktionen in den abonnierten Nodes aufgerufen. Die publizierende Node hingegen erhält keine Rückmeldung. Dieses Prinzip eignet sich z.B. für Sensordaten.

Ein Service ist eine Art Dienstleistung. Eine Node stellt dabei einen oder mehrere Services zur Verfügung. Eine andere Node kann anschliessend diesen Service mit verschiedenen Daten aufrufen und erhält nach dessen Ausführung eine Antwort. Dies eignet sich z.B. für Berechnungen, die in einer externen Node durchgeführt werden.

Als letztes ist der Parameterserver zu nennen. Hier können einzelne Werte als Parameter hinterlegt und abgerufen werden. Dies eignet sich insbesondere für Werte, die sich kaum oder gar nicht ändern. Das können beispielsweise Werte wie die Masse des Roboters sein, die in mehreren Nodes (Systemmodellierung, Regler, Sollwertfilter etc.) gebraucht werden.

Ansteuerung des Single Board Computers

Der Low-Level-Controller (und damit der Roboter) wird über den Single Board Computer angesteuert. Da letzterer auf Benutzereingaben angewiesen ist, muss dieser selbst angesteuert werden. Er kann dabei über WLAN mit einem externen Computer verbunden werden. Von diesem aus kann dann über Remotekonsole (SSH) oder das Web-GUI (siehe Abschnitt 6.3.1) der SBC gesteuert werden.

6.1.2 Softwarestruktur

Wie in Abbildung 6.3 gezeigt, findet der Grossteil der Steuerung auf dem Single Board Computer statt, sodass letzterer die Schnittstelle zwischen Benutzereingaben und Mikrocontroller darstellt. Die Steuerung ist in ROS implementiert und besteht aus den folgenden Nodes und Packages:

Node: send Diese Node ist für das Senden von Daten vom Linuxboard an den Mikrocontroller verantwortlich. Hier befinden sich die Ansteuerung der Hardware als auch die Berechnung der Prüfsumme der zu übertragenden Daten. Des weiteren übernimmt diese Node eine Sicherheitsfunktion, indem sie die erhaltenen Werte auf Korrektheit überprüft¹ und somit nicht alle Daten ungehindert an den Mikrocontroller schickt.

¹Für Details siehe Abschnitt 6.1.3.

Node: receive Diese Node ist für den Empfang von Daten vom Mikrocontroller zuständig. Sie liest kontinuierlich die serielle Schnittstelle aus und überprüft die Richtigkeit der Prüfsumme der Daten als auch deren Wertebereich. Fällt diese Überprüfung positiv aus, so stellt die Node die Daten anderen Nodes in Form eines Topics zur Verfügung.

Node: op_control Mithilfe der „Operation Control“-Node ist es möglich, zwischen den verschiedenen Steuerungs- und Regelungsmodi zu wechseln. Da „Stop“ auch ein möglicher Modus ist, kann der Ballbot hiermit auch gestartet und gestoppt werden. Des Weiteren sendet er das zu erwartende Format der Sollwerte an die „send“-Node. Gesteuert wird diese Node über Tastatureingaben oder alternativ per Web-GUI (siehe Abschnitt 6.3.1).

Node: Hokuyo Diese Node ist bereits in ROS integriert. Sie ist in der Lage Hokuyo Laserdistanzsensoren anzusteuern und die Messdaten auszulesen. Letztere werden dann in ROS publiziert. Des Weiteren ist es möglich, die Parameter (wie z.B. minimaler und maximaler Lesewinkel) während der Laufzeit anzupassen.

Node: laserrange Da der Laserrangesensor fix auf dem Ballbot montiert ist, schwenkt er mit, sobald Rezero sich zu neigen beginnt. Da allerdings die Abstände zwischen Objekt und Rezero parallel zur Ebene interessant sind, werden die Daten mithilfe dieser Node wieder in eine parallele Ebene transformiert.

Node: ultrasonic Diese, vom Team entwickelte Node, übernimmt die Ansteuerung der beiden Ultraschallsensoren und liegt in zwei Versionen vor. Die erste verwendet zur Ansteuerung die A-D-Schnittstelle des Heliosboards, wohingegen die zweite Version die serielle Schnittstelle benutzt. Des Weiteren übernimmt die Node die Auswertung der Messdaten und gibt letztere als ROS-Daten formatiert an die anderen Nodes weiter.

Node: data_logger Diese Node dient dazu, aktuelle Steuerungs- und Regelungsdaten aufzuzeichnen und später in Matlab zu analysieren. Für detaillierte Informationen siehe Unterkapitel 6.3.2.

Node: trajectory_ros_pub Ursprünglich als TCP/IP-Schnittstelle für berechnete Trajektorien gedacht, übernimmt diese Node nun auch die

Funktion bereits übertragene und damit gespeicherte Trajektorien erneut abzuspielen. Dadurch können bekannte Trajektorien schnell aufgerufen und abgefahren werden.

Package: remote _ control Jegliche Eingabegeräte werden über dieses Package angesteuert. Hierbei gibt es je eine Node pro Eingabegerät. Diese übernimmt die Ansteuerung der Hardware, als auch die Umrechnung und Skalierung der Daten. Für Details siehe Unterkapitel 6.2.1.

Package: interaction Teil dieses Packages ist sowohl das Tracking, sprich das Erfassen und Folgen von Objekten, als auch die Hinderniserkennung sowie die drei Interaktionsmodi „Folgen“, „Umkreisen“ und „Spiegeln“. Details zu den einzelnen Teilbereichen befinden sich in Unterkapitel 6.2.3.

Alle beschriebenen Nodes sind in C++ programmiert.

Zur Kommunikation zwischen den einzelnen Nodes kommen folgende Topics zum Einsatz:

mode _ in Dieses Topic enthält den aktuell gewählten Modus.

control _ in Von den Steuergeräten generierte Sollwertvorgaben werden in dieses Topic publiziert.

logger _ in Empfangene Daten und tatsächlich geschickte Daten werden aufbereitet und für die Messdatenaufzeichnung in diesem Topic gespeichert.

imu _ data Entgegen der Namensgebung enthält dieses Topic nicht nur die IMU-Daten sondern auch von der Odometrie berechnete Daten wie Kugelgeschwindigkeit und -position.

laser _ data Dieses Topic enthält die Messwerte des Laserdistanzsensors sowie weitere Angaben wie Lesebereich, Auflösung und Maximaldistanz.

lasserrange _ data Der Inhalt dieses Topics ist mit dem obigen identisch, mit dem Unterschied, dass die Abstandsmessungen in die bodenparallele Ebene abgebildet sind.

ultrasonic _ data Die „ultrasonic“-Node speichert die Distanzmessungen beider Ultraschallsensoren in dieses Topic.

Wie im Schaubild 6.3 dargestellt, zeigen sich hier die Vorteile des Topic-Prinzips. So werden z.B. die IMU-Daten von mehreren Nodes verwendet.

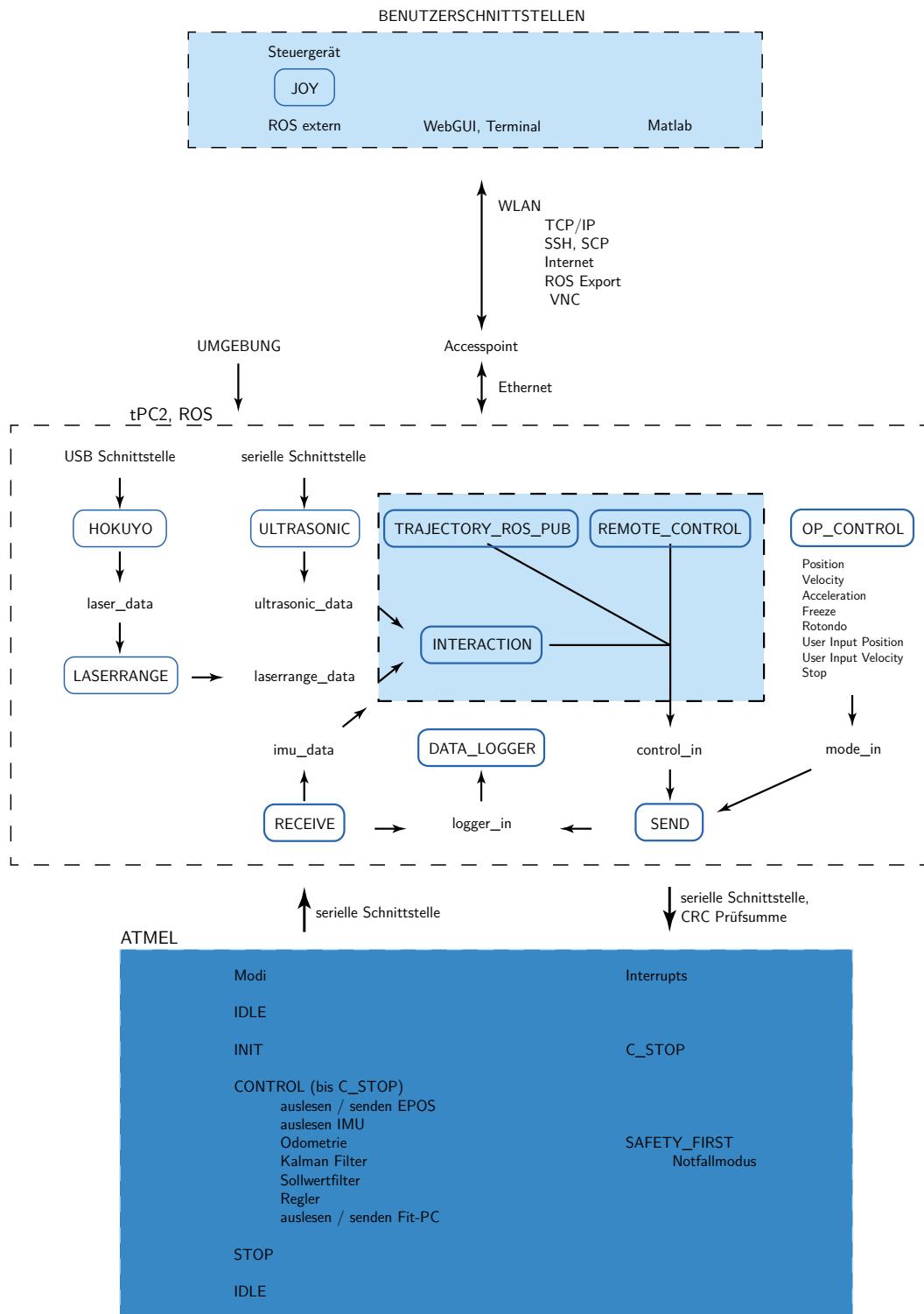


Abbildung 6.3: Der Softwareaufbau auf beiden Recheneinheiten im Zusammenspiel mit dem Benutzer. ROS-Nodes sind blau umrandet.

6.1.3 Sicherheitskonzept

Gerade bei einem hoch sensiblen und instabilen System wie einem Ballbot, spielt das Sicherheitskonzept eine wichtige Rolle. Es muss gewährleistet werden, dass der Ballbot trotz Programmabstürzen oder Ausfällen von Computern stets zumindest auf der Stelle balanciert und nicht umfällt.

Da der Low-Level-Controller den aktuellen Status des SBC nicht abfragen kann, sendet die Send-Node mit einer konstanten Frequenz, welche auf dem Low-Level-Controller überprüft wird. Stimmt diese nicht überein, da z.B. das Linuxboard abgestürzt ist, so wird der Ballbot in den Notfallmodus versetzt, in dem er an seiner aktuellen Position verweilt. Wichtigstes Konzept ist allerdings der Sollwertfilter. Da der Regler unbeschränkt auf Eingabewerte reagiert, müssen letztere gefiltert werden. So werden Sollwertsprünge in Rampen umgewandelt. Zudem gibt es einen Grenzwert zwischen Ist- und Sollwert. Dadurch wird verhindert, dass die Motoren in den Grenzbereich gebracht werden und das System instabil wird. So wird der Ballbot bei extremen Sollwerten zwar z.B. stark Beschleunigen, allerdings wird er nicht umkippen. Dies stellt die erste Sicherheitsebene dar.

Die zweite Sicherheitsebene überprüft den Datenaustausch zwischen beiden Boards. Neben der Berechnung von Checksummen werden auf dem Linuxboard auch die einzelnen Werte überprüft. Sind diese ausserhalb eines definierten, als realistisch angenommenen Wertebereichs, so werden diese Daten von der Receive-Node nicht an die anderen Nodes weitergegeben.

Als dritte Sicherheitsstufe wird sichergestellt, dass nur benutzergenerierte Eingangsdaten an den Regler gesendet werden, wenn dies ausdrücklich gewünscht ist. So wird auf dem Linuxboard z.B. klar zwischen einem Geschwindigkeitsmodus und einer Geschwindigkeitsmodus mit Benutzereingaben unterschieden. Zwar ist dieser Unterschied für den Low-Level-Controller nicht bemerkbar, allerdings verhindert dies, dass aus Versehen (z.B. durch unachtsame Behandlung des Eingabegeräts) unerwünschte Daten gesendet werden. Zudem erlaubt die Unterscheidung zwischen Eingabemodus und Eigenkontrollmodus, dass die Daten einer Eingabe-Node gestoppt werden können, sollte diese einmal nicht korrekt funktionieren und unerwünschte Daten schicken. Zudem wird stets überprüft, ob die Eingabe-Node passende Daten für den ausgewählten Modus bereit stellt. Dies stellt die vierte Sicherheitsstufe dar.

Wird von einem Benutzer ein Moduswechsel verlangt, so wird vorher der aktuelle Zustand des Ballbots überprüft. Sollten definierte Grenzwerte für

Geschwindigkeit, Neigungswinkel oder Neigungswinkeländerung überschritten sein, wird zunächst versucht diese zu stabilisieren. Falls dies nicht gelingt, wird kein Moduswechsel durchgeführt. Dadurch wird garantiert, dass die Übergänge zwischen den einzelnen Modi jeweils sanft und damit sicher vollführt werden. Dies stellt die fünfte Sicherheitsstufe des Sicherheitskonzeptes dar. In der sechsten Sicherheitsstufe wird überprüft, ob die Eingabedaten mit einer konstanten Frequenz eintreffen. Sollten über einen längeren Zeitpunkt keine Daten empfangen werden, so wird die Eingabe-Node als defekt angenommen und der Ballbot verharrt in seinem aktuellen Zustand.

Sollte ein Unfall unvermeidbar sein und daher der Neigungswinkel des Aufbaus die 30° -Marke überschreiten, so werden alle Motoren abgeschaltet, um Kollateralschäden zu verhindern. Dies ist die siebte und letzte Sicherheitsstufe.

6.2 Steuerungsmethoden

Um den Ballbot zu steuern werden zahlreiche Steuerungsmethoden entwickelt. Dabei handelt es sich sowohl um manuelle Eingabemethoden, bei denen der Benutzer direkt die Kontrolle über den Ballbot übernimmt, als auch um automatische Steuerungsmethoden, bei denen vorgefertigte Eingabedaten verwendet werden, sowie autonome Steuerungsmethoden, bei denen der Ballbot, mithilfe von Sensoren, die Eingabewerte eigenständig generiert.

Dabei werden drei Konzepte verfolgt

- Eingabegeräte
- Trajektorienplanung
- Hinderniserkennung und Interaktion

6.2.1 Steuergeräte

Der Ballbot verfügt im Vergleich zu bekannten Robotern über aussergewöhnliche Eigenschaften wie die Instabilität und die Omnidirektionalität. Diese Kombination ermöglicht ein völlig neues Bewegungsverhalten, unterschiedliche Steuergeräte werden deshalb auf dem Ballbot implementiert und getestet, um das Potential so vollständig wie möglich auszuschöpfen.

Steuerungsmodi

Die manuelle Steuerung des Ballbots kann über unterschiedliche Modi ablaufen, da der Regler unterschiedliche Eingabedaten annehmen kann, wie in

Kapitel 5 beschrieben.

Tests mit der Simulation haben gezeigt, dass insbesondere der Beschleunigungsmodus für Steuergeräte schlecht geeignet ist. Für ein Bremsmanöver in diesem Modus muss der Ballbot in die entsprechende Gegenrichtung ausgelenkt werden, was bei einem omnidirektionalen System eine grosse Herausforderung darstellt, weshalb auf eine Implementierung dieses Modus verzichtet wird.

Das volle Bewegungspotential wird im Geschwindigkeitsmodus ausgeschöpft, die zugehörigen Eingangsgrößen sind die Rotationsgeschwindkeiten der Kugel φ_x und φ_y sowie die Rotation um die Eigenachse ϑ_z . Nachteil an diesem Modus ist, dass der Ballbot nie exakt still steht, da die IMU nie hundertprozentig horizontal ausgerichtet werden kann dadurch immer ein gewisser Drift vorhanden ist. Obwohl dieser Drift manuell mit dem Steuergerät ausgeglichen werden kann, eignet er sich nicht für enge Platzverhältnisse wie z.B. bei Präsentationen. Aus diesem Grund kann zusätzlich noch im Positionsmodus gesteuert werden.

Bei der Vorgabe der Position werden vom Regler die Rotation der Kugel φ_x und φ_y sowie die Rotation um die Eigenachse ϑ_z als Eingaben entgegengenommen. Die vom Eingabegerät generierten Befehle müssen für diesen Modus auf integriert werden, haben aber den Vorteil, dass die vorgegebene Position vom Ballbot auch eingehalten wird und er beim Ausbleiben von weiteren Steuerbefehlen an dieser Position verharrt.

Implementierung

Die Steuergeräte sind in jeweils über eine ROS-Node auf dem Ballbot implementiert, wobei hier der grosse Vorteil dieses Open Source Projektes genutzt werden kann, denn für Steuergeräte sind die benötigten Treiber auf dieser Plattform bereits vorhanden. In Grafik 6.3 ist ersichtlich, dass die von den Steuergeräten generierten Inputs nicht direkt Reglervorgaben sind, sondern zuerst noch den Sollwertfilter passieren müssen. Dieser überprüft laufend, ob die Differenz zwischen vorigen und aktuellen Sollwert eine gewisse Limite nicht überschreitet und greift sonst ein. Schnelle Richtungsänderungen der bedienenden Person sind für den Ballbot deshalb relativ unproblematisch, da sie vom Filter entsprechend angepasst werden.

Testumgebung

Um die Sicherheit der Bedienung zu erhöhen können die geschriebenen ROS-Nodes an der Simulation getestet werden. Realisiert wird dies über eine TCP/IP-Verbindung vom Steuerungscomputer zu einem Computer mit lauffähiger Simulation. So können die Grenzen des Systems annähernd ausgelotet und das Verhalten der Sensoren der Steuergeräte getestet werden.

Dadurch können die Nodes einerseits verifiziert, andererseits aber auch noch optimiert werden. Besonders bei der Implementierung neuer Steuergeräte kann sich dieses Tool profilieren.

Geräte

Der Ballbot kann aktuell mit drei unterschiedlichen Eingabegeräten gesteuert werden. Die Steuerung von einem Joystick, der an den entfernten Computer angeschlossen ist, ist als erstes implementiert worden. Abbildung 6.4 illustriert dabei die Belegung der einzelnen Achsen. Da der Joystick über USB mit dem Rechner verbunden ist, kann der Ballbot nur von dort aus gesteuert werden.



Abbildung 6.4: Achsbelegung des Joysticks (Foto Team Ballbot)

Hier kommen die Vorzüge des zweiten Steuergerätes zum Einsatz, des Joypads. Dieses kommuniziert über eine 2.4 GHz Radiofunkverbindung mit dem Empfänger, der wahlweise an den SBC auf dem Ballbot oder an den

entfernten Rechner angeschlossen werden kann. Dadurch hat der Bediener des Ballbots eine viel grössere Bewegungsfreiheit, wobei die Reichweite des Geräts zum Empfänger zirka 15 m beträgt.



Abbildung 6.5: Achsbelegung des Joypads (Foto Team Ballbot)

Eine ähnlich grosse Bewegungsfreiheit kann mit dem *Qgo sphere*, einem kugelartigen Eingabegerät, erreicht werden. Dieser Prototyp, der dem Team von der Start-Up Firma Quasmo zur Verfügung gestellt wurde, ermöglicht eine sehr intuitive Steuerung des Ballbots durch Kippen und Verdrehen der Kugel wie in Abbildung 6.6 dargestellt. Das Kommunikationsprinzip ist dasselbe wie beim Joypad, wobei die Reichweite mit 6 m etwas geringer ist.



Abbildung 6.6: Achsbelegung des Qgo sphere (Foto Team Ballbot)

Eine weitere Möglichkeit den Ballbot zu steuern, ist die Bewegungsvorgabe von der Tastatur eines entfernten Rechners aus. Von dort kann via Pfeiltasten die Position des Ballbots ebenfalls gesteuert werden, allerdings sind

hier nur sprunghafte und keine kontinuierlichen Eingaben möglich. Die beschriebenen Steuergeräte sind im Rahmen der Bachelorarbeit „Evaluation and Implementation of a Human-Machine Interface for a Ballbot“ [12] evaluiert und getestet worden. Weitere Informationen, Ergebnisse und Diskussionen können daraus entnommen werden.

6.2.2 Trajektoriensteuerung

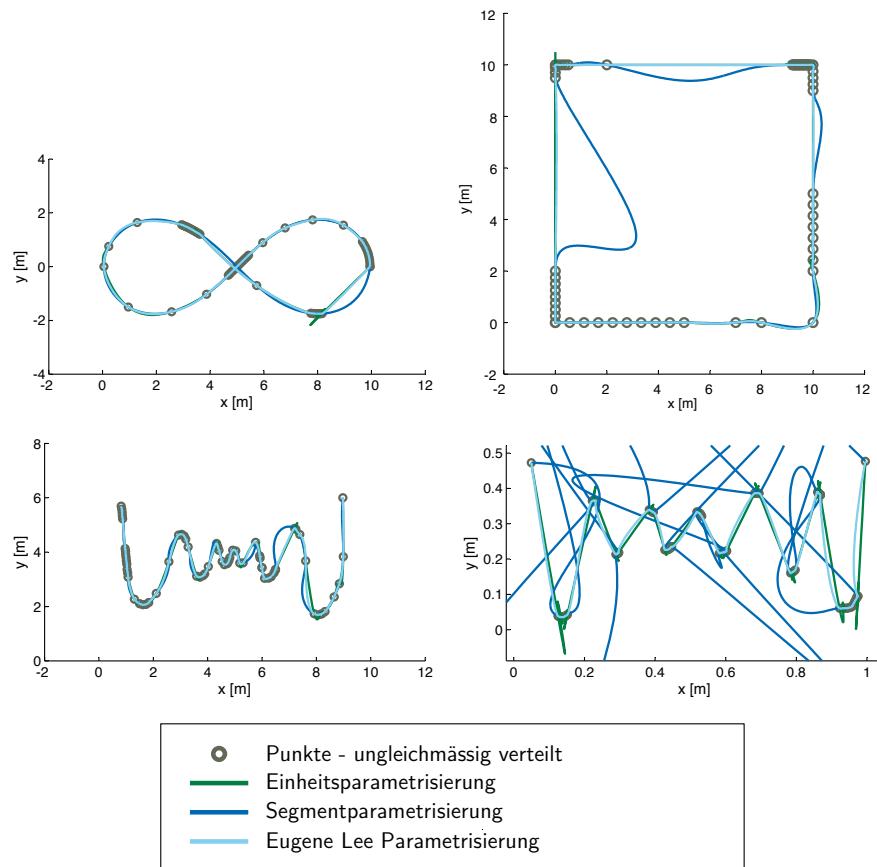


Abbildung 6.7: Verschiedene, dicht gesetzte Vorgabepunkte führen je nach Parametrisierung zu unterschiedlich geeigneten Splinekurven

Durch eine externe MATLAB Software können Rezero Trajektorien vorgegeben werden, die er anschliessend in möglichst kurzer Zeit abfährt. Ein beliebiger Pfad kann per Maus oder einem Graphiktablett von Hand gezeichnet werden, welcher dann durch Splinekurven interpoliert wird.

Parametrisierung und Glättung

Damit unterschiedliche Punktdichten und deren Veränderungen zu ähnlich glatten Pfaden führen, wird eine spezielle Parametrisierung verwendet. Abbildung 6.7 illustriert das Problem. Da die Winkelgeschwindigkeiten des Ballbots kontinuierliche Funktionen der Zeit sind, reichen kubische Splines nicht aus, stattdessen werden Polynome fünften Grades verwendet. Es hat sich gezeigt, dass Polynome vierten Grades sich nicht zur Parametrisierung von Bewegungen eignen, wie Abbildung 6.8 zeigt. Da die Position nicht mit einem Regler überwacht wird, ist eine glattere Kurve für eine geringere Abweichung förderlich. Weil handgezeichnete Kurven durch das Zittern der Hand selbst und durch Ungenauigkeiten ihrer Bewegungen ein hochfrequentes Rauschen in den Punktpositionen entlang der Kurven aufweisen, werden sie durch einen FIR Gaussfilter über den Splineparameter gefiltert. Dieser interpoliert die Kurven in konstantem Abstand über den Splineparameter und filtert die Kurve nach dem „Moving Average“-Prinzip. Dabei wird ein begrenztes Gebiet um den Filterpunkt mit hoher Frequenz interpoliert und das gewichtete Mittel mit einer Kernelfunktion, in diesem Fall eine Gaussnormalverteilung, berechnet. Der Benutzer kann dabei die Stärke des Filters variieren und so unerwünschte Beschleunigungen entlang der Kurve verringern. Außerdem kann die Kurve im gleichen Schritt mit tieferer Frequenz interpoliert werden, was die Anzahl der benötigten Punkte verringert.

Zeitoptimierung

Nachdem die geometrischen ersten Ableitungen $\dot{\underline{r}}(l)$ der geglätteten Kurve gefunden worden sind, wird die Kurve linear interpoliert. Anstatt die Parameterfunktion $l(t)$ des Ortsvektors $\underline{r}(l(t))$ willkürlich zu wählen, wird sie unter Minimierung der Durchlaufzeit gefunden. Die Optimierungsfunktion variiert dabei die Durchlaufzeiten der einzelnen Splinessegmente und prüft dabei in jedem Iterationsschritt, ob die maximale Geschwindigkeit, Beschleunigung und deren zeitliche Änderung des Roboters eingehalten werden. Im Anschluss werden die nötigen Geschwindigkeitssollwerte interpoliert. Dabei ist es möglich, zwischen konstanter Ausrichtung des Ballbots oder Blickrichtung immer tangential zur Trajektorie zu wählen. Im zweiten Fall wird während der Optimierung auch die maximale ϑ_z -Rotation vorgegeben.

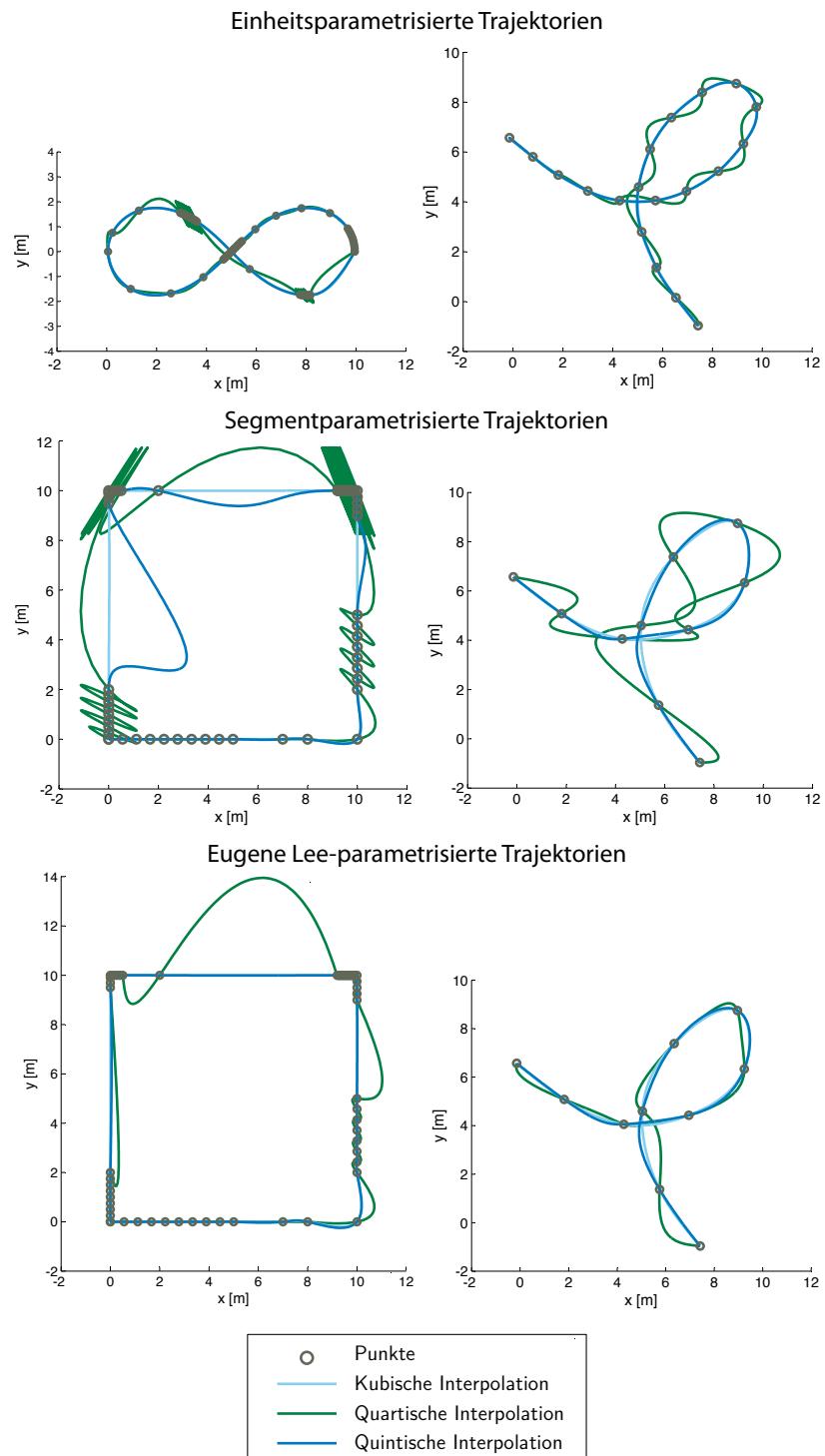


Abbildung 6.8: Der Grad der Splinepolynome hat wesentlichen Einfluss auf die Form der Trajektorien

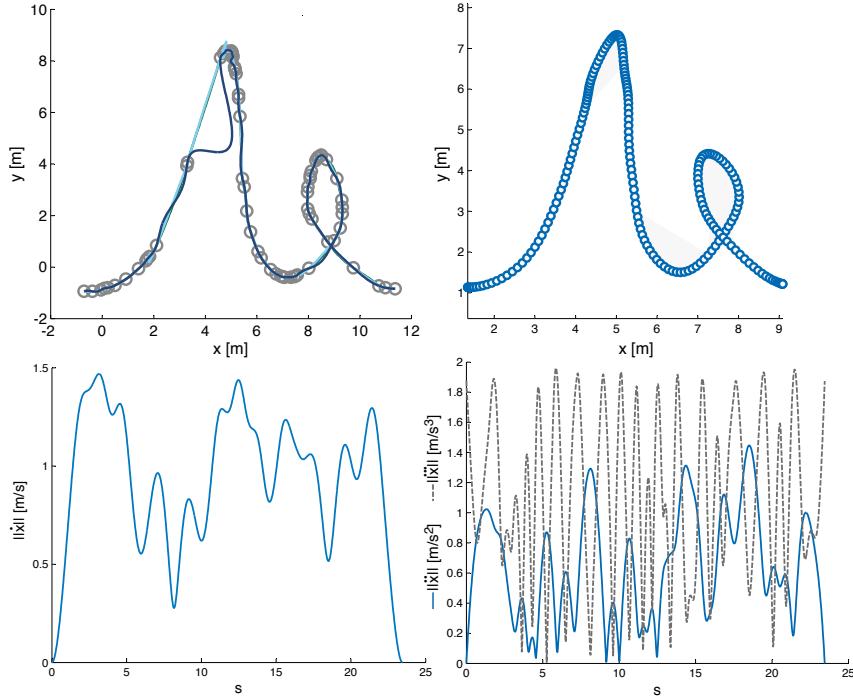


Abbildung 6.9: Nach der Parametrisierung und Glättung (oben links) wird die Trajektorie zeitoptimiert, so dass Brems- und Beschleunigungsphasen entstehen (oben rechts). Die beiden unteren Graphiken zeigen die absolute Geschwindigkeit des Ballbots entlang der Kurve (links) sowie die Verläufe der Beschleunigung und ihrer Ableitung (rechts).

Implementierung

Die Daten werden über eine TCP/IP-Verbindung aus einem Simulink-Modell drahtlos an den Ballbot geschickt. Die ROS-Node „trajectory_ros_pub“ setzt dabei zur Datenübertragung einen Server auf und speichert die vom Matlab-Client empfangenen Daten in einer Binärdatei. Dies ermöglicht das jederzeitige Abspielen einer beliebigen, gespeicherten Trajektorie. Zur Detektierung von Datenübertragungsfehlern wird eine einfache Checksumme eingesetzt.

Eine graphische Benutzeroberfläche erlaubt die Automatisierung des Prozesses und gibt dem Benutzer die nötige Kontrolle. Außerdem erlaubt sie die Verifikation der erzeugten Trajektorien anhand der 3D-Simulation. Die erreichten Resultate werden kurz in Kapitel 7 präsentiert.

Die beschriebenen Algorithmen wurden innerhalb der Bachelorarbeit „Trajectory Planning for a Ballbot“[6] entwickelt. Für tiefergehende Informationen und eine Diskussion der Ergebnisse sei auf diese referenziert.

6.2.3 Interaktion und Hinderniserkennung

Interaktion und Hinderniserkennung bestehen insgesamt aus den folgenden drei Teilen:

- Tracking
- Hinderniserkennung
- Interaktion

Tracking

Sowohl die Hinderniserkennung als auch die Interaktionsmodi benötigen Informationen über die Position und nach Möglichkeit auch über die Geschwindigkeit der Objekte, die sich in unmittelbarer Nähe des Roboters befinden. Da die Ultraschallsensoren lediglich eine Messung pro Sensor, sprich eine Messung pro 60° liefern, sind diese für das Tracking nicht geeignet. Daher kommt der wesentlich präzisere Laserdistanzsensor zum Einsatz.

Der Tracking-Algorithmus besteht aus:

1. Detektieren der Kanten der Objekte
2. Zuordnen von Kanten zweier aufeinanderfolgender Messungen
3. Berechnung der Objektgeschwindigkeit

Eine Kante eines Objekts ist definiert als die erste und die letzte Wert einer zusammenhängenden Messreihe mit Distanz kleiner der maximalen Messdistanz. Ein Paar aus rechter und linker Kante repräsentiert somit Anfang und Ende eines Objekts im Messbereich. In einem ersten Schritt werden diese Kanten aus den Messdaten des Laserdistanzsensors herausgerechnet und so die Anzahl der Objekte bestimmt.

In einem zweiten Schritt werden dabei die Kanten der Objekte aus den aktuellen Messdaten denjenigen der Objekte aus den vorangegangenen Messdaten zugeordnet. Diese Zuordnung erfolgt auf der Basis des Abstands der Kanten. So werden zwei möglichst nah beieinanderliegende Kanten einander zugeordnet. Hierbei gibt es einen Maximalabstand zwischen zwei Kanten, sodass nicht beliebige Kanten einander zugeordnet werden. Zudem wird überprüft ob Kanten des gleichen Objekts wiederum einem einzigen Objekt zugeordnet werden.

Aus den Mittelwerten der Distanz- und Winkeländerung der Messdaten der

Kanten, kann die Radial- und die Tangentialkomponente der Geschwindigkeit jedes Objekts berechnet werden. Für die Hinderniserkennung wird die Geschwindigkeit in kartesischen Koordinaten benötigt, welche durch eine geometrische Transformation aus den Radial- und Tangentialkomponenten errechnet wird.

Hinderniserkennung

In den letzten Jahren wurden zahlreiche Hinderniserkennungsalgorithmen entwickelt. Allerdings verwenden viele dieser Algorithmen ein statisches Modell der Umgebung, d.h. sie berücksichtigen die Bewegung von einzelnen Objekten nicht. Zudem respektieren sie die Bewegungscharakteristik des Roboters nicht. Beide Punkte sind jedoch sehr kritisch, da Rezero in einem belebten Umfeld fährt und selbst sehr agil ist. Nach einer Evaluation [23] ist entschieden worden, das Prinzip der „Velocity Obstacles“ (VO) [24] anzuwenden.

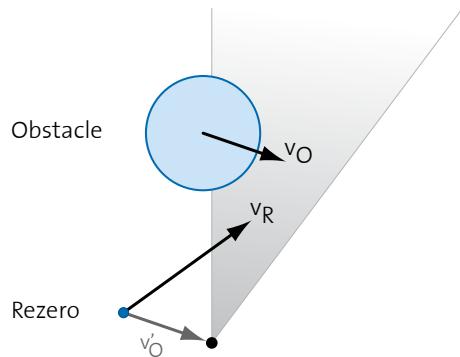


Abbildung 6.10: Prinzip der Velocity Obstacles

Bei diesem Prinzip wird die Relativgeschwindigkeit zwischen Roboter und Objekt betrachtet. Alle Relativgeschwindigkeiten, die dabei zu einer Kollision führen würden, werden markiert. Alle Kollisionsgeschwindigkeiten ergeben einen Kreisausschnitt, den sogenannten „Collision Cone“ (CC) (in Abbildung 6.10 grau eingefärbt). Für jedes Objekt wird demnach der Collision Cone berechnet. Geschwindigkeiten, die in keinem CC liegen, können als sicher angenommen werden. Um ein möglichst exaktes und effektives Ausweichmanöver fahren zu können, wird ein Suchbaum mit möglichen Geschwindigkeiten aufgebaut. Dabei wird die Position und Geschwindigkeit des Roboters

vorausgeplant und somit der Suchbaum weiter gefüllt.

Damit die Bewegungen des Roboters geplant werden können, braucht es ein geeignetes Modell. Da das Simulink-Modell nicht echtzeitfähig ist, wurde nach einer Alternative gesucht. Als beste Lösung stellte sich ein „Lookup-Table“ heraus. Dies ist ein Datensatz, der abhängig vom aktuellen Zustand des Systems und den Sollwerten den zukünftigen Zustand des Systems voraussagt. Dieser Lookup-Table wird mithilfe des Simulink-Modells erstellt und entspricht somit, von der Genauigkeit her, dieser des Modells.

Als letztes werden Kriterien definiert, anhand dessen der Suchbaum durchsucht wird. Da in diesem Fall die Vorgaben für die Geschwindigkeit von einem anderen Eingabegerät kommen, wird versucht eine möglichst winkelnahe Geschwindigkeit mit ähnlich grossem, aber keinesfalls höheren Betrag zu finden.

Interaktion

Im folgenden werden die Interaktionsmodi genauer erläutert:

- Folgen (siehe Abbildung 6.11(a))
- Umkreisen (siehe Abbildung 6.11(b))
- Spiegeln (siehe Abbildung 6.11(c))

Beim Modus „Folgen“ versucht Rezero den Abstand zum interagierenden Objekt konstant zu halten. Dabei kommt ein PD-Regler, welcher den Abstand regelt, zum Einsatz. Zudem wird die Ausrichtung in Richtung Objekt durch die Eigenrotation beibehalten. Gesteuert wird der Ballbot dabei im Geschwindigkeitsmodus, sodass agile Bewegungen möglich sind. In diesem Modus kann eine interagierende Person den Ballbot mitziehen oder davontreiben, ohne ihn zu berühren.

Eine Abwandlung dieses Modus ist das Umkreisen. Im Gegensatz zum Folgen wird hier nicht nur die Radialgeschwindigkeit des Roboters angesteuert, sondern auch die Tangentialgeschwindigkeit. Durch einen konstanten Sollwert auf letzteren beginnt der Roboter seitlich wegzudriften. Dabei richtet er sich konstant nach dem Objekt aus und korrigiert seinen Abstand. Falls das Objekt still steht, fährt Rezero in kreisförmigen Bewegungen um dieses herum. Dadurch simuliert Rezero Neugierde und Verspieltheit. Selbstverständlich kann das interagierende Objekt (oder die Person) sich auch bewegen, wodurch Zykloidenbewegungen entstehen.

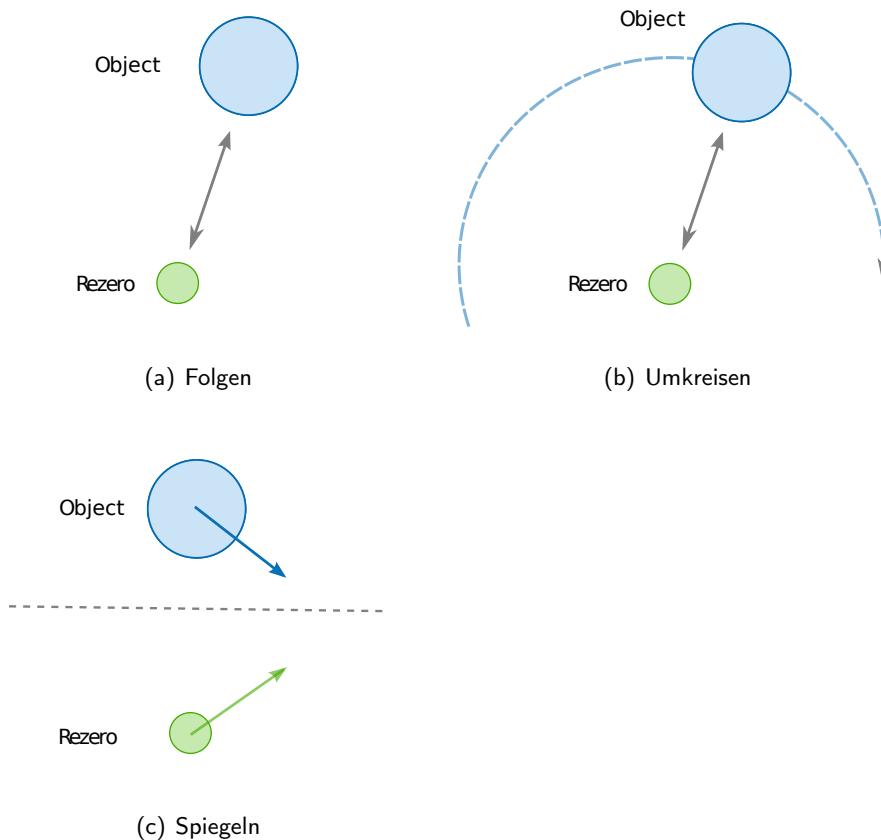


Abbildung 6.11: Die drei verschiedenen Interaktionsmodi

Der letzte Modus ist das Spiegeln, bei dem Rezero die translatorischen Bewegungen des interagierenden Objekts kopiert. Hierbei wird die Ausrichtung des Roboters konstant gehalten. Mithilfe der Odometrie kann der Abstand geregelt werden. Hierbei ist es aber genau umgekehrt: Bewegt sich das Objekt von Rezero weg, so bewegt sich dieser ebenfalls weg. Bei seitlichen Bewegungen folgt Rezero einfach den Bewegungen mit gleichen seitlichen Bewegungen. Man kann sich eine Art Spiegellinie zwischen Rezero und dem Objekt vorstellen.

Die beschriebenen Interaktionsmodi wurden innerhalb der Bachelorarbeit „Obstacle Management and Interaction of a Ballbot“ [23] entwickelt, detaillierte Resultate können daraus entnommen werden.

6.3 Schnittstellen

6.3.1 Benutzereingaben

Remotekonsole

Zum Steuern des Ballbots stehen verschiedene Möglichkeiten zur Verfügung. So können die verschiedenen Nodes per Remotekonsole (SSH) von einem entfernten Rechner aus gestartet werden. Damit können auch Daten und das Verhalten einzelner Nodes analysiert werden.

Da der Moduswechsel manuell erfolgt, wird dieser zunächst auch über die Konsole realisiert. Da schnell zahlreiche Modi entwickelt wurden, müssen diese vom User unterschieden werden. Dazu kommt ein Benutzerinterface auf Konsolenbasis zum Tragen. Aus einer Mischung von Tastaturein- und Konsolenausgaben entsteht eine interaktive Schnittstelle.

Die Konsole kann ebenfalls dazu verwendet werden das System zu administrieren und Updates einzuspielen.

Remotedesktop

Mit dem Wechsel von Debian 5.0, das keine grafische Grafikoberfläche besitzt, auf Ubuntu mit Gnome vorinstalliert, entstand die Möglichkeit der Remotedesktopverwaltung. Dabei kann die grafische Ausgabe des Linux-Boards auf den eigenen Rechner umgeleitet werden, sodass ein Arbeiten wie auf einem lokalen Computer ermöglicht wird.

Web-GUI

Die Handhabung über die Konsole erfordert fachspezifisches Wissen. So muss dem Benutzer bekannt sein, welche Programme er in welcher Reihenfolge zu starten hat. Zudem wird ggf. sogar ein separates Programm für den Zugriff benötigt. Um dieses Problem zu umgehen wurde ein sogenanntes Web-GUI entwickelt wie in Abbildung 6.12 dargestellt. Dabei handelt es sich um eine grafische Oberfläche, die auf Website-Basis läuft. Dies bedeutet, dass der Benutzer einen gewöhnlichen Browser verwenden kann um den Ballbot zu steuern. So können grafisch die gewünschten Operationen gestartet werden, während im Hintergrund auf die korrekte Einhaltung der Reihenfolge und des Startprozederes geachtet wird. Ziel ist es, die Steuerung zu vereinfachen ohne den Benutzer zu sehr einzuschränken.

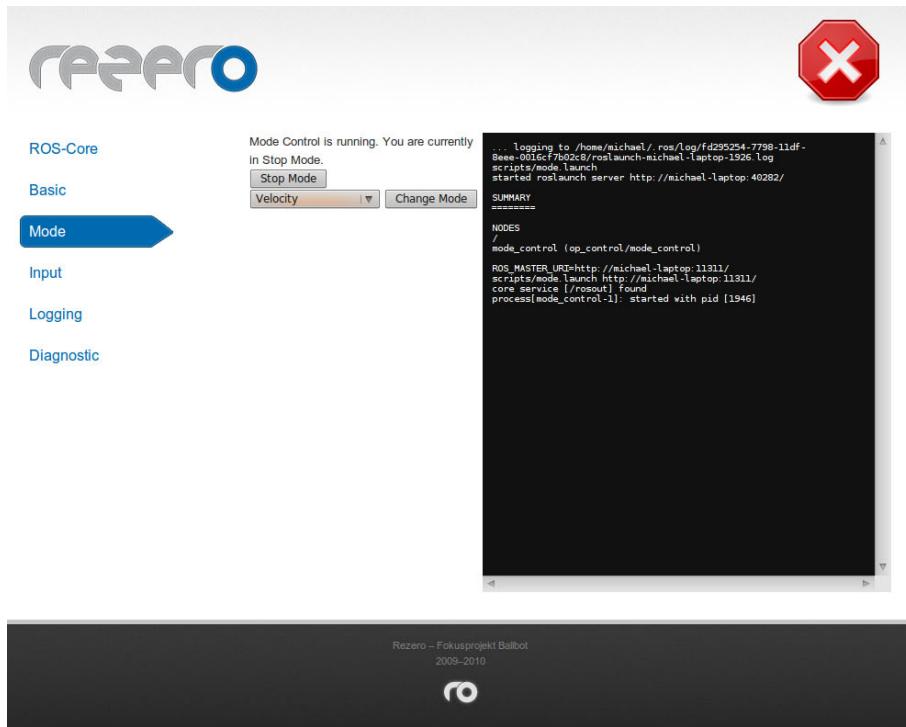


Abbildung 6.12: Grafisches User Interface auf Basis einer Website

Damit die Steuerung möglichst einfach ist und keine zusätzlichen Geräte nötig sind, läuft der Webserver direkt auf dem Linuxboard. Da dieses über ausreichend Leistung verfügt, stellt dies kein Problem dar. Als Frontend wird eine einfache HTML-basierende Website verwendet. Das Backend wurde in PHP entwickelt, welches via Shellskripte entsprechend die Befehle ausführt. Damit das Web-GUI den Benutzer in seinen Möglichkeiten nicht zu sehr beschränkt, wird die Konsolenausgabe umgelenkt und ebenfalls im Web-GUI dargestellt.

So ist es mithilfe des Web-GUIs möglich den Ballbot zu starten, Modi zu wechseln und Trajektorien sowie den Datanlogger zu starten. Zudem enthält das Web-GUI diverse Administrations- und Analysewerkzeuge. So können einzelne Nodes manuell beendet werden oder Log-Daten verwaltet werden. Da ein Access-Point direkt auf dem Ballbot verbaut ist, genügt sogar ein Smartphone (sprich ein Handy mit Browser und WLAN-Unterstützung) um den Ballbot zu steuern.

6.3.2 Messdatenaufzeichnung

Datenlogger

Um die Daten, welche bei den Tests gewonnen werden können, auszuwerten, wurden diese am Anfang direkt über die serielle Schnittstelle des Atmel in MATLAB ausgelesen. Dies hat den Nachteil, dass eine Kabelverbindung vom Ballbot zu einem mit MATLAB vorhanden sein muss. Daher wurde für Tests ohne Kabelanbindung ein neuer Datenlogger geschrieben. Mit diesem werden die Daten aus dem ROS in eine binäre Datei geschrieben, welche dann vom Linuxboard heruntergeladen und wiederum in MATLAB ausgelesen und dargestellt werden kann.

Live Datenlogger und Simulation

Durch eine zusätzliche WLAN-Schnittstelle über ein TCP/IP Protokoll können die Nachrichten aus dem ROS direkt an Matlab/Simulink gesendet werden, wo die entsprechenden Plots direkt visualisiert werden können, noch während der Ballbot in Betrieb ist. Dies ermöglicht dem Team die Resultate sofort zu analysieren und mögliche Fehler direkt zu erkennen. Aufgrund des langen Kommunikationsweges und der dabei entstehenden Verzögerungen beim Senden und Empfangen der Daten werden diese diskret dargestellt und erreichen nicht die Qualität des normalen Datenloggers.

Ein zusätzlicher Vorteil der direkten Darstellung liegt in der Simulation. Mit den empfangenen Daten vom Ballbot können die Zustände in der Visualisierung mit minimaler Verzögerung gezeigt werden.

Rosbag

Mithilfe von sogenannten „Bag“-Dateien können publizierte Daten in ROS aufgezeichnet und auch wieder abgespielt werden. Der grosse Vorteil dieser Methode ist, dass tatsächlich alle vorhandenen Daten oder auch nur vorselektierte Topics aufgezeichnet werden können. So können einzelne Testversuche wiederholt werden können, ohne den tatsächlichen Test erneut durchzuführen. Zudem können ROS-interne Analysewerkzeuge verwendet werden oder aber auch Plots direkt in ROS erstellt werden. Des weiteren können diese Daten kopiert werden, sodass diese in Ruhe ausgewertet werden können, ohne dass der Roboter selbst gebraucht wird.

Ein grosser Nachteil ist, dass die Daten gegebenenfalls nicht exakt zu den gleichen Zeiten und mit den selben Frequenzen wiedergegeben werden kön-

nen. Zudem können Bag-Files, je nach Anzahl der aufgenommenen Topics, sehr schnell viel Speicherplatz einnehmen.

6.3.3 Kommunikation mit externer Hardware

Wie im Abschnitt 6.1.1 beschrieben, stellt ROS zahlreiche Hilfsmittel zur Verfügung, die die Kommunikation mit zusätzlich angebrachten Komponenten stark erleichtert und vereinfacht. Zudem existieren Tutorials, die einen leichten und spielerischen Zugang zur angeschlossenen Hardware ermöglichen. Viele Probleme, die bei der Inbetriebnahme auftreten können, sind online dokumentiert und helfen bei der Fehlerbehebung.

Inbetriebnahme des Laserdistanzsensors

Der eingesetzte Laserdistanzsensor ist vom Hersteller Hokuyo. Für diese Art von Sensor existiert in ROS eine vorprogrammierte Node, die mittels eines kurzen Tutorials in Betrieb genommen werden kann und bereits alle benötigten Treiber enthält. Erste Visualisierungen werden mit wenigen Handgriffen ermöglicht. Die Laserrange-Node kommuniziert mit dem Laserdistanzsensor und returniert einen Vektor, in dem alle gemessenen Distanzwerte abgelegt sind. Der Sichtwinkel kann dynamisch, d.h. während der Laufzeit, jederzeit verändert werden. Die Anzahl Messungen hängt von der Auflösung des Sensors sowie des Sichtwinkels ab. Die resultierenden Daten können leicht aufbereitet und mittels Topics in ROS zur weiteren Verwendung zur Verfügung gestellt werden.

Inbetriebnahme der Ultraschallsensoren

Die zwei Ultraschallsensoren sind auf zwei unterschiedliche Weisen zum Laufen gebracht worden. So kann die Ausgabe der Messung durch eine analoge Spannung, eine Pulsweitenmodulation oder ein serielles Signal erfolgen. Nach ersten Messungen ist entschieden worden, die analoge Spannung der Pulsweitenmodulation aufgrund der schnelleren Zugriffszeiten vorzuziehen. Hochfrequentes Rauschen wird durch einen Tiefpassfilter eliminiert und das Messsignal anschliessend über den Analog-Digital-Eingang des Heliosboards eingelesen. Anschliessend werden die Sensordaten zu einem Topic publiziert. Nach dem Defekt des Heliosboards, müssen die Ultraschallsensoren über den fitPC betrieben werden. Dieser verfügt über keinen AD-Eingang. Daher wird die serielle Schnittstelle der Ultraschallsensoren verwendet. Mittels einer

TTL²-Verbindung kann der serielle Ausgang zu USB konvertiert werden. Ein virtueller COM-Port wird dadurch zur Verfügung gestellt. Die Sensoren können über diesen angesprochen und ausgelesen werden. Der starke Nachteil liegt darin, dass die beiden Sensoren im Gegensatz zur Ansteuerung über das Heliosboard nicht mehr getrennt angesprochen werden können und es daher zu Interferenzphänomenen kommt. Auch hier wird eine Outlayerfilterung vorgenommen und die Werte anschliessend in ROS publiziert.

Kommunikation von Mikrocontroller und fitPC

Die Kommunikation von Mikrokontroller und Linuxboard erfolgt über eine serielle Schnittstelle. Dafür kommen zwei Nodes, „send“ und „receive“³, zum Einsatz.

Die dabei vom Mikrocontroller empfangenen Daten, werden mit einer Checksumme auf Übertragungsfehler überprüft und bei Fehlerlosigkeit entsprechend einer Codierung ausgewertet. Die Daten werden in einem Array geschickt. Die Codierung legt fest, welche Einträge welchen Werten entsprechen. Gemäss momentanem Stand werden folgende Messdaten vom Mikrokontroller zum fitPC geschickt:

Sensordaten

- Winkel des Aufbaus: $\vartheta_x, \vartheta_y, \vartheta_{z,abs}$
- Winkelgeschwindigkeiten des Aufbaus: $\dot{\vartheta}_x, \dot{\vartheta}_y, \dot{\vartheta}_z$
- Kugelwinkel: $\varphi_x, \varphi_y, \varphi_z$
- Kugelwinkelgeschwindigkeiten: $\dot{\varphi}_x, \dot{\varphi}_y, \dot{\varphi}_z$

Weiter Daten, die für den Datenlogger und anschliessende Visualisierung von Interesse sind

- Position in x- und y-Richtung und ihre Ableitungen
- Messwerte (Rohdaten) der Gyroskope
- Geschwindigkeiten der Omniwheels: $\dot{\psi}_1, \dot{\psi}_2, \dot{\psi}_3$
- Motorenströme: I_1, I_2, I_3

Ebenso sind die Werte interessant, die vom Sollwertfilter aufgrund der Inputs erzeugt worden sind.

²Transistor-transistor logic, a digital circuit

³Eine genaue Beschreibung befindet sich in Abschnitt 6.1.2.

- Position in x- und y-Richtung
- Rotationswinkel: $\vartheta_{z,abs}$
- Geschwindigkeiten und Beschleunigungen in x- und y-Richtung

Alle erhaltenen Daten werden in einem Topic anderen Benutzern zur Weiterverwendung zur Verfügung gestellt.

Sollwertvorgaben für den Regler werden ebenfalls über die serielle Schnittstelle übertragen. Aktuell werden die folgenden Daten übertragen:
Sollwertvorgaben für den Regler

- Regelmodus: *mode*
- Rotationswinkel: $\vartheta_{z,abs}$
- Sollwert in x: *inputx*
- Sollwert in y: *inputy*

Das Senden und Empfangen ist entkoppelt, damit bei einem Ausfall nicht die gesamte Kommunikation zusammenbricht. So kann der Roboter auch ohne empfangene Daten weiterhin gesteuert oder abgestellt werden.

7 Leistungsanalyse

Aufgrund der frühen Realisierung des AS-Prototypen, kann der Regler am System getestet und optimiert werden. Dies erlaubt es schon nach kurzer Zeit ein funktionierendes System zu haben, an welchem weitere Software getestet werden kann. Bei verschiedenen Systemtests werden die Regelparameter genau nachgestellt, sowie die verschiedenen Steuerungsmethoden getestet. Um die Sicherheit zu gewährleisten, dass der Prototyp bei den Tests nicht zu Schaden kommt, ist er jeweils an einem fahrbaren Gestell gesichert.

In den folgenden Abschnitten werden einige Tests beschrieben und deren Resultate aufgezeigt.

7.1 Regelung

7.1.1 Balancieren

Eine der Grundfähigkeiten eines Ballbots ist das Balancieren am Ort. Um nicht umzufallen, muss der Roboter die Abweichung von der Sollposition ständig korrigieren.

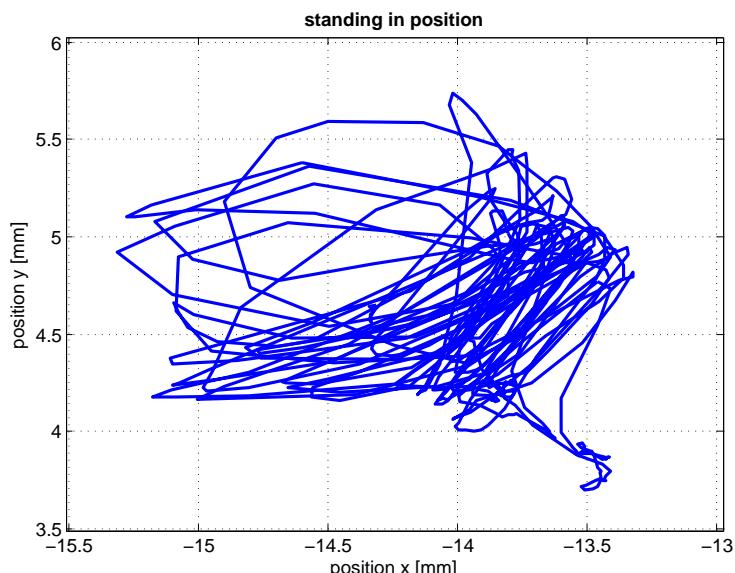


Abbildung 7.1: Bewegungen des Ballbots während dreissig Sekunden

Nach ersten Anpassungen ist es möglich gewesen, den Prototypen stabil zum Stehen zu bringen. Anschliessend ist der Regler soweit optimiert worden, bis der Ballbot ohne sichtbaren Bewegungen des Aufbaus stehen kann. Aufgrund des Rauschens auf den Sensordaten ist es nicht möglich, die Verstärkung des Reglers soweit zu erhöhen, dass der Ballbot still steht, ohne auf den Reglerausgang einen Tiefpassfilter anzuwenden. Mit letzterem und entsprechend erhöhten Reglerverstärkungen ist es möglich, wie in Abbildung 7.1 dargestellt, auf einer Fläche von 4 mm^2 zu balancieren.

Der optimierte Regler weist eine wesentlich geringere Robustheit auf, da der Tiefpassfilter eine merkliche Verzögerung mit sich bringt. Daher wird dieser Modus hauptsächlich zu Demonstrationszwecken verwendet, bei denen äussere Einflüsse auf ein Minimum reduziert werden können.

7.1.2 Sollwertsprung

Um die Auswirkungen verschiedener Regelparameter untereinander vergleichen zu können, werden unterschiedliche Sollwertsprünge auf das System gegeben. Dazu wird ein Joystick so konfiguriert, dass auf Knopfdruck Positionssprünge von einem halben bis zwei Meter vorgegeben werden können. Abbildung 7.2 zeigt die Sprungantwort bei einem Sprung von 1,5 m.

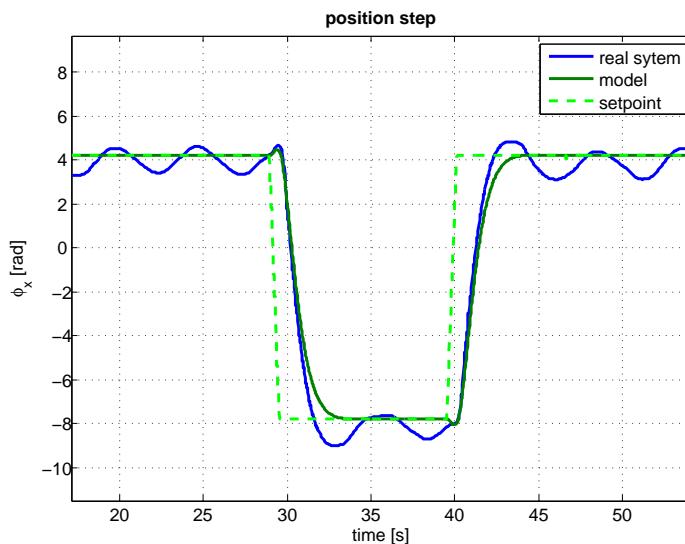


Abbildung 7.2: Sprungantwort des Prototypen auf einen Positionssprung von 1,5 m

Wenn der Ballbot am Ort stehen soll, oszilliert er etwas um die Sollposition, da für diesen Test ein robuster Regler im Einsatz ist. Dieser weist ein sehr tolerantes Verhalten gegenüber Störungen, wie zum Beispiel ein Anstossen,

auf. Der Sprung selbst jedoch wird sehr schnell und präzise durchgeführt und stellt die Basis für weitere komplexere Bewegungsabläufe dar.

7.1.3 Höchstgeschwindigkeit

Ein Ziel dieses Projektes ist es, den schnellsten Ballbot zu entwickeln. Um diesen Nachweis zu erbringen, sind zahlreiche Tests durchgeführt worden. Bei diesen Tests hat sich herausgestellt, dass die maximale Geschwindigkeit, die als Sollwert vorgegeben werden kann, etwa 2 m/s beträgt. Bei höheren Geschwindigkeiten beginnt sich das System aufzuschwingen. Dieses Problem kann behoben werden, indem ein nichtlinearer Regler in Abhängigkeit der Geschwindigkeit angewendet wird, was Bestandteil weiterer Optimierungen sein wird.

Wenn jedoch nur der Winkel stabilisiert wird, was bedeutet, dass der Regler den Ballbot zwar in aufrechter Position hält, sich aber nicht um Position und Geschwindigkeit kümmert, können höhere Geschwindigkeiten erreicht werden. Man kann dem Ballbot dann durch einen Anstoss eine Anfangsauslenkung geben, was einer Beschleunigung entspricht. Der Regler stellt dabei den ausgelenkten Winkel wieder auf Null zurück und der Roboter fährt stabil mit konstanter Geschwindigkeit, bis er manuell abgebremst wird. Die maximale Geschwindigkeit, welche in diesem Modus erreicht werden kann, ist in Abbildung 7.3 dargestellt und beträgt 3,5 m/s.

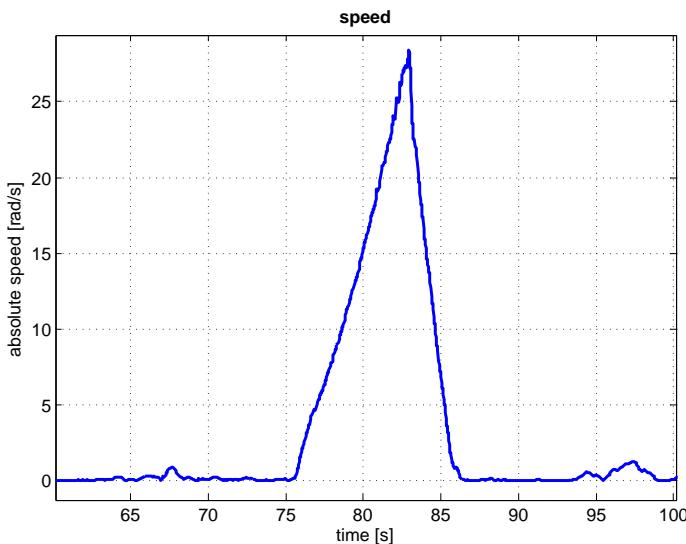


Abbildung 7.3: Höchste gemessene Geschwindigkeit in rad/s

7.1.4 Neigungswinkel

Um möglichst agile Bewegungen zu ermöglichen, sind hohe Beschleunigungen notwendig. Diese lassen sich anhand des folgenden Tests demonstrieren: Mit dem Joystick werden Geschwindigkeitssprünge von 0 m/s auf 1,5 m/s und dann von 1,5 m/s direkt auf $-1,5$ m/s und wieder zurück vorgegeben, was einem hin- und herfahren des Ballbots entspricht, wobei beim Richtungswechsel die maximalen Beschleunigungen auftreten. Beschleunigungen sind direkt an den Neigungswinkel des Ballbots gekoppelt. Wie in Abschnitt 2.5.3 hergeleitet, gilt die Beziehung $a = g \cdot \tan \vartheta$, wobei ϑ der Neigungswinkel ist. Wie in Abbildung 7.4 ersichtlich, ist der bei diesem Test maximal auftretende Neigungswinkel 17° , was einer Beschleunigung von 3 m/s^2 entspricht.

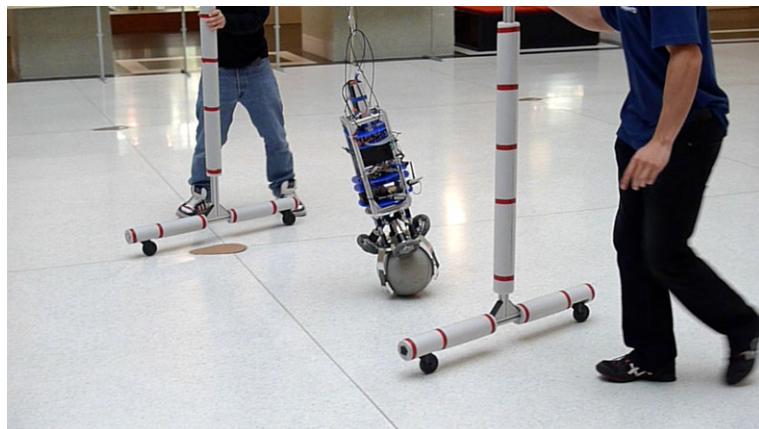
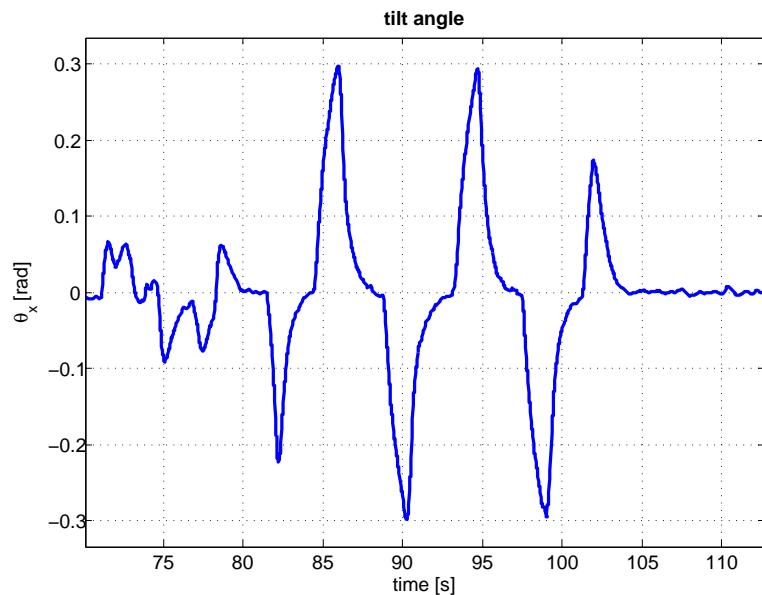


Abbildung 7.4: Plot und Foto der Neigungswinkel bei Geschwindigkeitssprüngen

7.2 Steuerung

7.2.1 Joypad

Wie in Kapitel 6 beschrieben, kann der Ballbot mit verschiedenen Geräten gesteuert werden, eines davon ist das Joypad. Damit kann der Ballbot direkt über eine kabellose Verbindung kontrolliert werden. Bevor das Steuergerät am Prototypen angewendet worden ist, war es in der Simulation getestet worden. Das Joypad wird auch für diverse andere Tests verwendet und ist aufgrund seiner Handlichkeit und dem kabellosen Einsatz das meist verwendete Steuergerät. In Abbildung 7.5 ist eine Testfahrt mit dem Joypad dargestellt.

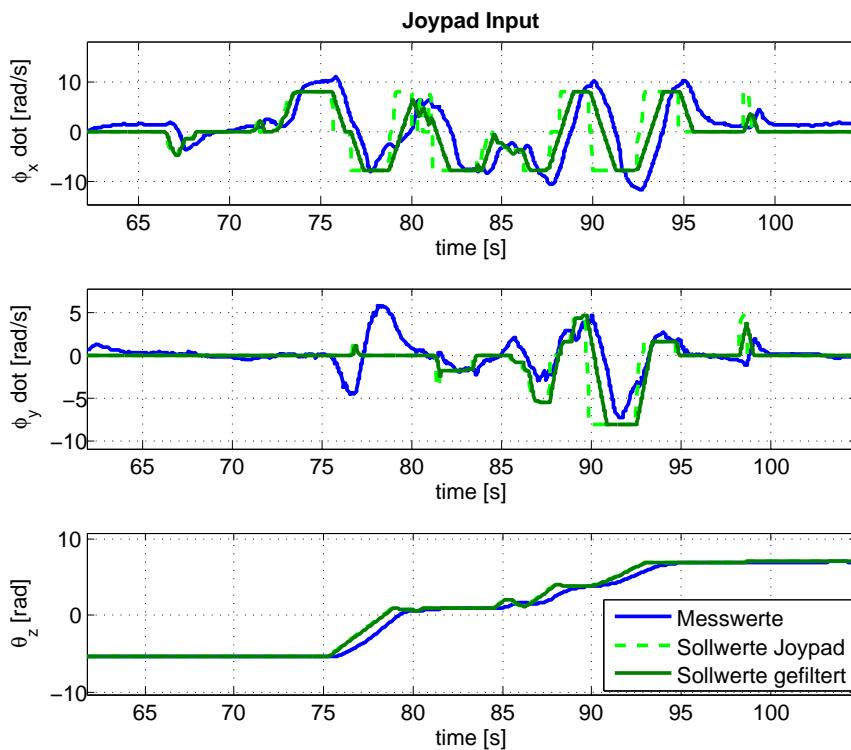


Abbildung 7.5: Vom Joypad generierte Geschwindigkeitssollwerte und die tatsächlichen Geschwindigkeiten

Die ersten beiden Graphen stellen die Geschwindigkeiten in x- und y-Richtung dar. Die Sollwerte welche vom Joypad generiert werden (grün gestrichelt), werden von einem Sollwertfilter (grün ausgezogen) noch abgeflacht. Der unterste Plot zeigt die Rotation des Ballbots um die eigene Achse. Die blaue Kurve stellt die tatsächliche Geschwindigkeit und Ausrichtung des Ballbots dar, welche recht gut mit den Vorgaben übereinstimmen. Die Abweichung

im mittleren Plot zwischen Sekunde 75 und 80 ist auf Kopplungseffekte zurückzuführen.

7.2.2 Trajektorie

Abbildung 7.6 illustriert eine auf dem Computer gezeichnete Trajektorie, welche, als zeitoptimierte Geschwindigkeitssollwerte, an den Prototypen geschickt wird. Die Sollwerte werden fix vorgegeben, wobei die tatsächliche Bewegung keinen Einfluss auf zukünftige Sollwerte mehr hat. Die vom Prototypen zurückgelegte Trajektorie stimmt daher am Anfang sehr gut mit den Sollwerten überein. Mit zunehmendem Abstand zum Startpunkt nimmt auch der Fehler zu. Dieser basiert auf, bei der Modellierung vernachlässigten, Effekten, wie zum Beispiel dem Durchrutschen der Kugel oder Reibungswiderständen. Man kann aber sehen, dass die Form der gefahrenen Trajektorie bis zum Schluss mit der gezeichneten übereinstimmt.

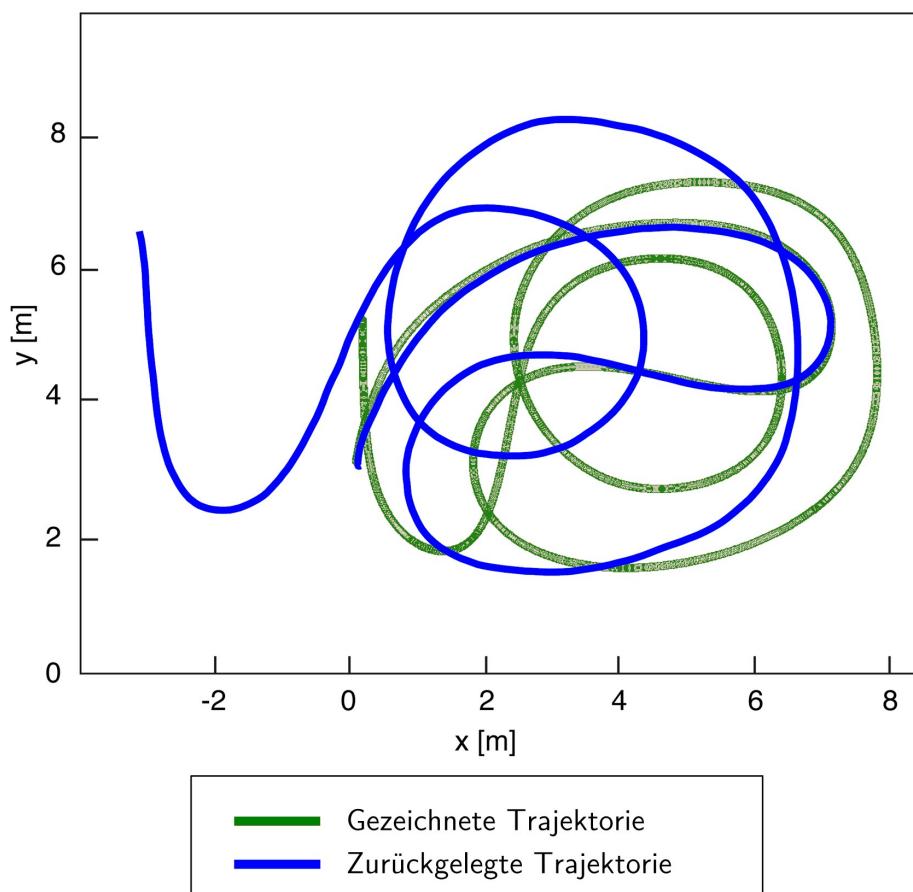


Abbildung 7.6: Vergleich einer vorgegebenen Trajektorie mit der tatsächlichen Fahrt

7.2.3 Interaktion

Eine weitere Steuerungsmethode ist die autonome Interaktion mit einem Objekt (meist eine Person), siehe auch Abschnitt 6.2.3. Abbildung 7.7 zeigt die Sollwerte (grün) und die entsprechenden Messgrößen (blau), die während einer autonomen Fahrt generiert werden, bei welcher der Ballbot mit einem konstanten Abstand einer Person folgt und sich stets nach dieser ausrichtet. Die Sollwerte für $\dot{\varphi}_x$ entstehen wenn die Person sich vom Ballbot entfernt oder auf ihn zugeht. Der Ballbot wird dabei so ausgerichtet, dass er immer in Richtung der Person schaut, was man im untersten Plot erkennen kann. Wenn die Person um den Ballbot herumläuft dreht dieser sich um die eigene Achse. Auf die seitliche Achse (mittlerer Plot) werden keine Sollwerte gegeben. Wie man den Plots entnehmen kann, hat sich die Testperson zunächst vom Roboter entfernt (Sekunde 15–22), sich diesem anschliessend wieder genähert (Sekunde 22–27) und ist zuletzt im Gegenuhrzeigersinn um den Ballbot herum gelaufen (Sekunde 40–60).

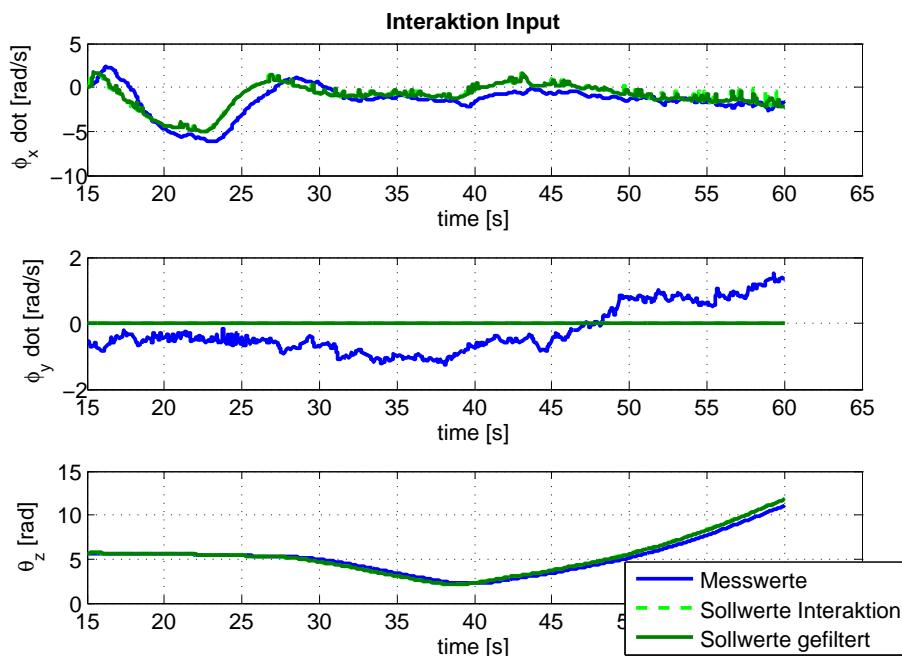


Abbildung 7.7: Geschwindigkeitssollwerte und Messwerte einer autonomen Interaktionsfahrt

8 Zusammenfassung

8.1 Projektresultate

Das Fokusprojekt Ballbot hat das Balancieren und Fortbewegen eines Roboters untersucht und den Prototypen Rezero entwickelt und erfolgreich getestet. Hierbei lag der Fokus, wie in Abschnitt 2.3 beschrieben, auf den Hauptmerkmalen Agilität und Design. So ist es gelungen, mit maximal 17° Neigungswinkel und 3,5 m/s Höchstgeschwindigkeit, in Kombination mit verschiedenen Eingabegeräten und Demonstrationskonzepten, das Bewegungspotential auszureißen und zu präsentieren. Aber auch das Designkonzept wurde erfolgreich umgesetzt und verleiht Rezero so ein interessantes Äusseres, das Jung und Alt zu faszinieren vermag.

Ermöglicht wird dies durch die robuste, sowie gewichtsoptimierte und funktionale Mechanik. Das gesamte Antriebssystem stellt hierbei das zentrale Element dar. Durch die Entwicklung und präzise Fertigung der Omniwheels, der Verwendung einer speziell gefertigten und beschichteten Kugel und dem Einsatz eines Gegenhalters konnte ein grosses Moment übertragen und die hohe Bewegungspräzision ermöglicht werden. Die Aufhängung stellt zudem sicher, dass kleine Unebenheiten keine Gefahr darstellen. Aufgrund der hohen Bodenhaftung und der Anordnung der Omniwheels ist es möglich sowohl bei den translatorischen Freiheitsgraden (die Bewegung in der Ebene), als auch den rotatorischen Freiheitsgraden, die Rotation um die Roboterachse, anzusteuern.

| Spezifikationen | Werte |
|--------------------------------|--------------------|
| Gesamtgewicht ohne Verschalung | 14,49 kg |
| Gesamtgewicht mit Verschalung | 19,47 kg |
| Maximale Geschwindigkeit | 3,5 m/s |
| Maximale Beschleunigung | 3 m/s ² |
| Akkulaufzeit | 5 h |
| Motorenleistung | 3 x 200 W |

Tabelle 8.1: Spezifikationen des finalen Prototypen

Das elektronische System wurde für eine hohe Regelfrequenz und Leistung ausgelegt und erfüllt alle Ansprüche. Das Konzept, zwei getrennte Rechen-

einheiten für Steuerung und Regelung einzusetzen, hat sich bewährt. Ein Grossteil der möglichen Bewegungen ist dem Zustandsregler zu verdanken, welcher anhand einer dreidimensionalen Systemmodellierung ausgelegt wurde. Letzterer zeichnet sich durch seine Robustheit und Flexibilität aus. So unterstützt Rezero, trotz des Wegfalls des rechenintensiven Kalmanfilters, fünf verschiedene Regelmodi und ist robust gegen Störungen von aussen. Auch die auf maximal 9 Nm ausgelegten Motoren können so bis an ihre Leistungsgrenze gebracht werden. Tabelle 8.1 zeigt die Spezifikationen Rezeros.

Passende Sollwertvorgaben werden dabei von verschiedenen Eingabegeräten, Hinderniserkennungs- und Interaktionsmodi sowie einer geschwindigkeitsoptimierten Trajektorienplanung erzeugt. So ist es möglich, Rezero mit konventionellen Geräten wie einem Joystick oder Joypad zu steuern, als auch neuartige Geräte wie den Qgo sphere zu verwenden. Jede einzelne Steuerungsmethode hat ihre Stärken und damit auch die Daseinsberechtigung. Die Interaktionsmodi stellen eine weitere Möglichkeit dar, mit Rezero in Kontakt zu treten. So kann er den Abstand zur interagierenden Person konstant halten und so auf Körperbewegungen reagieren oder durch das Umkreisen eines Objekts Neugierde simulieren. Als dritte Eingabemethode überzeugt die Trajektorienplanung durch ausgefallene Fahrmanöver, die bis an die Grenzen des Regelbaren gehen. So kann eine beliebige Form oder Figur gezeichnet werden, woraufhin Rezero diese schnellstmöglich und damit äusserst eindrucksvoll abfährt.

Optisch gestützt werden die Fahrmanöver durch die Verschalung Rezeros. Diese setzt das auf dem Papier entstandene Design erfolgreich um, ohne dabei die Funktionalität der einzelnen Komponenten einzuschränken. Durch den professionellen Bau, von der Positivform bis zur abschliessenden Lackierung, entstand das gelunge Äussere Rezeros, das fasziniert und Aufsehen erregt.

All dies wurde erst durch eine konsequente Zeit- und Arbeitsplanung ermöglicht. Wie in jedem Projekt, gab es auch in diesem die eine oder andere unerwartete Situation, die, dank Planungsreserve und erfolgreichem Risikomanagement, den Erfolg des Projekts nicht zu schmälern vermochte. Durch strikte Arbeitsteilung, Eigenverantwortung der Teammitglieder und gemeinschaftlicher Zieldefinition wurde ergebnisorientiertes Arbeiten möglich, bei dem die Begabungen und Neigungen jedes Teammitglieds eingebracht wurden.

Obwohl erst der dritte Roboter dieser Klasse, zeigt dieses Projekt, welches

Potential in der Technologie Ballbot steckt und dass diese bereits realisierbar ist. Obwohl als Konzeptbeweis angedacht, übersteigt Rezero diesen durch sein Funktionsreichtum eindeutig. Auch ausserhalb von Laborbedingungen hat Rezero sein Können und seine Zuverlässigkeit bereits auf Messen und Ausstellungen erfolgreich gezeigt.

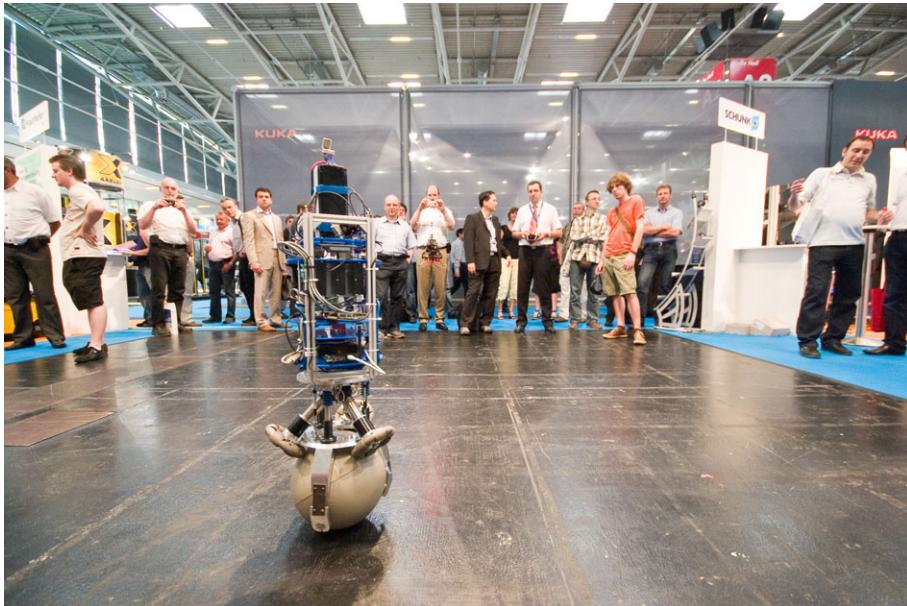


Abbildung 8.1: Demonstration an der Automatica in München

8.2 Empfehlungen

Wie in jedem Projekt, gibt es auch bei diesem Verbesserungsmöglichkeiten. So ist ein absolutes Stillstehen von Rezero nur mithilfe eines Tiefpasses und sehr hohen Regelverstärkungen möglich. Dabei reagiert der Ballbot auf Störungen sehr aggressiv. Um den ruhigen Stand und gleichzeitig auch die Bewegungspräzision zu erhöhen, gibt es zwei Möglichkeiten.

Zum einen kann das mechanische Getriebespiel durch den Einsatz von Harmonic Drives (spielfreien Getrieben) eliminiert werden. Diese liegen preislich etwas höher, bieten aber ähnliche Leistungswerte, sodass am Gesamtsystem nur wenige Änderungen vorgenommen werden müssten.

Des weiteren kann das Rauschen der IMU vermindert werden, indem eine zweite IMU eingebaut wird und die Daten von beiden Geräten abgeglichen werden. Zudem könnte der Kalmanfilter implementiert werden um die Lagesensorwerte der IMU weiter zu verbessern. Das Problem hierbei ist, dass der Mikrocontroller mit zu wenig Rechenleistung ausgelegt wurde. So muss-

te dieser durch eine leistungsstärkere Einheit ausgetauscht werden. Da die Fliesskommaoperationen auf dem aktuellen Mikrocontroller emuliert werden und daher viel Rechenzeit benötigen, sollte ein Ersatzboard eine Fliesskomma-recheneinheit besitzen. Auch zusätzlicher Speicher wäre sowohl für den Kalmanfilter, als auch für weitere Zusatzfunktionen sinnvoll.

Die allgemeine Leistungsfähigkeit könnte durch erhöhte Gewichtsreduktion verbessert werden. Die aktuellen Bauteile wurden mit grossen Sicherheitsfaktoren ausgelegt, sodass sie sogar Stürze überleben. Mit zunehmendem Reifegrad des Prototypen kann der Sicherheitsfaktor und damit das Gesamtgewicht gesenkt werden. Da die Gesamtleistung dabei erhalten bliebe, würde die Leistung pro Gewichtseinheit zunehmen.

Um unnötige Störungen oder sogar ein Umkippen zu verhindern, müsste die serielle Schnittstelle weiter verbessert werden. Aktuell treten regelmässig Übertragungsfehler auf. Diese können zum grössten Teil zwar mithilfe des Sicherheitskonzepts detektiert und herausgefiltert werden, allerdings können Fehler nicht vollständig ausgeschlossen werden.

Ein kleiner Schönheitsfehler sind die Kugelrollen im Gegenhalter. Zwar erfüllen Sie ihre Funktion sehr gut, jedoch sind sie gleichzeitig die grösste Geräuschquelle des Ballbots. Das Abrollgeräusch der Kugelrollen nimmt dem ansonsten sehr geräuschlos fahrenden Ballbot dabei das Geheimnisvolle.

8.3 Ausblick

Mit Rezero wurde ein Prototyp entwickelt, der neue Maßstäbe auf dem Gebiet der Fortbewegung auf einer Kugel setzt. Das Bewegungskonzept ist nicht nur für einen Ballbot einzigartig. Als omnidirektionale Plattform, die sich selbst stabilisiert, sind die zukünftigen Einsatzgebiete sehr weitläufig. Vor allem in einem engen und dynamischen Umfeld zeigen sich die Stärken von Rezero. Kombiniert mit der Faszination, die von dieser neuartigen Technologie ausgeht, kann letztere z.B. an Orten mit hohem Menschenauftreten eingesetzt werden. Das Interesse des Betrachters kann zudem genutzt werden um Informationen wirksam zu platzieren. Durch den modularen Aufbau von Rezero wäre es möglich, diesen zeitnah für verschiedene Anwendungszwecke sowohl optisch anzupassen, als auch mit zusätzlichen Komponenten und Funktionen auszurüsten. Zudem ist es möglich, grosse Teile der Software und der Elektronik für andere Systeme zu übernehmen und damit deren Einsatzspektrum zu erhöhen.

In den kommenden Monaten wird Rezero seine Fähigkeiten bei verschiedenen Events (siehe Tabelle 8.2) unter Beweis stellen.

| Veranstaltung | Datum |
|--------------------------------|--------------------------------|
| Samuel Werder AG | 20. August 2010 |
| Workshop Disney | 30. August – 3. September 2010 |
| Swisstech für Kundert AG | 16. – 19. November 2010 |
| Messe San Francisco | Herbst 2010 |
| Business Meeting Credit Suisse | Herbst 2010 |

Tabelle 8.2: Kommende Veranstaltungen mit Rezero

So wird Rezero zunächst bei einem Firmenevent bei der Samuel Werder AG vorgestellt werden. Anschliessend steht ein Workshop bei Disney in Glendale, Californien an. Dabei wird versucht Rezero ein neues Äusseres mit Bezug auf Disney zu verleihen. Sollte dies erfolgreich sein, so wird Rezero bei einem Feldversuch in Disneyland eingesetzt. In seiner ursprünglichen Form kommt Rezero anschliessend wieder auf der Swisstech zum Einsatz. Als Teil der Sponsoringvereinbarung wird das Team Rezero am Stand des Kugelherstellers präsentieren. Des weiteren liegen Anfragen bezüglich einem Messebesuch in San Francisco und einer Projektvorstellung im Rahmen eines Business Meetings der Credit Suisse vor.

Parallel dazu finden Verhandlungen mit Disney statt. So wird bis Jahresende gegebenenfalls noch ein zweiter, speziell an die Bedürfnisse Disneys angepasster Ballbot, gefertigt. Dieser wird im Anschluss an dieses Projekt Disney übergeben und von ihnen weiterentwickelt werden.

Abschliessend lässt sich feststellen, dass selbst nach dem offiziellen Ende des Projekts die Resonanz nicht abreisst. Rezero hat sowohl Betreuer und Sponsoren als auch Unbeteiligte beeindruckt und überzeugt, sodass noch weitere Auftritte oder sogar weitere Ballbots folgen werden.

9 Verzeichnisse

Literaturverzeichnis

- [1] Vladislav Apostolyuk. *Theory and design of micromechanical vibratory gyroscopes*, March 2010. <http://www.astrise.com/research/library/memsgyro/>.
- [2] C. K. Lim, W. Lin, G. L. Yang, L. Yan, I. M. Chen and K. M. Lee. *A Novel Approach in Generating 3-DOF Motions*. Technical report, School of Mechanical and Production Engineering, Nanyang Technological University, Singapore, 2004.
- [3] Chia-Wen Wu, Kun-Shu Huang, Chi-Kuang Hwang. *A Novel Spherical Wheel Driven by Chains With Guiding Wheels*. Technical report, Institute of Engineering and Science, Chung Hua University, Hsing-Chu, Taiwan, 2009.
- [4] D. Schafroth. *About us*, Oktober 2006. <http://www.asl.ethz.ch/about/index>.
- [5] Car Body Design. *Audi Snook Concept*, September 2009. <http://www.carbodydesign.com/archive/2008/02/08-audi-snook-concept/>.
- [6] Simon Dössegger. *Trajectory Planning for a Ballbot*. Technical report, Autonomous Systems Lab, ETH Zürich, June 2010.
- [7] Blue Road Research Eric Udd. *Overview of Fiber Optic Sensors*, Dezember 2004. http://www.bluerr.com/papers/Overview_of_FOS2/.
- [8] Gregory S. Chirikjian, David Stein. *Kinematic Design and Commutation of a Spherical Stepper Motor*. Technical report, IEEE, 1999.
- [9] igus AG. *DryLin® R - Tandem-Flanschlager FJUMT-01/02*.
- [10] Segway Inc. *Segway PT*, Januar 2010. <http://www.segway.com/individual/models/>.
- [11] J. Fong, S. Uppill. *Design and Build a Ballbot*. Technical report, The University of Adelaide, Australia, 2009.

- [12] Thomas Kammermann. *Evaluation and implementation of a human-machine interface for a ballbot*. Technical report, Autonomous Systems Lab, ETH Zürich, June 2010.
- [13] Kok-Meng Lee, George Vachtsevanos, Chikong Kwan. *Development of a Spherical Stepper Wrist Motor*. Technical report, Georgia Institute of Technology, Atlanta, 1988.
- [14] Jérôme Käser. *The mechatronical realization of a design concept for a ballbot*. Technical report, Autonomous Systems Lab, ETH Zürich, June 2010.
- [15] Lukas Limacher. *Arrester between a Ball and Body*. Technical report, Autonomous Systems Lab, ETH Zürich, June 2010.
- [16] Rotacaster Wheel Limited. *Multidirectional Wheels*, Februar 2010.
<http://www.rotacaster.com.au/>.
- [17] Thomson Linear. *Linear actuator*, March 2010.
<http://www.thomsonlinear.com>.
- [18] CompuLab Ltd. *fitPC2*, April 2009.
<http://www.compulab.co.il/fitpc2>.
- [19] M. Brandstätter, F. Siems, H. Götzner. *Anspruchsgruppenorientierte Kommunikation*. VS Verlag, 2008.
- [20] M. Kumagai, T. Ochiai. *Development of a Robot Balancing on a Ball*. Technical report, Tohoku Gakuin University, Japan, 2008.
- [21] Maki K. Rashid, Zahi A. Khalil. *Configuration Design and Intelligent Stepping of a Spherical Motor in Robotic Joint*. Technical report, Mechanical and Industrial Engineering, Sultan Qaboos University and Jordan Petroleum Refinery Co. Ltd., Lube Oil Production Department, Zarqa, Jordan, 2004.
- [22] Maxon. *maxon sensor*, April 2009. <http://shop.maxonmotor.com/maxon/>.
- [23] Michael Neunert. *Obstacle Avoidance and Interaction of a Ballbot*. Technical report, Autonomous Systems Lab, ETH Zürich, June 2010.

- [24] P. Fiorini, Z. Shiller. *Motion Planning in Dynamic Environments Using Velocity Obstacles*. *The International Journal of Robotics Research*, 1998.
- [25] Corsin Gwerder Péter Fankhauser. *Modeling and control of a Ballbot*. Technical report, Autonomous Systems Lab, ETH Zürich, June 2010.
- [26] R. Y. Siegwart, C. Kobe. *Produktentwicklung 2: Innovationsprozess*. 2008. <http://www.asl.ethz.ch/education/bachelor/Innovationsprozess2008>.
- [27] University of Canterbury Ring laser research group. *About Ring Lasers*, March 2010. http://www.ringlaser.org.nz/content/about_us/.
- [28] Institut für elektrische Maschinen RWTH. *Kugelmotor*, Februar 2010. http://www.iem.rwth-aachen.de/index.pl/new_materials_and_machines/.
- [29] Shigeki Toyama. *Development of Spherical Ultrasonic Motor*. Technical report, Tokyo A&T University, Koganei, Tokyo, Japan, 1996.
- [30] Shigeki Toyama, Shigeki Hatae. *Multi-Degree of Freedom Spherical Ultrasonic Motor*. Technical report, Tokyo A&T University, Koganei, Tokyo, Japan, 1996.
- [31] Swenwerk. *Public Dancing*, March 2009. <http://www.flickr.com/arqblog>.
- [32] T. B. Lauwers, G. A. Kantor, R. L. Hollis. *A Dynamically Stable Single-Wheeled Mobile Robot with Inverse Mouse-Ball Drive*. Technical report, Carnegie Mellon University, USA, 2006.
- [33] Todd L. Mendenhall. *Spherical Motor using oscillatory magnetic fields*. Technical report, 2003.
- [34] U. Nagarajan, A. Mampetta, G. A. Kantor, R. L. Hollis. *State Transition, Balancing, Station Keeping, and Yaw Control for a Dynamically Stable Single Spherical Wheel Mobile Robot*. Technical report, Carnegie Mellon University, USA, 2009.

Abbildungsverzeichnis

| | |
|---|----|
| 1.1 Audi Snook: Agilität durch Instabilität | 2 |
| 1.2 Der Segway-PT | 4 |
| 1.3 Team Ballbot | 6 |
| 1.4 Kostenübersicht des Projektes | 11 |
| 1.5 Kostenbilanz nach Kostenstelle | 12 |
| 2.1 Die wichtigsten Anspruchsgruppen | 18 |
| 2.2 Erste Visionen des Ballbots | 20 |
| 2.3 Der Ballbot als Showobjekt | 20 |
| 2.4 Schema des Konzeptprozesses | 22 |
| 2.5 Die drei Projektelemente | 25 |
| 2.6 Funktionsgliederung | 30 |
| 2.7 Invertiertes Pendel mit konstantem Neigungswinkel | 34 |
| 2.8 Beschleunigung in Abhängigkeit des Neigungswinkels | 35 |
| 2.9 Lösungen zu Aufhängung der Kugel | 37 |
| 2.10 Lösung, Abheben des Körpers | 37 |
| 2.11 Bewertungskriterien | 38 |
| 2.12 Teillösungen Bremsen | 39 |
| 2.13 Teillösungen Kraftübertragung auf Boden | 39 |
| 2.14 Aufbauschema des AS-Prototypen in der Konzeptphase | 40 |
| 2.15 Ein Auswahl an gefunden Lösungen zur Energieversorgung | 41 |
| 2.16 Schema der Antriebsanordnungen | 45 |
| 2.17 Gewählte Sensorvarianten | 46 |
| 2.18 Mögliche ergänzende Sensoren als Notfalllösung | 46 |
| 2.19 Freiheitsgrade des Aufbaus | 47 |
| 2.20 Freiheitsgrade der Kugel | 48 |
| 2.21 Winkel zur Beschreibung der Omniwheel | 49 |
| 2.22 Reibungsanalyse | 51 |
| 2.23 Beschichtete Hohlkugel | 51 |
| 2.24 Doppeltes Industrie-Omniwheel | 52 |
| 2.25 Rundschnurring-Omniwheel | 53 |
| 2.26 Aufhängkonzepte | 54 |

| | |
|---|-----|
| 2.27 Alternative Parkiermechanismen | 55 |
| 2.28 Gewählter Parkiermechanismus | 55 |
| 2.29 Konzeptrichtungen für das Design | 56 |
| 2.30 Dynamisch veränderbare Verschalung mit Lamellen | 57 |
| 2.31 Grundform mit Lamellen | 58 |
| 2.32 Ausgearbeitetes Designkonzept | 58 |
| 2.33 Zukunftsvisionen der Industriedesigner | 59 |
| 2.34 Zukunftsvisionen der Industriedesigner 2 | 59 |
| 2.35 Konzeptzeichnung Agilitätsmodus | 60 |
| 3.1 Gesamtansicht des Detailkonzeptes | 64 |
| 3.2 Abroll-Konzept des Omniwheel | 65 |
| 3.3 Ausfedern hochfrequenter Störungen | 65 |
| 3.4 Testbench Aufbau | 69 |
| 3.5 CAD Visualisierung des Omniwheel | 71 |
| 3.6 Finite Element Methode am Stützelement | 72 |
| 3.7 Linearflanschlager mit Gleitfolie | 78 |
| 3.8 Verklemmbedingung | 78 |
| 3.9 Darstellung der verschiedenen Federkennlinien | 79 |
| 3.10 Prinzipskizze des Modells zur Federauslegung | 80 |
| 3.11 Audi Snook: Konzept eines mechanischen Gegenhalters | 84 |
| 3.12 Aufbau des mechanischen Gegenhalters | 85 |
| 3.13 Veränderung des Vorspannelementes des Gegenhalters | 86 |
| 3.14 Biegung des Federstahlelementes und des Gegenhalters | 87 |
| 3.15 CAD Rendering des realisierten Gegenhalters | 87 |
| 3.16 Parkiermechanismus in drei Positionen | 88 |
| 3.17 Konzept der Lamellenbewegung | 89 |
| 3.18 Platzierung der Modellbauservos | 90 |
| 3.19 Linearführung in den drei Bewegungszuständen | 91 |
| 3.20 Platzierung der elektronischen Komponenten | 92 |
| 3.21 Ansicht des fertigen Konzepts | 93 |
| 3.22 Die rechte Hälfte der Urform vom Oberteil | 94 |
| 3.23 Laminieren im Composite Lab | 95 |
| 3.24 Detailansichten des Mittelteils | 95 |
| 4.1 Schaltbild des Systems | 97 |
| 4.2 Übersicht der Energieversorgung | 100 |
| 4.3 Die Inertial Measurement Unit IG-500A | 103 |
| 4.4 Der verwendete Laserdistanzsensor von Hokuyo | 105 |

| | | |
|------|---|-----|
| 4.5 | Sichtweite und Bremsweg des Ballbots | 106 |
| 4.6 | Die Ultraschallsensoren LV-MaxSonar-EZ3 | 109 |
| 4.7 | Einer von drei EC-powermax 200 W Motoren | 111 |
| 4.8 | Atmel Entwicklungsboard | 113 |
| 4.9 | fitPC2 Single Board Computer | 114 |
| 4.10 | Lithium-Polymer Akkumulator von Dualsky | 118 |
| 4.11 | Linearmotor von Thomsen Linear | 119 |
| 4.12 | Berechnung des benötigten Momentes | 121 |
| 4.13 | Kräftegleichgewicht mit Feder | 122 |
| 4.14 | Der 5 V DC/DC Wandler TEN 20-4811WI | 124 |
| 5.1 | Übersicht Regelung und Steuerung | 125 |
| 5.2 | Aufteilung in drei planare Systeme | 127 |
| 5.3 | Visualisierung der inneren Kräfte | 131 |
| 5.4 | Blockschema des Regelkreises | 134 |
| 5.5 | Momente und Tangentialkräfte | 135 |
| 5.6 | Systemantworten auf einen Geschwindigkeitssprung | 137 |
| 5.7 | Kopplungseffekte im dreidimensionalen Modell | 138 |
| 5.8 | Modell der dreidimensionalen Systemmodellierung | 139 |
| 5.9 | Geometrische Parameter des 3D-Modells | 141 |
| 5.10 | Coordinate systems | 141 |
| 5.11 | Systemmatrizen A_0 und B_0 für die Linearisierung um Null | 144 |
| 5.12 | Simulation des 3D-Modells mit planarem Regler | 147 |
| 5.13 | Simulink Blockschema der obersten Ebene | 148 |
| 5.14 | Graphische Benutzeroberfläche der Simulationsumgebung | 149 |
| 5.15 | Screenshot der 3D-Visualisierung in Simulink | 149 |
| 5.16 | Vergleich von Tiefpass- und Kalmanfilter | 150 |
| 5.17 | Einfluss des Sollwertfilters | 152 |
| 5.18 | Struktur der Implementierung auf dem Low-Level-Controller . | 152 |
| 6.1 | Steuerungsvarianten im Agilitätsmodus | 153 |
| 6.2 | Steuerungsvarianten im Interaktionsmodus | 154 |
| 6.3 | Softwareaufbau auf beiden Recheneinheiten | 158 |
| 6.4 | Achsbelegung des Joysticks | 162 |
| 6.5 | Achsbelegung des Joypads | 163 |
| 6.6 | Achsbelegung des Qgo sphere | 163 |
| 6.7 | Unterschiedliche Vorgabepunkte zu den Splinekurven | 164 |
| 6.8 | Grad der Splinepolynome | 166 |
| 6.9 | Zeitoptimierte Trajektorien | 167 |

| | |
|---|-----|
| 6.10 Prinzip der Velocity Obstacles | 169 |
| 6.11 Die drei verschiedenen Interaktionsmodi | 171 |
| 6.12 Graphisches User Interface | 173 |
| | |
| 7.1 Bewegungen des Ballbots während dreissig Sekunden | 179 |
| 7.2 Sprungantwort des Prototypen | 180 |
| 7.3 Höchste gemessene Geschwindigkeit in rad/s | 181 |
| 7.4 Neigungswinkel bei Geschwindigkeitssprüngen | 182 |
| 7.5 Generierte Geschwindigkeitssollwerte und tatsächliche Werte | 183 |
| 7.6 Vorgegebene Trajektorie und tatsächliche Fahrt | 184 |
| 7.7 Autonome Interaktionsfahrt | 185 |
| | |
| 8.1 Demonstration an der Automatica in München | 189 |

Tabellenverzeichnis

| | | |
|-----|--|-----|
| 1.1 | Technische Daten von bestehenden Ballbots | 4 |
| 1.2 | Beschreibung der Aufgaben im Projekt | 8 |
| 1.3 | Übersicht der wichtigsten Meilensteine des Projektes | 10 |
| 3.1 | Definitionen und vorgegebene Werte | 86 |
| 4.1 | Digitale Inkrementalencoder | 104 |
| 4.2 | Anforderungen an die Motoren | 110 |
| 4.3 | Spezifikationsvergleich Getriebe | 111 |
| 4.4 | Spezifikation des Helios Boards | 114 |
| 4.5 | Spezifikation des fitPCs | 116 |
| 4.6 | Leistungsaufnahme der Komponenten | 118 |
| 4.7 | Effizienz der Komponenten | 118 |
| 4.8 | Richtlinien Linearmotor | 119 |
| 4.9 | Kräftevergleich an verschiedenen Positionen | 122 |
| 5.1 | Parameter der planaren Systeme | 129 |
| 5.2 | Skizze der planaren Modelle | 130 |
| 5.3 | Zusätzliche Parameter des 3D-Modells | 140 |
| 5.4 | Komplexe Sollwerte von einer Joysticksteuerung | 146 |
| 8.1 | Spezifikationen des finalen Prototypen | 187 |
| 8.2 | Kommende Veranstaltungen mit Rezero | 191 |

A Anhang

A.1 Zeitplan

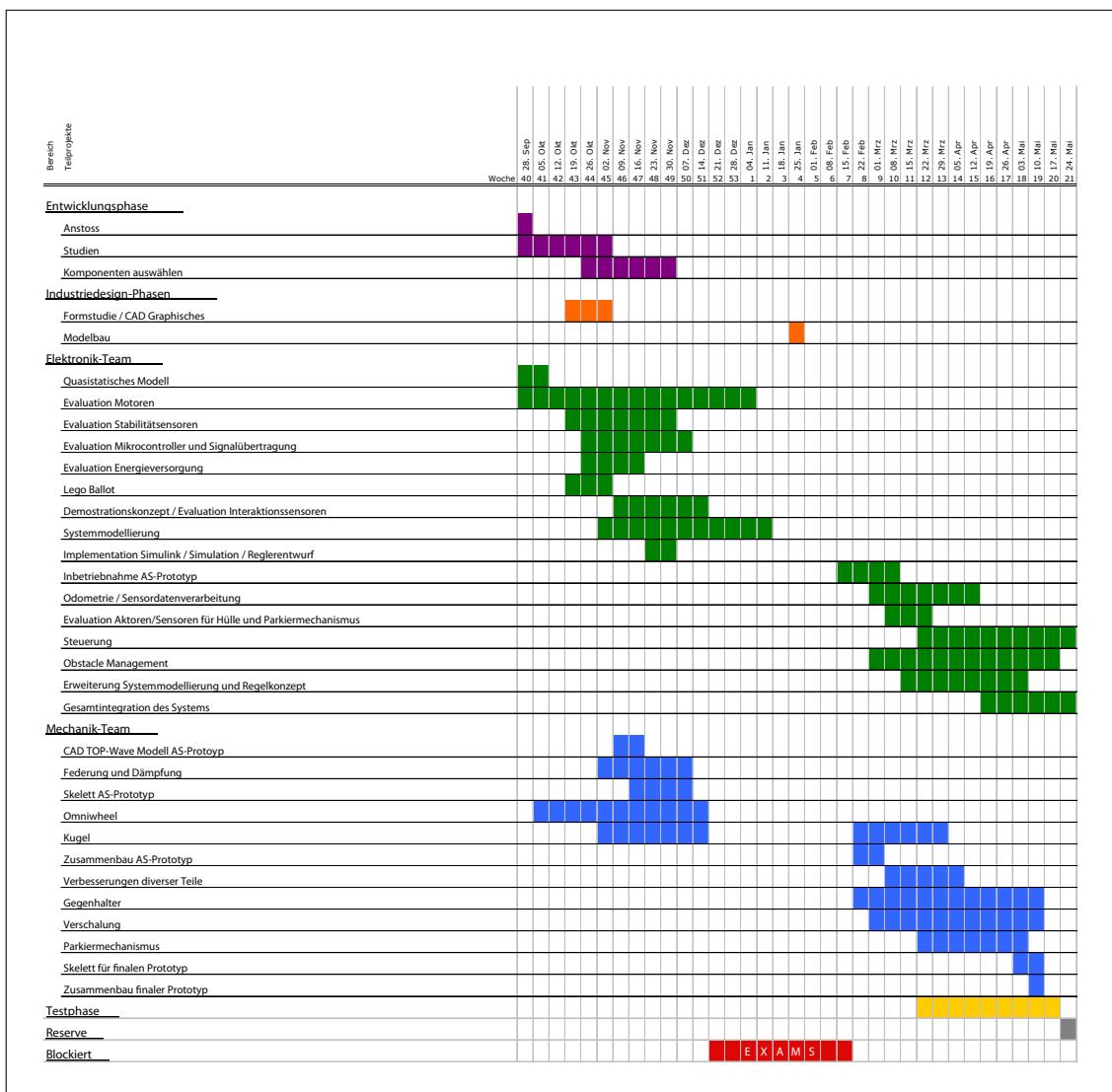


Abbildung A.1: Zeitplan

A.2 Übersicht der Finanzen

| Übersicht | | | | | | | |
|--------------------------------|-----------------------|---------------------|----------------------------|-----------------------------|----------------------|----------------------|-----------------------|
| | Mechanik | Sensoren | Elektronik (inkl. Motoren) | Design (Industrie Designer) | Infrastruktur & PR | Reserve | TOTAL |
| Ausgaben | | | | | | | |
| Vermutliche Kosten | SFr. 7'500.00 | SFr. 20.00 | SFr. 2'1550.00 | SFr. 0.00 | SFr. 1'220.00 | SFr. 2'000.00 | SFr. 13'290.00 |
| Fix-Gepflegt | SFr. 450.00 | SFr. 0.00 | SFr. 0.00 | SFr. 0.00 | SFr. 0.00 | SFr. 0.00 | SFr. 450.00 |
| Getätigter | SFr. 8'364.65 | SFr. 4365.30 | SFr. 6'013.74 | SFr. 536.80 | SFr. 3'285.35 | SFr. 0.00 | SFr. 22'565.84 |
| TOTAL | SFr. 16'314.65 | SFr. 4385.30 | SFr. 8'563.74 | SFr. 556.80 | SFr. 4'505.35 | SFr. 2'000.00 | SFr. 36'305.84 |
| Sponsoring | | | | | | | |
| Vermutliches Sponsoring | SFr. 5'000.00 | SFr. 0.00 | SFr. 0.00 | SFr. 0.00 | SFr. 0.00 | SFr. 0.00 | SFr. 5'000.00 |
| Fixes-Sponsoring | SFr. 7'500.00 | SFr. 0.00 | SFr. 0.00 | SFr. 0.00 | SFr. 0.00 | SFr. 0.00 | SFr. 7'500.00 |
| Erhaltenenes Sponsoring | SFr. 8'250.00 | SFr. 498.00 | SFr. 3'151.89 | SFr. 0.00 | SFr. 49.17 | SFr. 0.00 | SFr. 11'949.06 |
| TOTAL | SFr. 20'750.00 | SFr. 498.00 | SFr. 3'151.89 | SFr. 0.00 | SFr. 49.17 | SFr. 0.00 | SFr. 24'449.06 |
| Budget | | | | | | | |
| Review 1 | SFr. 8'000.00 | SFr. 8'000.00 | SFr. 6'600.00 | SFr. 0.00 | SFr. 1'000.00 | SFr. 0.00 | SFr. 23'160.00 |
| Review 2 | SFr. 5'800.00 | SFr. 8'000.00 | SFr. 6'300.00 | SFr. 0.00 | SFr. 3'000.00 | SFr. 0.00 | SFr. 23'100.00 |
| Review 3 | SFr. 8'000.00 | SFr. 5'000.00 | SFr. 6'300.00 | SFr. 450.00 | SFr. 3'000.00 | SFr. 2'000.00 | SFr. 24'750.00 |
| Review 4 | SFr. 16'314.65 | SFr. 4'385.30 | SFr. 8'563.74 | SFr. 336.80 | SFr. 4'505.35 | SFr. 2'000.00 | SFr. 36'305.84 |

Abbildung A.2: Budgetübersicht

A.3 Morphologischer Kasten

| Steuerung | | | Signale | | |
|---|--------------------|---|----------------------------------|------------------|----------------------------|
| Interface | Übertragungs-kanal | Kollisions-verhinderung | speichern | übertragen | verarbeiten |
|  | Funk 868 MHz | Notstopf richtungs- unabhängig | MRAM | Analog | μ C |
|  | Modellbau-Funk | Intelligentes Abschätzen, ob Stoppen oder Umfahren | Extern speichern → übertragen | Glas-Faser | PC extern |
|  | Kabel | Umrißring | FRAM | CAN | μ C mit OS |
|  | WLAN | Umfahren | SD-Karte | SPI | xPC Target |
|  | Infrarot | Hindernisse / Karte gespeichert intern | EEPROM | RS-232 | DSP |
|  | | Warnen | Flash intern | I ² C | FPGA mit Software |
|  | | Stoppen | extern Flash (USB-Stick) | Parallel | National Instruments Board |
|  | | Ausweichen | | USB | |
|  | | | | PWM | |
|  | | | | | |

Abbildung A.3: Steuerung, Signale

| Signale erzeugen / Sensoren | | | | Energieversorgung | | |
|-------------------------------------|------------------------|---------------------|-----------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|---|
| stabilisieren | bewegen | Kollisionserkennung | Standort bestimmen | Energie speichern | Energie verteilen | Energie zuführen |
| IMU | Stabilerdaten abteilen | Infrarot | Kompass W - S N O | H ₂ DC-DC Konverter | Batterien | |
| Eigenes Beschleunigungssensor | Encoder von Motoren | Laser Rangefinder | Triangulation Induktions | Superkondensator | getrennte Speisung mit Schaltern | Brennstoffzelle O ₂ + H ₂ → H ₂ O |
| Eigenes Winkelbeschleunigungssensor | GPS | Ultraschall | GPS | NiMH | Schaltregler switchcapacitor | Solarzelle |
| Gyrokop (Sensoren) | Computermaus-Sensor | Laser richten | Mobilfunknetz Triangulation | NiCd | Schaltregler Aufwärmwandler | Induktion |
| Laserabstandssensoren | Helligkeits-Sensor | Kamera | Kamera Tracking | Li-Ion | linear Regler | Kabel an Steckdose |
| Pendel | Hall-Sensor | | Reichweite an Wänden | Li-Schwefel | Schaltregler charge pump | Infrarot-Pulse |
| Gravitative Veränderungen | IMU | | Kamera intern | LiPo | Spannungsnehmer Flyback converter | Alu extern bauen |
| | Kugelrollensensor | | Motoren-Encoder | Schwungrad | | |
| | | | Bodenmarkierungen | | | |
| | | | Kugelbewegung messen | | | |

Abbildung A.4: Signale erzeugen / Sensoren, Energieversorgung

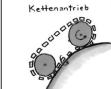
| Bewegung | | | Antrieb | | | | |
|---|---|---|---|---|--|--|--|
| Gieren | Rollen | Parkieren | Beschleunigen | Bremsen | Kraft erzeugen | Kraft übertragen | Kraft einleiten |
|  |  |  |  |  |  Kugel - Kugel |  | Welle 3 zu Punkt |
|  |  |  |  |  |  | Kettenantrieb  | 1 zu Punkt |
|  | |  |  |  |  K. EC - Welle |  | Dreieck  |
| | |  |  |  | |  | Viereck |
| | |  |  |  | |  | Booster |
| | |  |  |  | |  | Booster + Omnidwheel |
| | | | |  | |  | |
| | | | | | |  | |
| | | | | | | | |

Abbildung A.5: Bewegung, Antrieb

| Kugel Lagerung | | | | Kugel | Skelett | |
|----------------------|--------------------|------------------------|---------|----------------------------|----------------|--------------|
| Federung und Dämpfer | Schwerkraft | seitliche Verschiebung | Abheben | Kraftübertragung auf Boden | Aufbau | Modularität |
| | Permanentmagnet | gelagert | | | cylinderförmig | geschachtelt |
| | über Kugelfig | über Antrieb | | | wabenförmig | geschwungen |
| | über Kugrollen | | | | sugelförmig | |
| | über Antriebsräder | | | | trapezförmig | |
| | Antrieb oben | | | | rechteckig | |
| | | | | | | |
| | | | | | | |
| | | | | | | |

Abbildung A.6: Kugel, Lagerung, Skelett

A.4 Evaluation des morphologischen Kastens

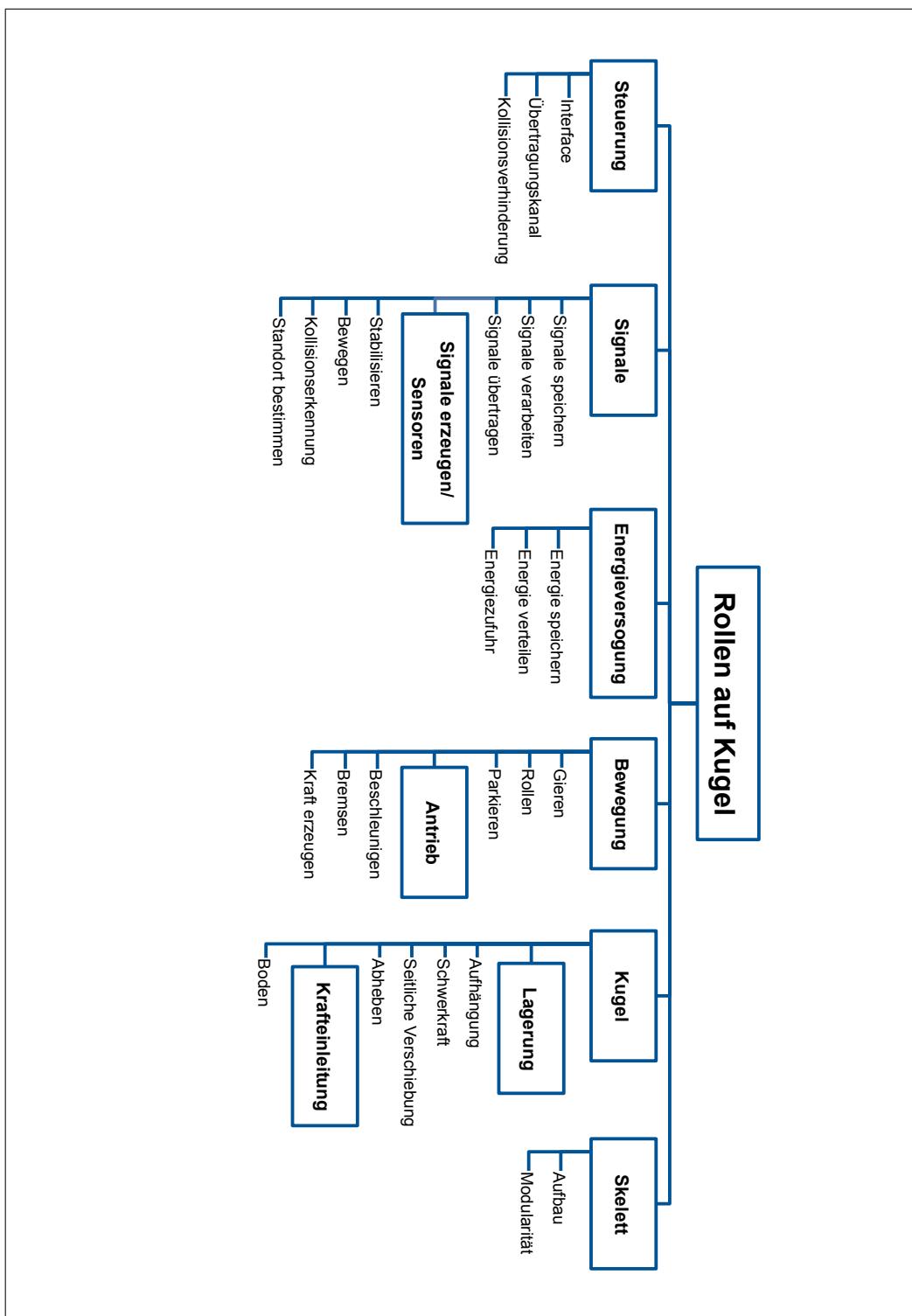


Abbildung A.7: Funktionsgliederung im morphologischen Kasten

| Feder-Dämpfer | | Notenskala: 1 bis 5, 5 beste, ganzes Spektrum vergeben | | | | | | | |
|--------------------------------|---------------------------|--|--------------|--------|--------------|--------|-------------|-------------|--|
| Lösungsvorschlag | Technische Funktionalität | 40% | Realisierung | 40% | Flexibilität | 20% | Gesamt | 100% | Anmerkungen |
| motor Federung Dämpfung | 5 2.00 | 3 1.20 | 4 0.80 | 5 1.00 | 4 0.80 | 4 0.80 | 4.00 | 4.00 | sehr gut optimierbare, modulare Lösung |
| elastische struktur | 3 1.20 | 4 1.60 | 5 1.00 | 4 0.80 | 4 0.80 | 3 0.60 | 3.80 | 3.80 | wenig Zusatzbauteile, flexibel, schwer zu dimensionieren |
| stütze federn | 4 1.60 | 4 1.60 | 4 0.80 | 4 0.80 | 4 0.80 | 3 0.60 | 3.20 | 3.20 | wenig Bauteile, dafür weniger flexibel |
| zentrale dämpfung | 2 0.80 | 4 1.60 | 4 0.80 | 4 0.80 | 4 0.80 | 3 0.60 | 3.20 | 3.20 | antriebe wird nicht gedämpft, grosses minus, konflikt mit stabilität |
| lagerung durch reinen spannung | 3 1.20 | 3 1.20 | 3 1.20 | 3 1.20 | 3 0.60 | 2 0.40 | 2.80 | 2.80 | bedingt Riemenantrieb |
| weiche fügelerfläche | 1 0.40 | 5 2.00 | 2 0.80 | 3 0.60 | 2 0.40 | 2 0.40 | 2.60 | 2.60 | erhält auch verluste |
| luftlagerung | 3 1.20 | 2 0.80 | 1 0.40 | 2 0.40 | 2 0.40 | 2 0.40 | 2.40 | 2.40 | hochwertige Lösung, für unsere Zwecke Aufwand zu hoch |
| segmente federn | 2 0.80 | | | | | | 1.60 | 1.60 | nicht realisierbar |

| Kraft einleiten | | Notenskala: 1 bis 5, 5 beste, ganzes Spektrum vergeben | | | | | | | |
|--------------------------------|---------------------------|--|--------------|--------|--------------|--------|-------------|-------------|---|
| Lösungsvorschlag | Technische Funktionalität | 40% | Realisierung | 40% | Flexibilität | 20% | Gesamt | 100% | Anmerkungen |
| 3 im Dreieck | 4 1.60 | 5 2.00 | 4 0.80 | 4 0.80 | 4 0.80 | 4 0.80 | 4.40 | 4.40 | gute Verteilung, 3 Motoren bei 3 Freiheitsgraden |
| 4 in einem quadrat | 5 2.00 | 3 1.20 | 3 0.60 | 5 1.00 | 5 1.00 | 5 1.00 | 3.80 | 3.80 | gerade Anlage punkte auf einer Kugel |
| booster mit omnirad | 5 2.00 | 1 0.40 | 2 0.40 | 2 0.40 | 2 0.40 | 2 0.40 | 2.80 | 2.80 | Stabilisierung und Antrieb getrennt, hohe Leistung |
| zentrale dämpfung | 2 0.80 | 4 1.60 | 2 0.40 | 2 0.40 | 2 0.40 | 2 0.40 | 2.60 | 2.60 | Mitte wird eng, Verlust eines steuerbaren Freiheitsgrades |
| lagerung durch reinen spannung | 2 0.80 | 3 1.20 | 3 1.20 | 1 0.20 | 1 0.20 | 1 0.20 | 2.40 | 2.40 | vier Anlage punkte auf einer Kugel |
| weiche fügelerfläche | 1 0.40 | 4 1.60 | 4 1.60 | 2 0.40 | 2 0.40 | 2 0.40 | 2.40 | 2.40 | schwer oder nur mit Aufwand gut zu regeln |
| luftlagerung | | | | | | | | | |
| segmente federn | | | | | | | | | |

| Signale verarbeiten | | Notenskala: 1 bis 5, 5 beste, ganzes Spektrum vergeben | | | | | | | |
|--------------------------------------|---------------------------|--|--------------|--------|--------------|--------|-------------|-------------|--|
| Lösungsvorschlag | Technische Funktionalität | 40% | Realisierung | 40% | Flexibilität | 20% | Gesamt | 100% | Anmerkungen |
| Microcontroller (int., Nat., Instr.) | 5 2.00 | 4 1.60 | 4 0.80 | 4 0.80 | 4 0.80 | 4 0.80 | 4.40 | 4.40 | schnell, viele Schnittstellen verfügbar |
| PC extern | 2 0.80 | 2 0.80 | 5 1.00 | 5 1.00 | 5 1.00 | 5 1.00 | 3.80 | 3.80 | Kommunikation nicht möglich |
| DSP | 5 2.00 | 3 1.20 | 3 0.60 | 3 0.60 | 3 0.60 | 3 0.60 | 3.00 | 3.00 | Schnell, optimal für Signalverarbeitung |
| PC intern | 1 0.40 | 2 0.80 | 2 0.80 | 4 0.80 | 4 0.80 | 4 0.80 | 2.00 | 2.00 | Nicht Realtime, Problem für Regelimplementierung |
| FPGA mit Softcore | 4 1.60 | 1 0.40 | 1 0.40 | 1 0.40 | 1 0.40 | 1 0.40 | 2.00 | 2.00 | Extrem flexibel und Leistungsstark, teuer |
| x PC Target | 3 1.20 | 3 1.20 | 3 1.20 | 2 0.40 | 2 0.40 | 2 0.40 | 2.00 | 2.00 | Simulation in Matlab direkt |

| Standort bestimmen | | Notenskala: 1 bis 5, 5 beste, ganzes Spektrum vergeben | | | | | | | |
|------------------------------|---------------------------|--|--------------|--------|--------------|--------|-------------|-------------|---|
| Lösungsvorschlag | Technische Funktionalität | 40% | Realisierung | 40% | Flexibilität | 20% | Gesamt | 100% | Anmerkungen |
| Kompass | 1 0.40 | 3 1.20 | 4 0.80 | 4 0.80 | 4 0.80 | 4 0.80 | 2.40 | 2.40 | störabhängig |
| Triangulation Indoor/Outdoor | 4 1.60 | 3 1.20 | 2 0.40 | 2 0.40 | 2 0.40 | 2 0.40 | 3.20 | 3.20 | Pfeilende nötig |
| Teléfonoignal Triangulation | 1 0.40 | 3 1.20 | 3 0.60 | 3 0.60 | 3 0.60 | 3 0.60 | 2.20 | 2.20 | sehr ungern |
| GPS | 4 1.60 | 5 2.00 | 1 0.40 | 1 0.40 | 1 0.40 | 1 0.40 | 4.20 | 4.20 | funktioniert nur Außen, sehr genau |
| Kamera-Tracking | 3 1.20 | 1 0.40 | 3 0.60 | 3 0.60 | 3 0.60 | 3 0.60 | 2.20 | 2.20 | Kamera nötig |
| Pelzung an Wänden | 2 0.80 | 4 1.60 | 2 0.40 | 2 0.40 | 2 0.40 | 2 0.40 | 2.80 | 2.80 | braucht Distanz-sensoren mit grosser Reichweite |
| Kamera intern | 2 0.80 | 3 1.20 | 2 0.40 | 2 0.40 | 2 0.40 | 2 0.40 | 2.40 | 2.40 | komplexe Bildverarbeitung |
| Bodenmarkierungen | 3 1.20 | 3 1.20 | 1 0.20 | 1 0.20 | 1 0.20 | 1 0.20 | 2.60 | 2.60 | ortsgebunden |
| Motoren-Encoder | 4 1.60 | 5 2.00 | 4 0.80 | 4 0.80 | 4 0.80 | 4 0.80 | 4.40 | 4.40 | Einfach, schon vorhanden |
| Kugelbewegung messen | 5 2.00 | 4 1.60 | 5 1.00 | 5 1.00 | 5 1.00 | 5 1.00 | 4.60 | 4.60 | einfach, braucht speziellen Sensor |

Abbildung A.8: Auszug aus der Mechanik und der Elektronik

A.5 Anforderungen an den AS-Prototyp

| Teilsystem | Untergruppe | Bestandteile | Anforderung | Ist-Stand 21.02. |
|---------------------|-----------------|---------------------|-----------------|------------------|
| Kugel | - | Material | definitiv | provisorisch |
| | | Konstruktion | definitiv | provisorisch |
| | | Beschichtung | provisorisch | provisorisch |
| Aufhängung | Lagerung | Material | definitiv | definitiv |
| | | Konstruktion | definitiv | definitiv |
| | | Federn / Dämpfer | definitiv | provisorisch |
| Gegenhalter | Gegenhalter | Material | definitiv | nicht vorhanden |
| | | Konstruktion | definitiv | nicht vorhanden |
| Aufbau | Skelett | Material | provisorisch | provisorisch |
| | | Struktur | provisorisch | provisorisch |
| | | Konstruktion | provisorisch | provisorisch |
| Hauptantrieb | Antriebsmotoren | Motor | definitiv | definitiv |
| | | Getriebe | definitiv | definitiv |
| | | Leistungselektronik | definitiv | definitiv |
| | | Omni-Wheels | definitiv | definitiv |
| | Omni-Wheels | Material | definitiv | definitiv |
| | | Modell | definitiv | definitiv |
| | | Konstruktion | provisorisch | definitiv |
| | | Befestigung | definitiv | provisorisch |
| Stabilitätssensoren | IMU | Beschichtung | provisorisch | definitiv |
| | | Modell | definitiv | definitiv |
| | SwissGyro | Position | provisorisch | provisorisch |
| | | Modell | nicht vorhanden | nicht vorhanden |
| | Maussensoren | Position | nicht vorhanden | nicht vorhanden |
| | | Modell | nicht vorhanden | nicht vorhanden |
| | Laser-Tripod | Position | nicht vorhanden | nicht vorhanden |
| | | Modell | nicht vorhanden | nicht vorhanden |
| | Motorencoder | Position | nicht vorhanden | nicht vorhanden |
| | | Modell | definitiv | definitiv |
| Laser Range | Laser Range | Position | definitiv | definitiv |
| | | Modell | definitiv | definitiv |
| | | Position | provisorisch | provisorisch |
| Ultraschall | Ultraschall | Modell | definitiv | definitiv |
| | | Position | provisorisch | provisorisch |
| | | Modell | definitiv | provisorisch |
| Mikrophone | Mikrophone | Position | provisorisch | provisorisch |
| | | Modell | definitiv | provisorisch |

Abbildung A.9: Anforderungen Teil 1

| Teilsystem | Untergruppe | Bestandteile | Anforderung | Ist-Stand 21.02. |
|--------------------|---------------------|-----------------|-----------------|------------------|
| Recheneinheit | Mikroprozessoren | Modelle | definitiv | definitiv |
| | Interfaces | Position | provisorisch | provisorisch |
| | Protokoll | Variante | definitiv | definitiv |
| | Architektur | Variante | definitiv | definitiv |
| Signalübertragung | Extern | Aufbau | definitiv | definitiv |
| | | Interface | definitiv | provisorisch |
| | | Modell | definitiv | provisorisch |
| Energieversorgung | Position | | provisorisch | provisorisch |
| | Akkumulatoren | Modell | definitiv | definitiv |
| | | Position | provisorisch | provisorisch |
| | DC-DC Wandler | Modell | definitiv | definitiv |
| | | Position | provisorisch | provisorisch |
| | Leistungselektronik | Lösung | definitiv | definitiv |
| | | Position | provisorisch | provisorisch |
| Ladeanschluss | Lösung | nicht vorhanden | provisorisch | provisorisch |
| | Sicherheit | Konzept | provisorisch | definitiv |
| | | | | |
| Parkiermechanismus | Kugelbucht | Konstruktion | nicht vorhanden | nicht vorhanden |
| | Aktor | Modell | nicht vorhanden | nicht vorhanden |
| | | Getriebe | nicht vorhanden | nicht vorhanden |
| | | Encoder | nicht vorhanden | nicht vorhanden |
| | Leistungselektronik | nicht vorhanden | nicht vorhanden | nicht vorhanden |
| | Positionierung | nicht vorhanden | nicht vorhanden | nicht vorhanden |
| Hülle | Verkleidung | Material | nicht vorhanden | nicht vorhanden |
| | | Struktur | nicht vorhanden | nicht vorhanden |
| | | Konstruktion | nicht vorhanden | nicht vorhanden |
| | Hüllenaktor | Modell | nicht vorhanden | nicht vorhanden |
| | | Getriebe | nicht vorhanden | nicht vorhanden |
| | | Encoder | nicht vorhanden | nicht vorhanden |
| | Leistungselektronik | nicht vorhanden | nicht vorhanden | nicht vorhanden |
| Positionierung | | nicht vorhanden | nicht vorhanden | nicht vorhanden |

Abbildung A.10: Anforderungen Teil 2

A.6 Untersuchung des verschiebbaren Masseneffekts

Kontrolliert axial verschiebbare Masse in einem Ballbot

Wirkungsanalyse

1. Ausgangslage

Aus der designtechnisch gefällten Entscheidung eine dynamische Hülle mit sich vertikal verschiebenden Elementen zu fertigen ergeben sich völlig neue Randbedingungen für die Systemdynamik. Die Verschiebung, welche zur Erzeugung des Atmungseffektes benötigt wird, ist relativ gering. Grundsätzlich böte sich die Möglichkeit den Effekt sich radial verschiebbarer Massen zu maximieren, um die Systemdynamik positiv zu beeinflussen. So könnte die verschiebbare Masse an kritischen Stellen einer Bahntrajektorie, wo der Reibschluss aufgrund zu hoher erforderlicher Momente verloren zu drohen geht, gezielt beschleunigt werden und die Normalkraft dynamisch erhöht werden.

2. Untersuchung

Recherchen

Internetrecherchen zum genannten Thema verliefen überraschend erfolglos, handfeste Aussagen über die Auswirkungen des Effektes für ein ähnliches System finden sich nirgends. Deshalb sollte der Effekt an einem einfachen mechanischen Simulink-Modell mit zwei Federpunktmasse nachgewiesen und untersucht werden. Dabei wird als Analogie zu einer Slalomfahrt vereinfachend und um zweidimensional zu bleiben, eine Bahnkurve mit vertikaler sinusförmiger Auslenkung betrachtet.

Parameter:

| | | | |
|-----------------|-------------------------|------------------|---------------------------|
| $I=0.4\text{m}$ | Höhe Ballbotschwerpunkt | $b=0.25\text{m}$ | Amplitude Bahntrajektorie |
| $M=8\text{kg}$ | fixe Masse | $s=0.15\text{m}$ | max. Bewegungslänge |
| $m=3\text{kg}$ | verschiebbare Masse | (nicht aktiv) | |

Einsatzraum:

Der Ballbot sollte mit Geschwindigkeiten zwischen 0.5 und 2 m/s fahren und Bewegungen mit Frequenzen von 0.5 bis 2 Hertz ausführen, mit etwa 0.5m Amplitude.

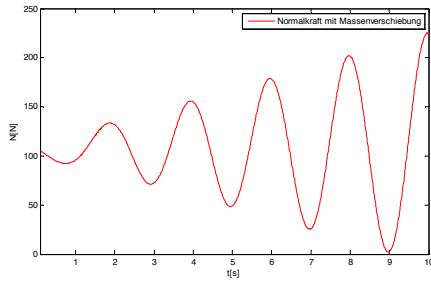
Kompensationsbedingung:

Damit die Federkraft die Bahnkräfte kompensiert muss diese antizyklisch schwingen. Dazu muss die Federkonstante so gewählt werden, dass die Eigenfrequenz der Feder mit der Frequenz der Bahnkurve zusammenfällt. Die Auslenkung muss Anfangs null sein, die nötige Anfangsgeschwindigkeit der schwingenden Masse wurde experimentell bei -0.35m/s gefunden.

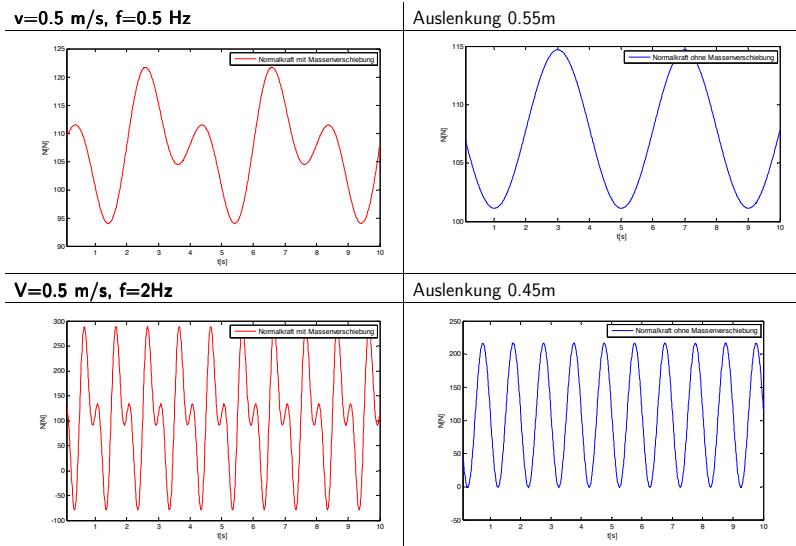
Beobachtungen

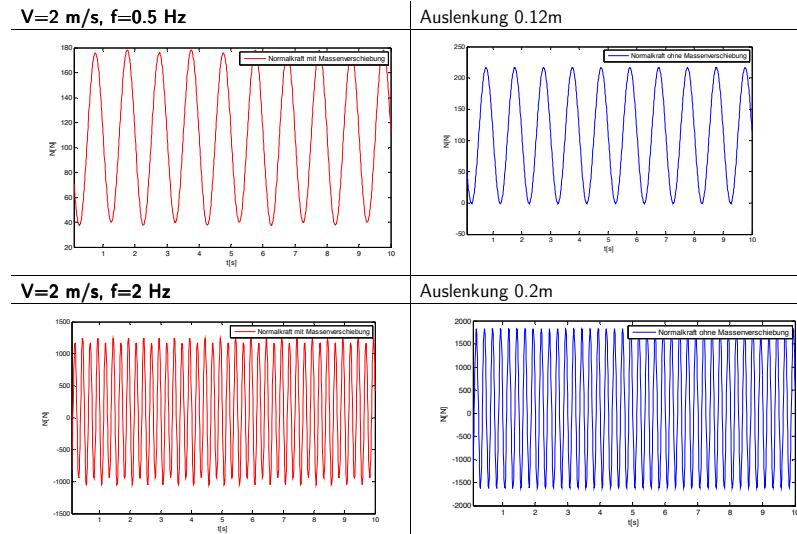
Der Effekt konnte wie erwartet nachgewiesen werden, die Fragestellung ist berechtigt. Die Ergebnisse des für Spezialfälle verifizierten Modells sind aber oft überraschend.

1. Mitten im Einsatzraum bei $v=1\text{m/s}$ hat das System ein Resonanzpunkt. Der Resonanzpunkt ist massen- und bahnfrequenzunabhängig. Die Schwingung dominiert das Systemverhalten bis etwa $\pm 0.5\text{m/s}$ um den Resonanzpunkt.



2. Grenzplots des definierten Einsatzraumes:





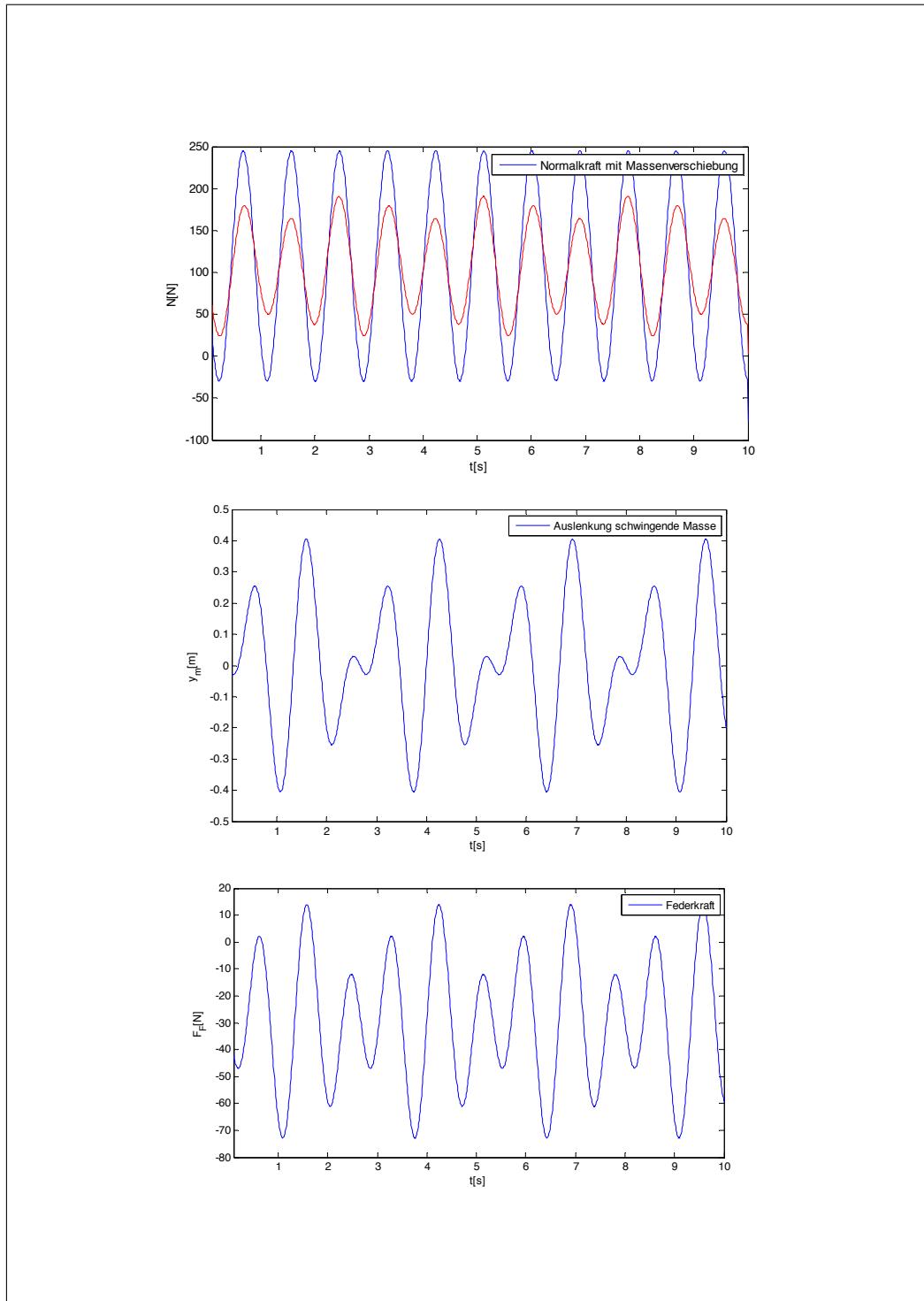
2 Hz sind bereits definitiv zu hoch, der Ballbot hebt ab, die Federcompensation würde erstaunliche 500N ausmachen. Bei 2 m/s und 0.5 Hz kann durch die Feder die minimale Kontaktkraft um 40N erhöht werden. Das ist erstaunlich viel, genauso wie die Scheinkräfte der offenbar grenzwärtigen Bahnkurve von max. 220 N im Vergleich zur statischen Gewichtskraft von 108 N. Der Federeffekt kann diese um 55N verringern, allerdings müssen 3kg Masse 25cm bewegt werden können.
Es wird klar ersichtlich, dass die Federmassenkompenstation sehr stark von den Randbedingungen abhängen.

3. Betriebspunkt bei $v=1.5 \text{ m/s}$ und $f=0.75 \text{ Hz}$ (schneller Slalom, 0.5m Amplitude)

Die nachfolgenden Plots zeigen die Auswirkungen der verschiebbaren Masse in einem typischen Fall. Die Bahnkurve wäre in der Realität nicht vertikal, der Ballbot würde nicht abheben, trotzdem sind die Kräfte beachtlich, diese Erkenntnisse sollten in der Konstruktion einfließen.

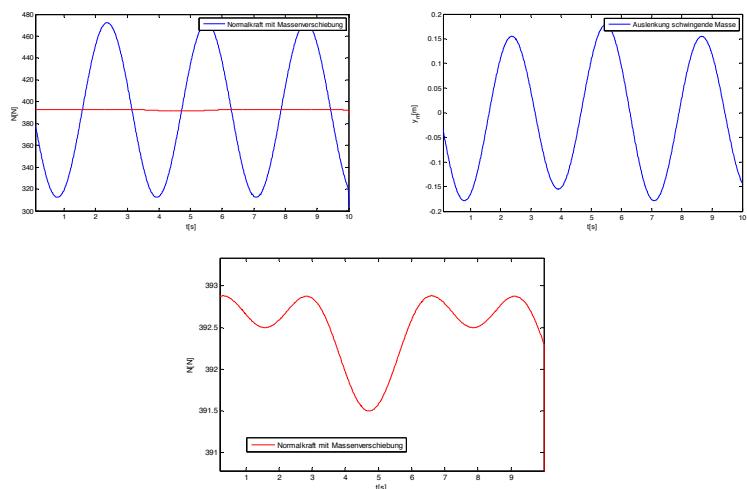
Die Mindestbodenkraft kann um ca. 50N angehoben werden, gut einem Drittel der Spanne zwischen den Spitzenwerten und fast der Hälfte der Gewichtskraft. Dies entspricht einer scheinbaren Massenzunahme von fast 5kg in reibungskritischen Stellen. Leider kann niemals 80cm Federweg zur Verfügung gestellt werden.

Die Federkraft übersteigt 70N nie, beträgt aber das Doppelte der statisch zu tragenden Gewichtskraft.



4. Der Vollständigkeit halber wurde zusätzlich die Massenkonfiguration gesucht und bestimmt, mit welcher eine vollständige Kompensation erreicht werden kann. Der Betriebspunkt ist bei 10 kg, $v=2$ m/s, $f=0.15$ Hz und $b=0.5$ m.

Die bewegliche Masse muss erstaunliche 30kg betragen und ca. 30 cm bewegt werden. Die Umsetzung ist im Falle des Ballbots nicht möglich.



3. Folgerungen

Neben der Massenverteilung ist die Fluktuation der Normalkraft hauptsächlich von der Bahngeschwindigkeit und der Kurvenfrequenz abhängig. Grundsätzlich folgt aus der verlangten Bahnfrequenz die benötigte Frequenz der Feder, welche antizyklisch schwingen muss, um die Bodenkraft möglichst konstant zu halten. Das ergibt eine Bedingung an die Federkonstante und die Federposition. In Realität würde die Masse mit einem Motor bewegt. Weil für die Kompensation aber der Beschleunigungsverlauf der Masse durch die Bewegungskurve der Feder korrekt vorgegeben ist, gilt dieser auch für eine durch einen Motor angetriebene Masse. Die Idealbahn der Masse ist dieselbe, mit einem Motor könnten höchstens nur relevante Teilintervalle des Beschleunigungsverlaufs imitiert werden, um die Bewegung zu verringern. Dass der Federweg beschränkt ist, zieht zwei Konsequenzen nach sich: Erstens kann der Effekt nur bei halbwegs periodischen Bewegungsmustern länger und gezielt ausgereizt werden, da sonst die Masse anschlägt. Das ist für eine omnidirektionale Plattform prinzipiell schlecht. Zweitens stellt sich dadurch eine Bedingung an die maximale Kompensationskraft. Bei beschränktem Federweg kann der Effekt nicht vollständig ausgereizt werden. In Realität lässt die Größe des Ballbots die Umsetzung des benötigten Federwegs in keinem Fall zu.

Ein Linearmotor müsste in Betriebspunkt unter 2.3 und mit einem Übersetzungsduchmesser von 5cm ein Moment von 1 Nm erzeugen können. Außerdem müsste die Masse 1.6 m/s zurücklegen. Dies ergäbe mit demselben Durchmesser eine Leistung von 64 W und eine Drehzahl von 620 rpm. Das Prinzip stellt also durchaus erfüllbare Bedingungen an einen Aktor. Die Regelung wird recht komplex werden. Zwar kann die Frequenz aus den Steuersignalen des Ballbots abgeleitet werden, aber die des Motorenmomentes müsste entweder mithilfe des IMUs bestimmt, da es direkt von den willkürlichen Steuersignalen beeinflusst wird und also kein Gleichgewichts- oder Betriebspunkt existiert.

Vor- und Nachteile

Vorteile

- Beträchtliche Verringerung des erforderlichen Reibungskoeffizienten resp. beträchtliche Erhöhung der Manövriergilität. --> Wow-Effekt
- Es können engere und schnellere Kurven gefahren werden.
- Die Maximalkräfte auf die Omniwheels werden ebenfalls beträchtlich verringert.
- Hüllenaktor kann verwendet werden.
- Nur geringen Einfluss auf Pendelregelkreis (Massenverteilung)
- Grosses Innovationspotential

Nachteile

- Starker Aktor benötigt, zusätzliches Gewicht, erhöhter Stromverbrauch, Kosten
- Komplexer Regelkreis nötig mit zusätzlichen Steueralgorithmen
- Einsatzfähig nur bei periodischen Bewegungen innerhalb enger Grenzen
- Federwegbegrenzung kann zum temporären Versagen des Systems führen.
- Nur partielle Nutzung des Effekts wegen Federwegbegrenzung.
- Resonanz mitten im Einsatzraum, müsste zusätzlich aktiv geregelt werden.
- Komplexe Innenstruktur nötig um Masse zu verschieben (wahrsch. Akkus)
- Keine negativen Konsequenzen, wenn wenig Masse bewegt wird.

4. Fazit

In Anbetracht das sämtliche Vorteile durch viele Nachteile stark relativiert werden und die Systemkomplexität aber sehr stark erhöht wird, lohnt sich eine Fokussierung auf die dynamische Masse nicht, insbesondere weil durch das Bewegen von möglichst wenig Masse kein Nachteil entsteht. Für die Ausnutzung des Effektes müsste die gesamte Struktur des Ballbots, mechanisch wie elektronisch, darauf ausgerichtet werden. Dieser Aufwand ist durch den kleinen Einsatzbereich, wo der Effekt wirklich Vorteile erbringt, nicht zu rechtfertigen. Die schwingende Masse hätte nachteilige Auswirkungen auf die Höhe, die Einsatzdauer, auf Interaktionssensoren und nicht zuletzt würde sie die Omnidirektionalität des Ballbots in Frage stellen.

A.7 Technische Zeichnungen

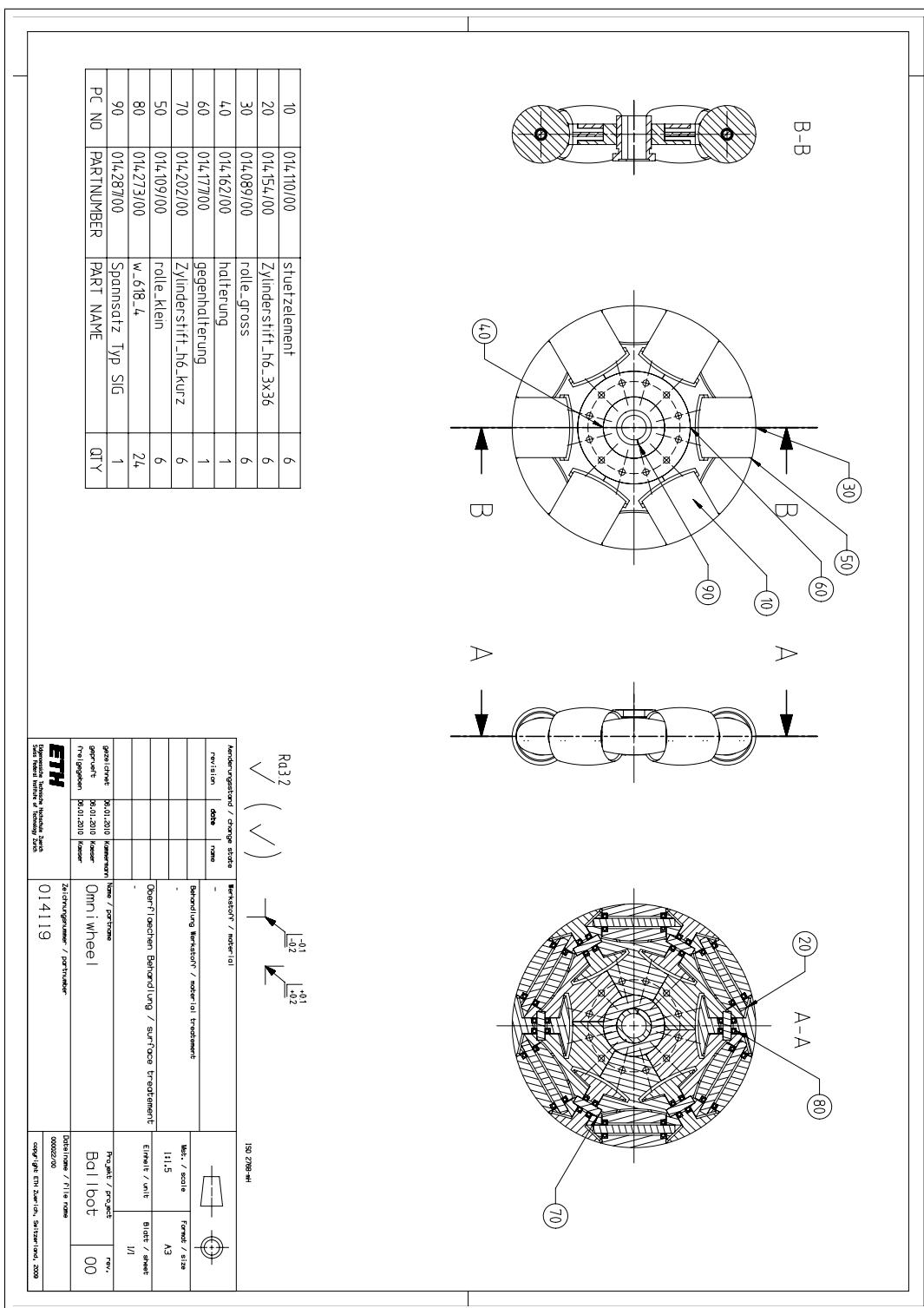


Abbildung A.11: Omniwheel

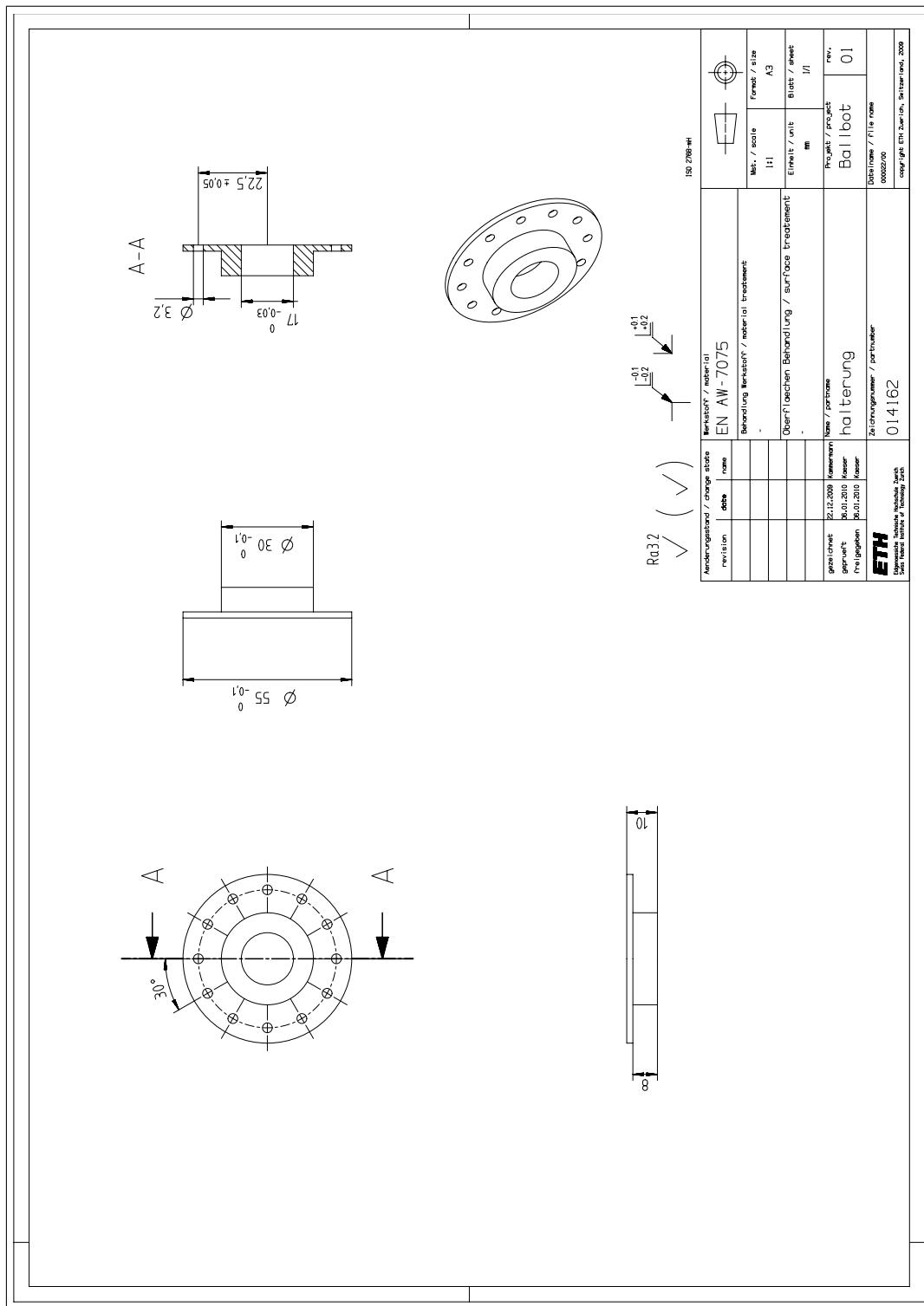


Abbildung A.12: Halterung

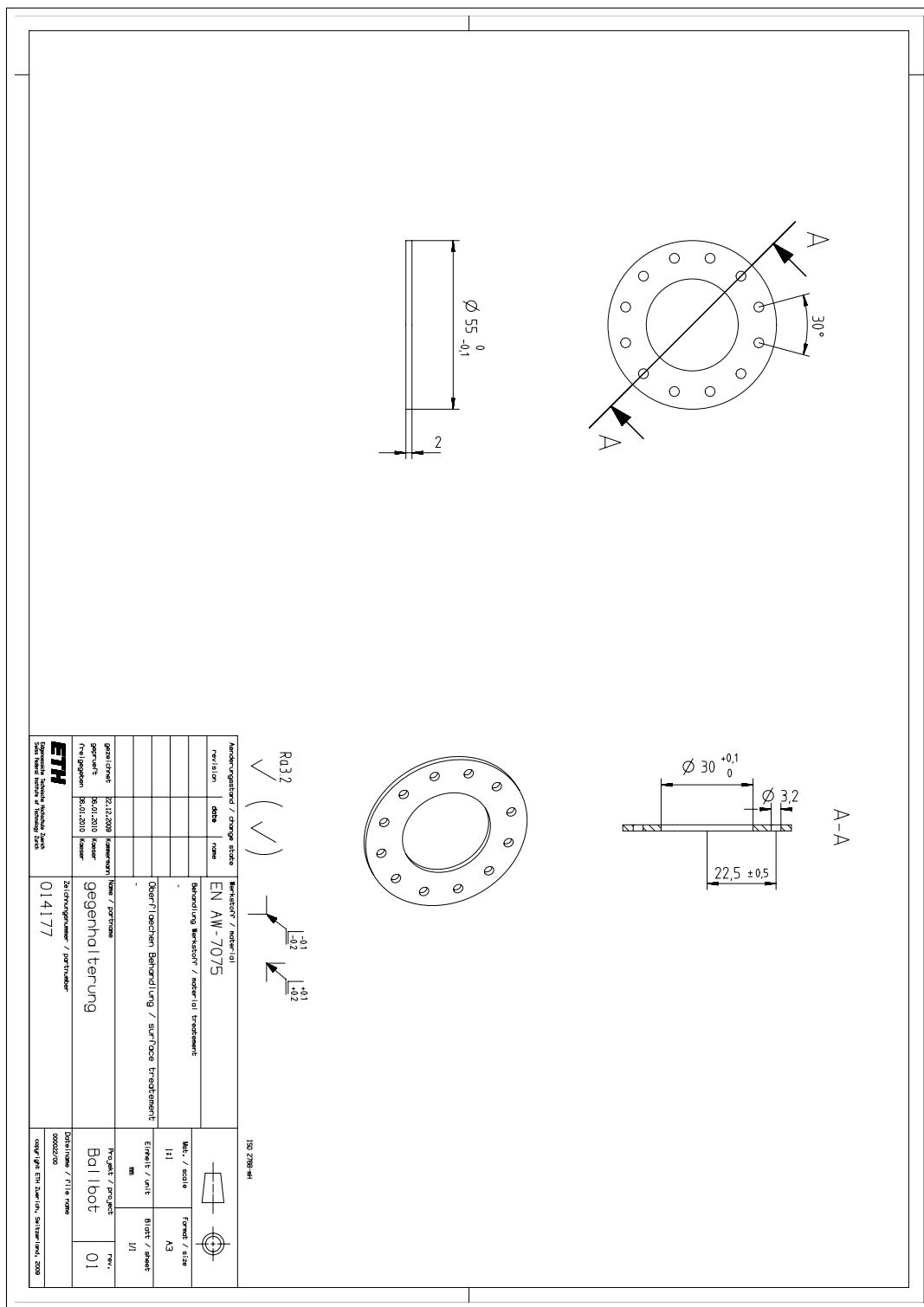


Abbildung A.13: Gegenhalterung

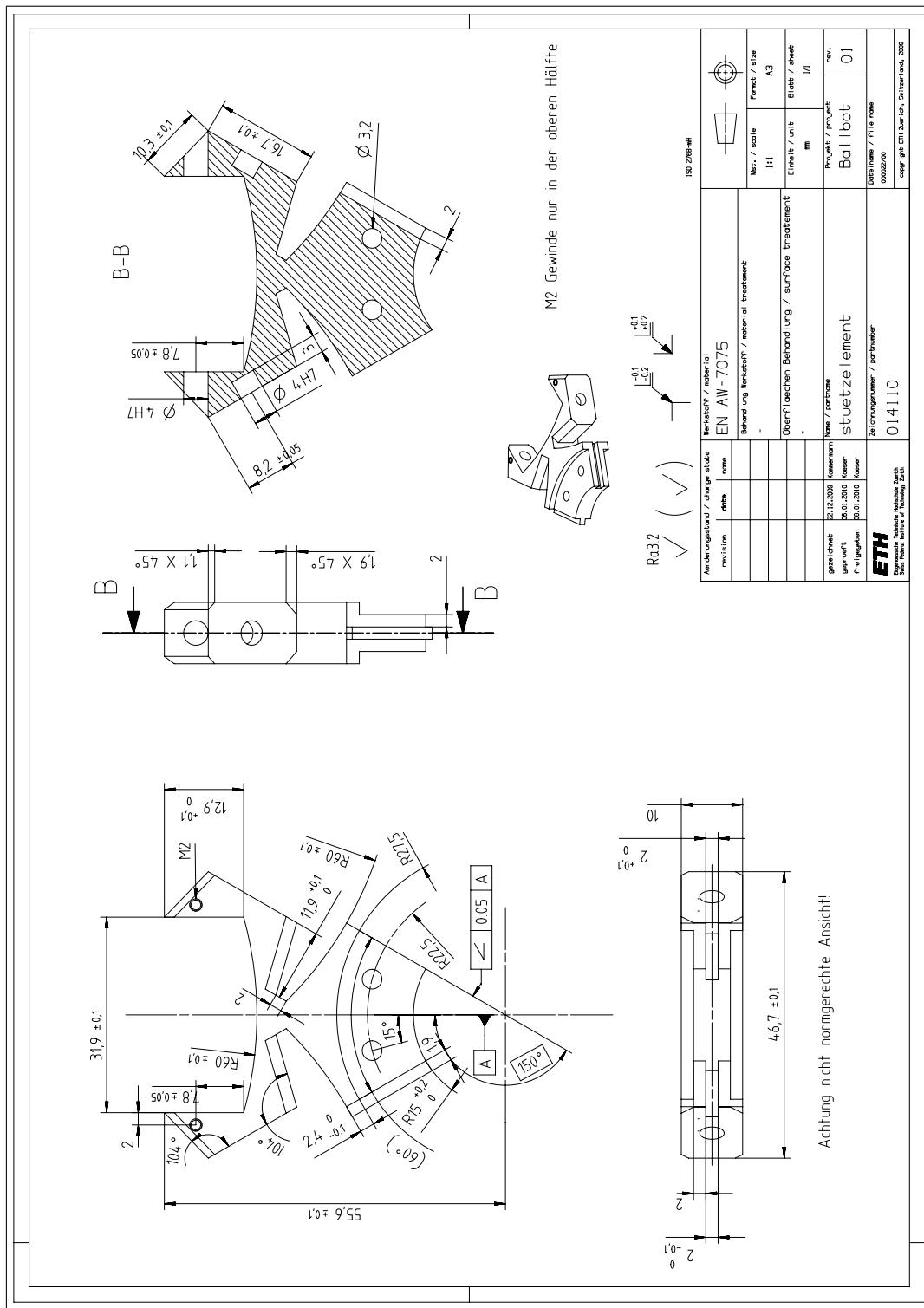


Abbildung A.14: Stützelement

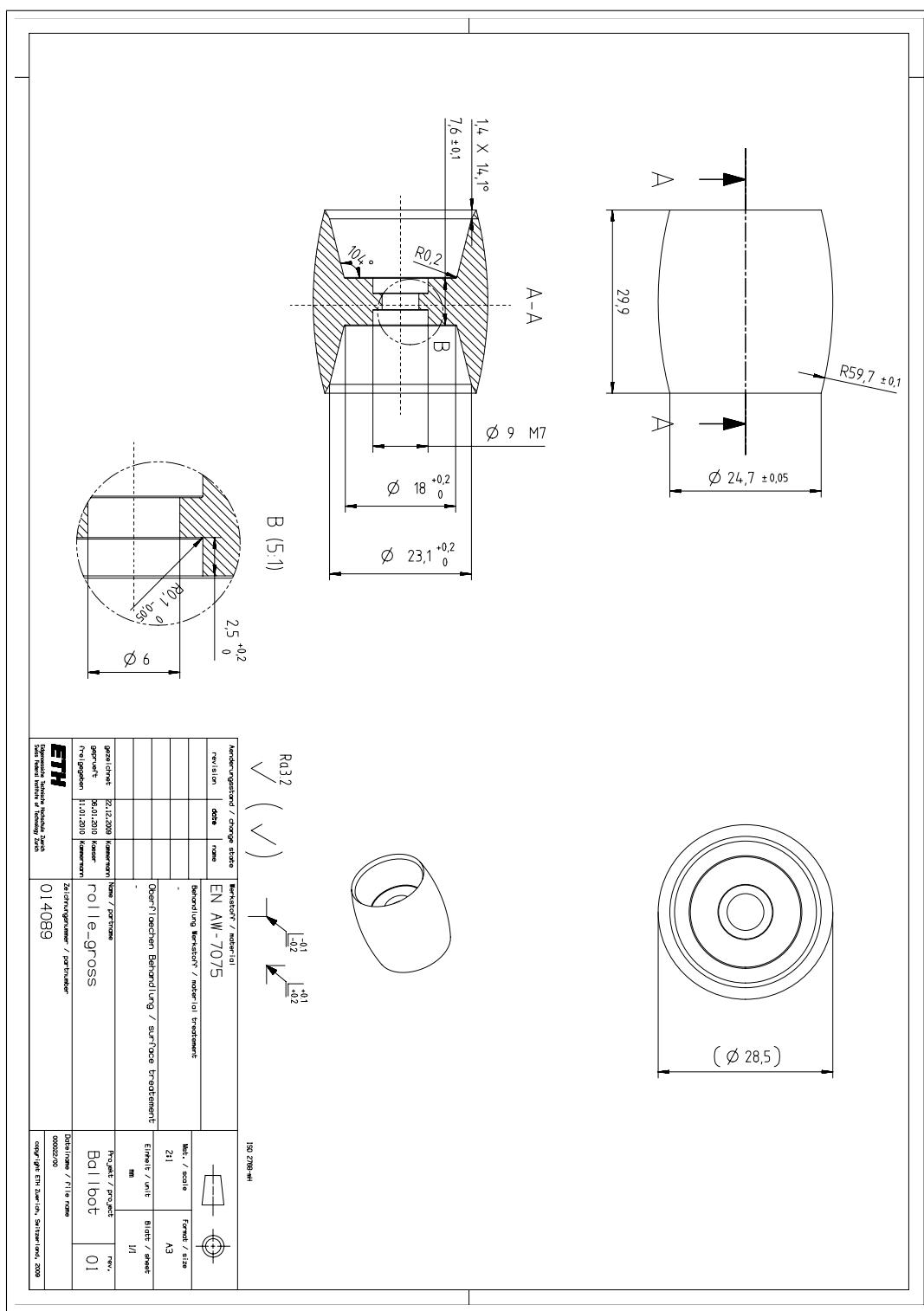


Abbildung A.15: Rolle gross

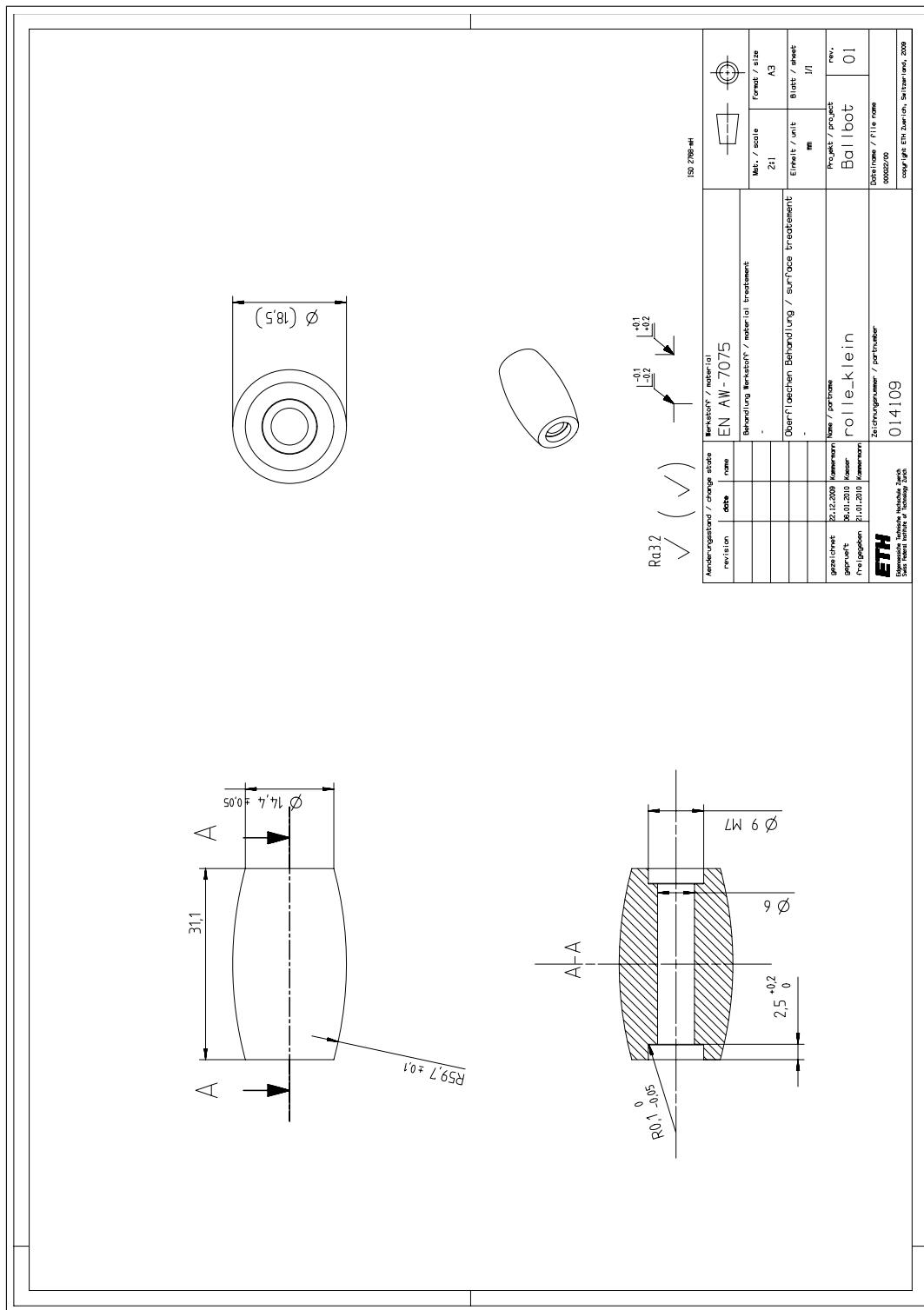


Abbildung A.16: Rolle klein

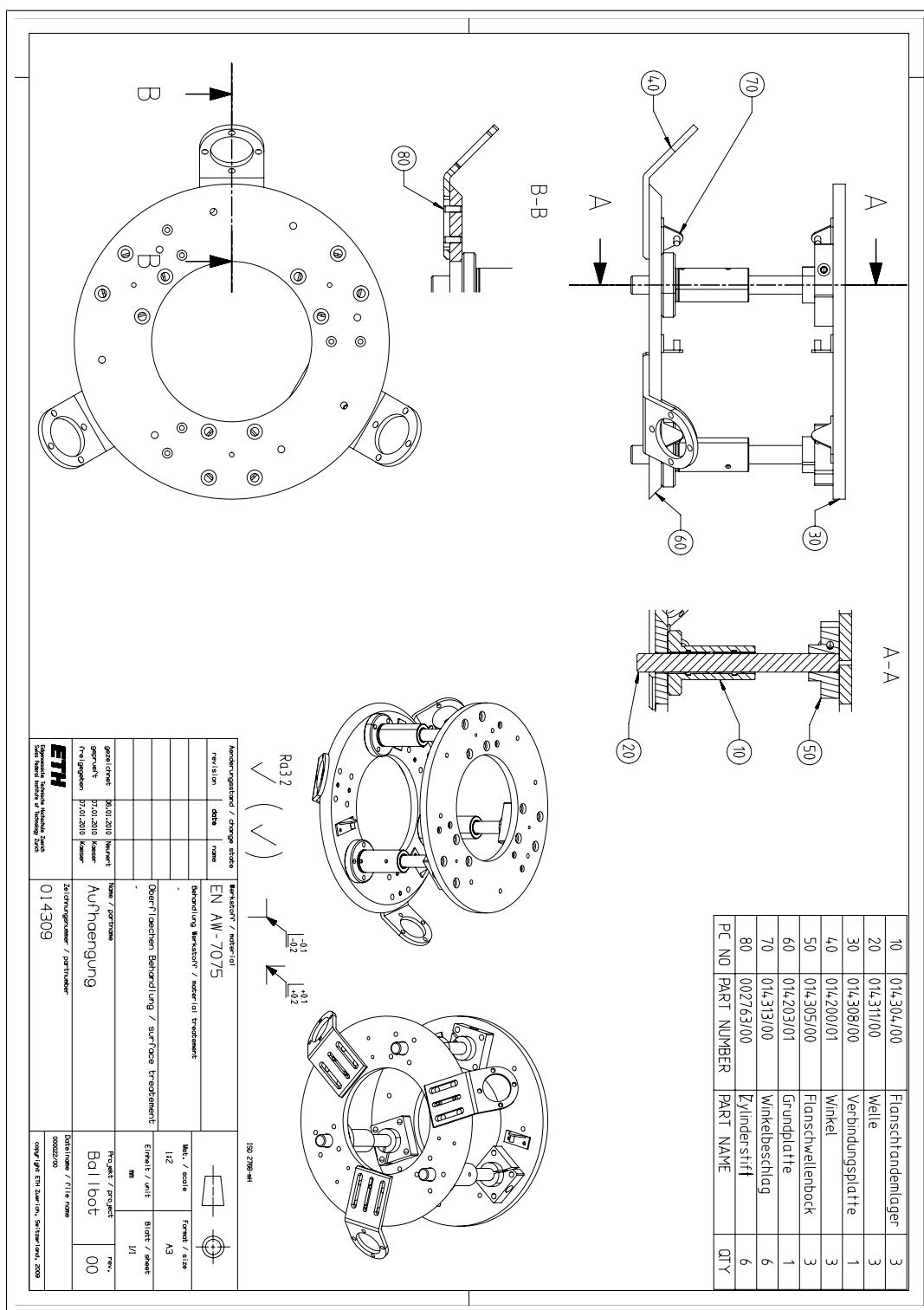


Abbildung A.17: Aufhängung

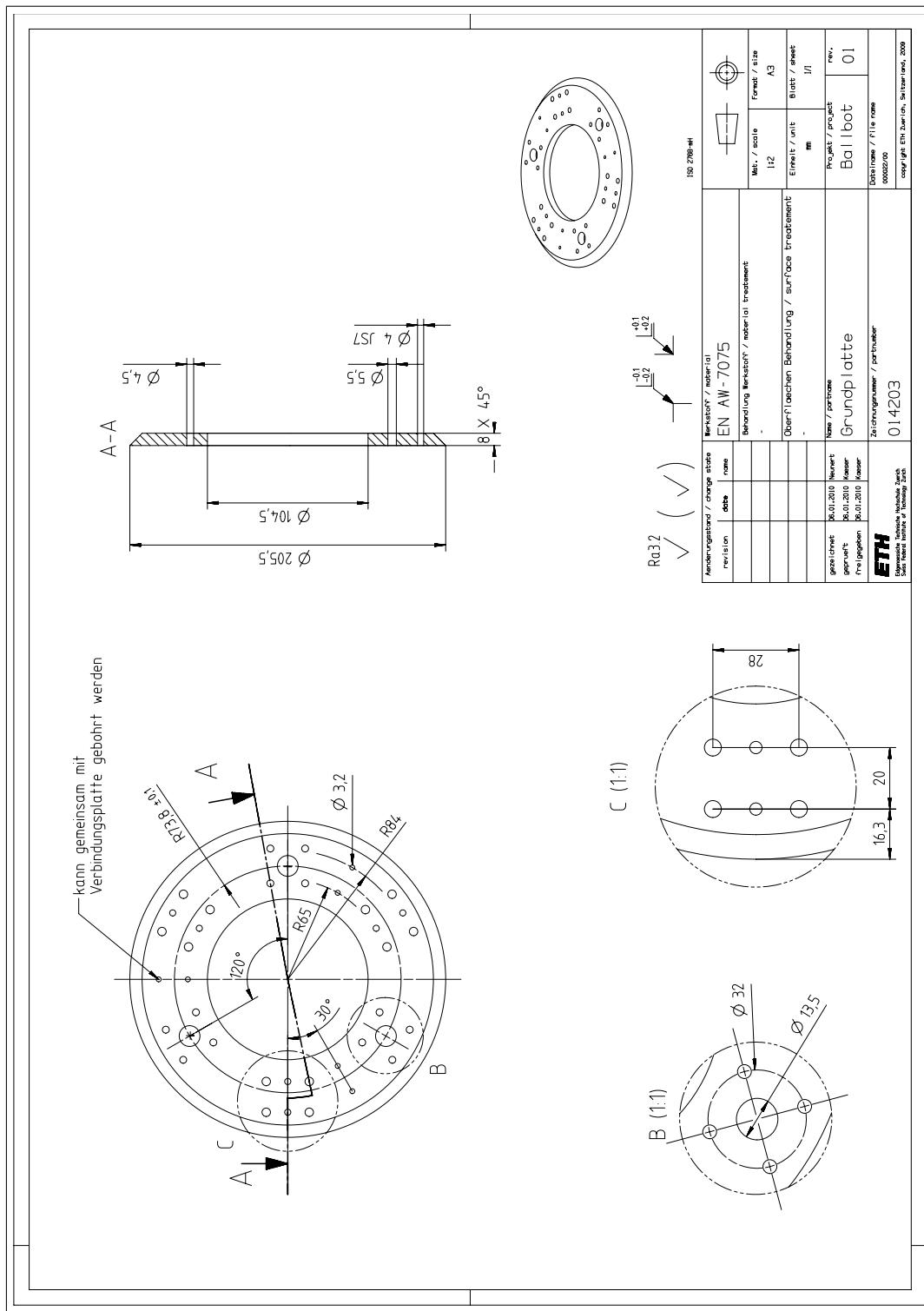


Abbildung A.18: Grundplatte

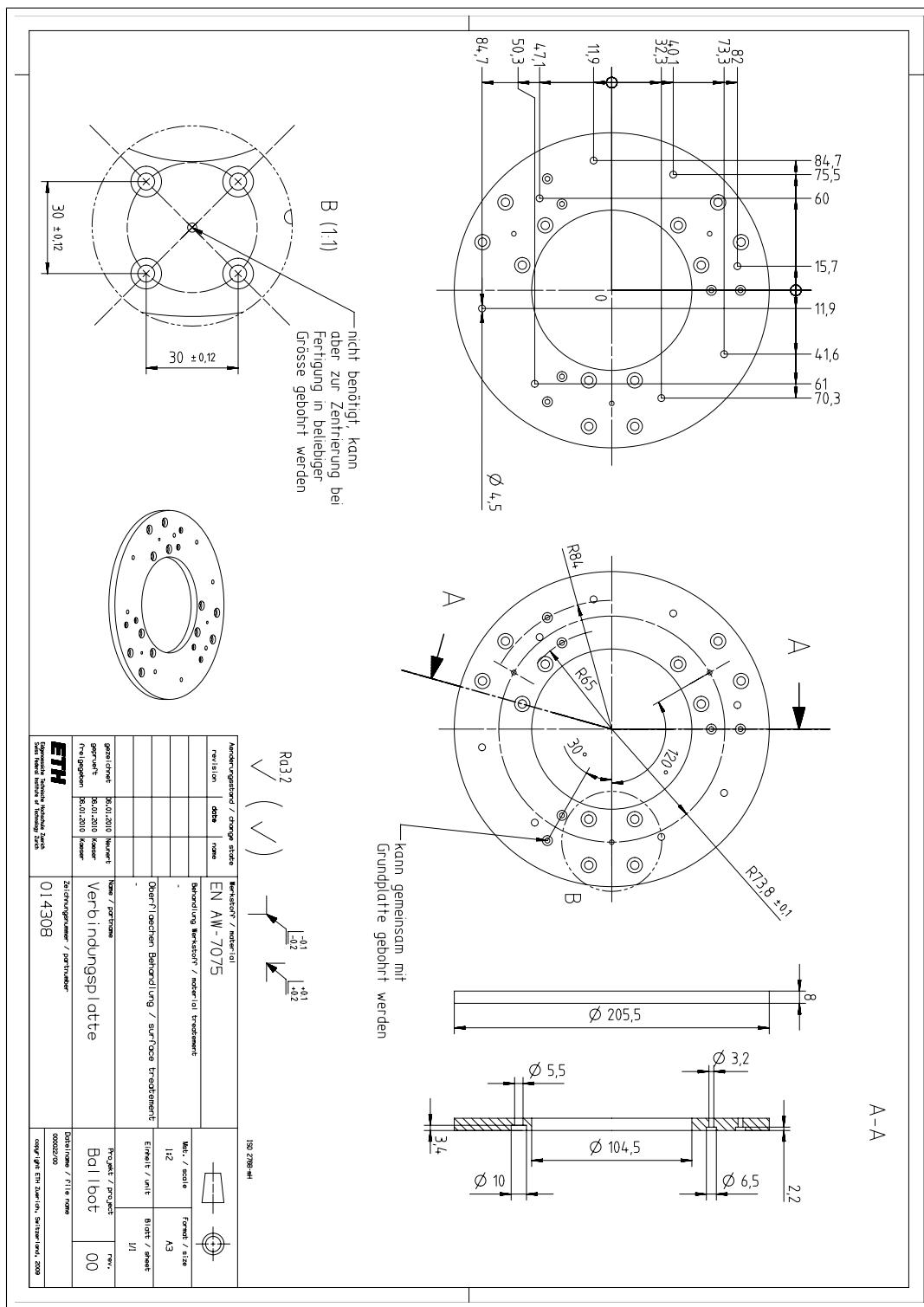


Abbildung A.19: Verbindungsplatte

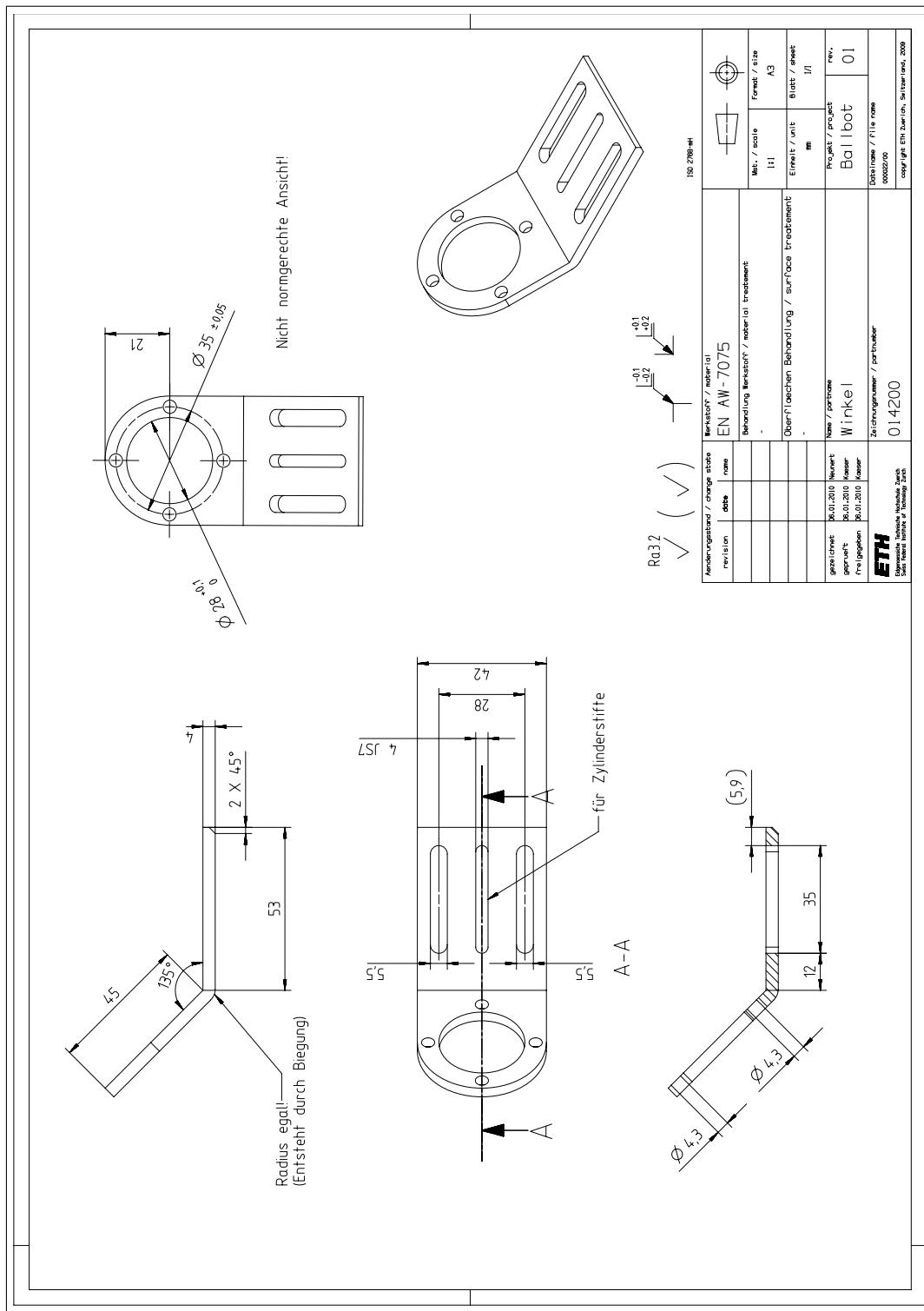


Abbildung A.20: Winkelstück

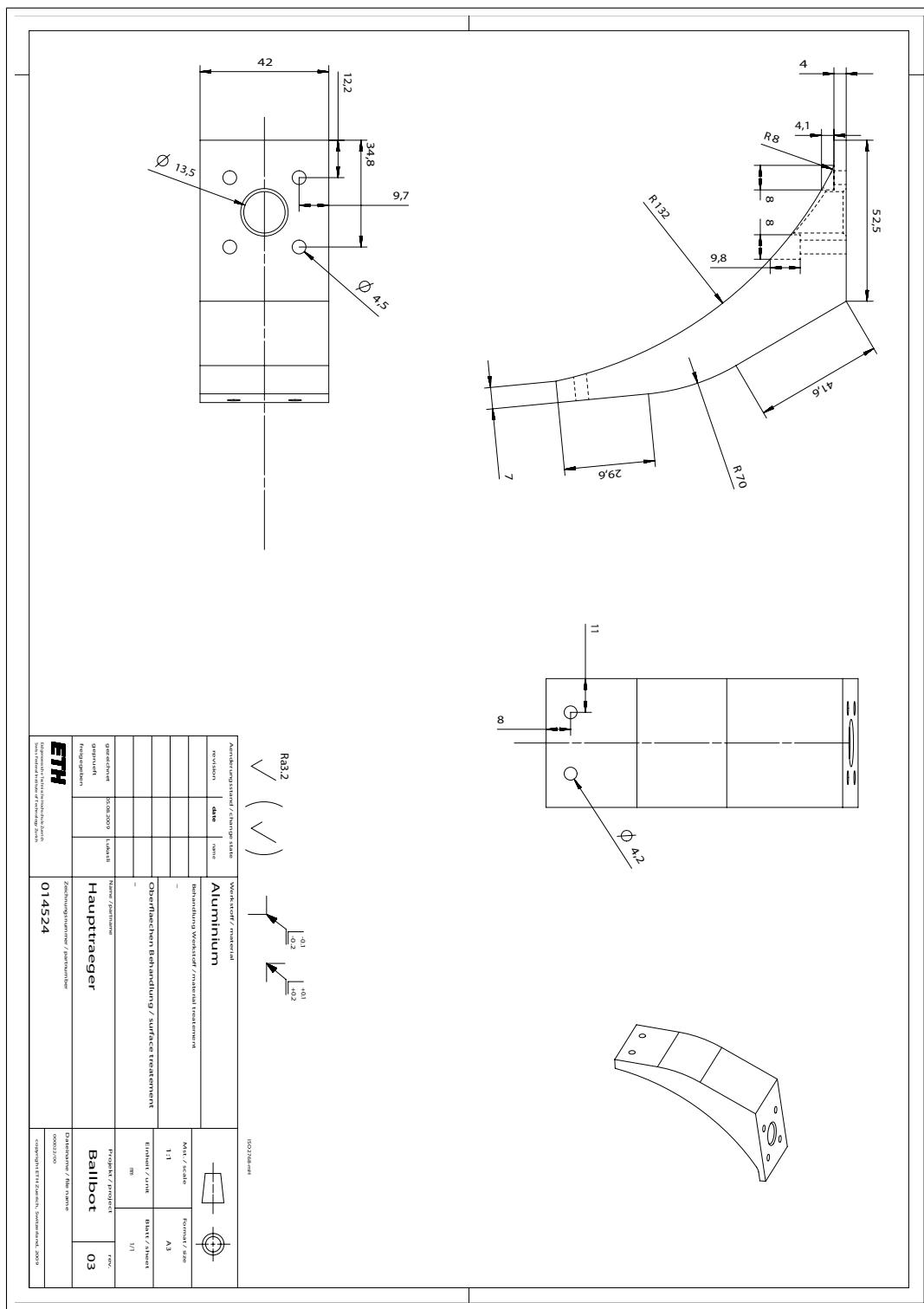


Abbildung A.21: Winkelstück

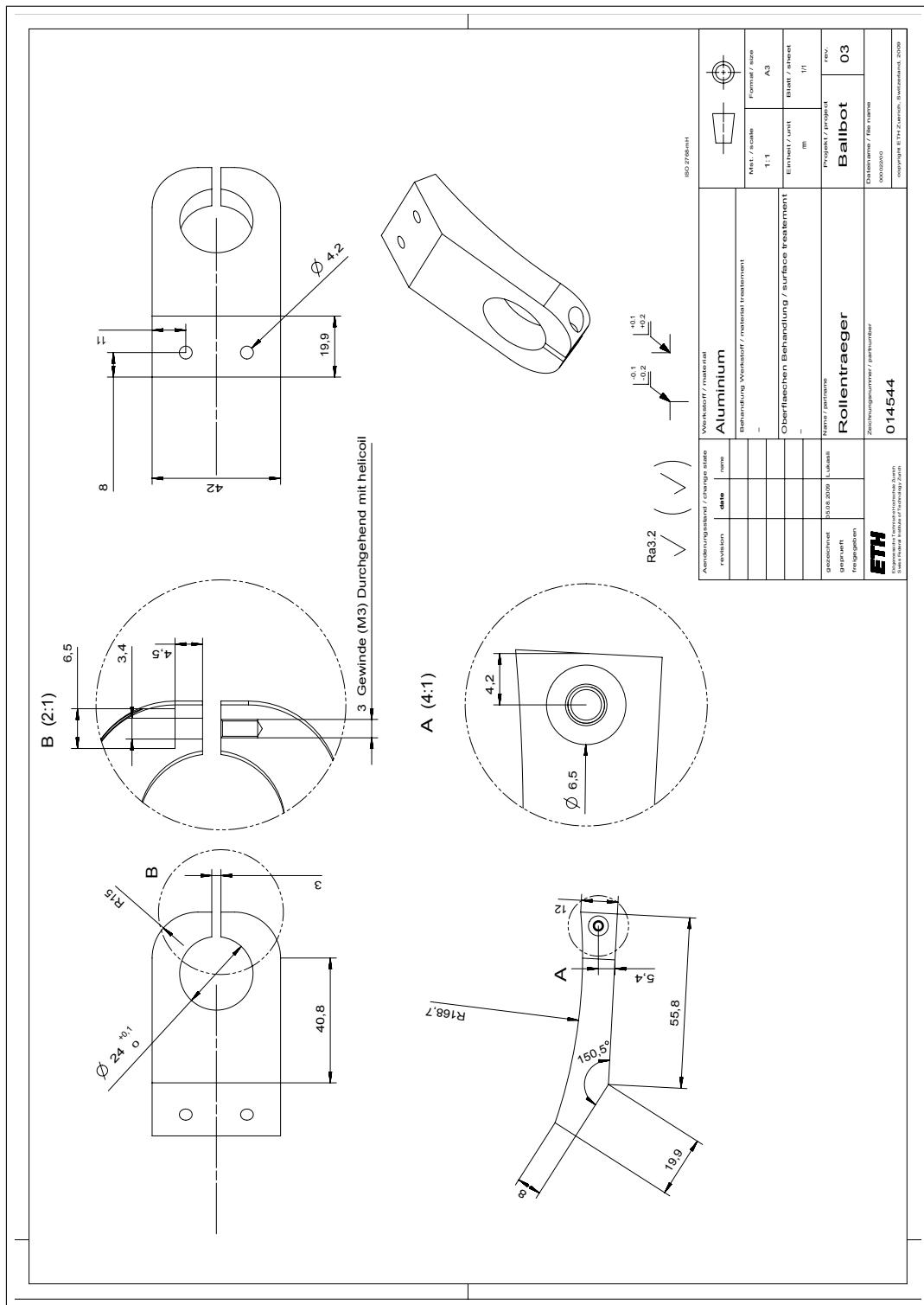


Abbildung A.22: Winkelstück

A.8 Exzentrische Kugelmassen

1 Ausgangslage / Aufgabenstellung

1.1 Aufgabenstellung

Beim Gummieren einer Kugel kann aufgrund des Fertigungsverfahrens nicht verhindert werden, dass sich die ummantelte Kugel beim Abkühlen und Aushärten des Gummis um einige Millimeter im Material absenkt. Zwar kann die Oberfläche wieder absolut rund geschliffen werden, die geometrischen Mittelpunkte der Metallkugel und der Gummimantelkugel werden aber nicht mehr zusammenfallen.

Dadurch besteht die Gefahr, dass die Kugel ungleichmäßig rollen könnte, ähnlich einem ungleichmäßig befüllten, rollendem Honigglass.

1.2 Gegebene Parameter

- Aussenradius Aluminiumhohlkugel $r_A = 125 \text{ mm}$
- Wandstärke Aluminiumhohlkugel $d_A = 2.5 \text{ mm}$
- Sollwandstärke der Gummierung $d_G = 5 \text{ mm}$
- Zu erwartende Absenkung der Aluminiumhohlkugel $d = 3 \text{ mm}$
- Dichte von Luft $\rho_L = 1.2 \text{ kg/m}^3$
- Dichte von Aluminium $\rho_A = 2700 \text{ kg/m}^3$

1.3 Vorbereitende Berechnungen

Da die Massen der Hohlkugeln positionsunabhängig sind, müssen diese nicht durch Integration bestimmt werden. Für die Radien gilt $r_L = r_A - d_A$ und $r_G = r_A + d_G$ und somit ist:

$$m_A = \rho_A \cdot \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot (r_A^3 - r_L^3) = 1.3 \text{ kg} \quad (1)$$

$$m_G = \rho_G \cdot \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot (r_G^3 - r_A^3) = 1.33 \text{ kg} \quad (2)$$

$$m_L = \rho_L \cdot \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot r_L^3 = 9.2 \text{ g bei Standardbedingungen} \quad (3)$$

2 Berechnung des Massenmittelpunktes

Der Massenmittelpunkt eines Körpers berechnet sich wie folgt:

$$\vec{r}_S = \frac{1}{m} \int \vec{r} dm = \frac{1}{m} \int_V \vec{r} \rho dV \quad (4)$$

ρ ist dabei konstant.

2.1 Berechnung

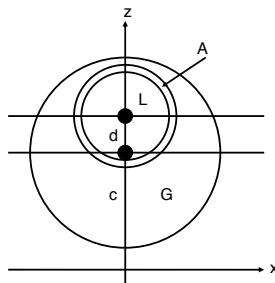


Abbildung 1: geometrische Anordnung der Kugeln

Gegeben sind die Kugeln und ein inertiales kartesisches Koordinatensystem. Die Mittelpunkt der beiden Hohlkugeln liegen auf der z-Achse, derjenige des Gummimantels in der Höhe c und der Mittelpunkt der Aluminiumhohlkugel im Abstand $c + d$ zum Nullpunkt. Die Koordinate c wurde nur um der späteren Verifikation willen eingeführt. Die Situation ist stark abstrahiert in Figur 1 abgebildet.

2.1.1 Kugelgleichungen

Anhand Abb. 1 sind die folgenden drei Kugelgleichungen leicht nachzuvollziehen:

$$\text{Luftkugel: } x^2 + y^2 + (z - c - d)^2 = r_L^2 \quad (5)$$

$$\text{Aluminiumkugel: } x^2 + y^2 + (z - c - d)^2 = r_A^2 \quad (6)$$

$$\text{Gummikugel: } x^2 + y^2 + (z - c)^2 = r_G^2 \quad (7)$$

2.1.2 Ortsvektoren der Massenmittelpunkte

Mit den, im vorherigen Abschnitt veranschaulichten, Verschiebungen und dem allgemeinen Vektor $\vec{r} = [x, y, z]^T$ lassen sich nun die Koordinaten der Massenmittelpunkte nach Gl. (4) berechnen. Die Variablen LK, AK und GK wurden wegen Platzmangel definiert. Man beachte die Integralgrenzen, sie folgen direkt aus den Kugelgleichungen.

$$\begin{aligned} LK &= \int_V \vec{r} dV = \int_{-r_L+c+d}^{r_L+c+d} \int_{-\sqrt{r_L^2-(z-c-d)^2}}^{\sqrt{r_L^2-(z-c-d)^2}-y^2} \int_{-\sqrt{r_L^2-(z-c-d)^2-y^2}}^{\sqrt{r_L^2-(z-c-d)^2-y^2}} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} dx dy dz \\ AK &= \int_V \vec{r} dV = \int_{-r_A+c+d}^{r_A+c+d} \int_{-\sqrt{r_A^2-(z-c-d)^2}}^{\sqrt{r_A^2-(z-c-d)^2}-y^2} \int_{-\sqrt{r_A^2-(z-c-d)^2-y^2}}^{\sqrt{r_A^2-(z-c-d)^2-y^2}} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} dx dy dz \quad (8) \\ GK &= \int_V \vec{r} dV = \int_{-r_G+c}^{r_G+c} \int_{-\sqrt{r_G^2-(z-c)^2}}^{\sqrt{r_G^2-(z-c)^2}-y^2} \int_{-\sqrt{r_G^2-(z-c)^2-y^2}}^{\sqrt{r_G^2-(z-c)^2-y^2}} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} dx dy dz \end{aligned}$$

Die Massenmittelpunkte berechnen sich dann folgendermassen:

$$\vec{r}_{SL} = \frac{\rho_L}{m_L} \cdot LK = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -\frac{(c+d)(d_A-r_A)^3}{(-d_A+r_A)^3} \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$\vec{r}_{SA} = \frac{\rho_A}{m_A} \cdot (AK - LK) = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -\frac{3(4/3(c+d)\pi(d_A-r_A)^3 + 4/3(c+d)\pi r_A^3)}{4\pi(r_A^3(-d_A+r_A)^3)} \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$\vec{r}_{SG} = \frac{\rho_G}{m_G} \cdot (GK - AK) = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -\frac{-dr_A^3 + cd_G(d_G^2 + 3d_G r_A + 3r_A^2)}{d_G(d_G^2 + 3d_G r_A + 3r_A^2)} \end{bmatrix} \quad (11)$$

2.2 Resultat

Der Abstand der Massenmittelpunkte berechnet sich dann wie folgt:

$$ds = r_{SGz} - r_{SAz} = -\frac{d(d_G + r_A)^3}{d_G(d_G^2 + 3d_G r_A + 3r_A^2)} \quad (12)$$

Numerische Auswertung:

$$\begin{aligned} \text{mit } d = 1 \text{ mm ist } ds &= 0.9 \text{ cm} \\ \text{mit } d = 2 \text{ mm ist } ds &= 1.8 \text{ cm} \\ \text{mit } d = 3 \text{ mm ist } ds &= 2.7 \text{ cm} \\ \text{mit } d = 4 \text{ mm ist } ds &= 3.6 \text{ cm} \end{aligned} \quad (13)$$

2.3 Fazit

Die Exzentrizität wird um Faktor 9 verstärkt. Die Massenmittelpunktsverschiebung ist also erstaunlich hoch und könnte durchaus problematisch sein. Sämtliche Berechnungen wurden an Spezialfällen verifiziert, so sind sie beispielsweise in richtiger Weise abhängig von der Variablen c . Außerdem kann auf leichte Weise der allgemeine Massenmittelpunkt eines Kugelsegments berechnet werden und mit Formelwerken verglichen werden.

3 Dynamische Auswirkung der Exzentrizität

3.1 Ziel

Anhand eines einfachen Punktmassenmodells sollte ein eventueller Effekt nachgewiesen und grob untersucht werden können. Reibungseffekte sowie andere externe Kräfte sollen vernachlässigt werden. Es wird also die Situation untersucht, wenn die Kugel einfach auf den ebenen Boden gestellt und mit einer Anfangsgeschwindigkeit versehen wird.

3.2 Modell

Es wurde ein planares 2D-Modell gewählt, eine Kugel mit dem geometrischen Mittelpunkt des Gummimantels als Drehpunkt. Die Massenmittelpunkte der Aluminium- und Luftkugel und derjenige des Gummimantels befinden sich auf einer diametralen Geraden, mit den im vorherigen Kapitel berechneten Abständen. Diese Situation ist insofern Worst-Case, als das sich die Punkte alle in der Ebene der Bewegungsrichtung befinden und somit das grösste Moment auf die Kugel ausüben. Liegen die Massenmittelpunkte beispielsweise zufällig in Richtung von ω_{Kugel} , so ist keine Exzentrizitätseffekt auszumachen.

Auf alle Massenmittelpunkte wirkt jeweils nur die Gewichtskraft. Es lässt sich also folgender Spinsatz, mit dem geometrischen Mittelpunkt des Gummimantels als Drehpunkt, aufstellen:

$$J_{tot} \cdot \ddot{\phi} = -r_{SA} \sin(\phi) \cdot (m_A + m_L)g + r_{SG} \sin(\phi) \cdot m_G g \quad (14)$$

Diese Differentialgleichung wurde in Simulink implementiert, über die Integratorstartwerte lassen sich verschiedene Anfangswerte für Winkel und Winkelgeschwindigkeit vorgeben.

3.2.1 Trägheitsmomente

Weil in Mathematica mit der Berechnung der Massenmittelpunkte schon ideale Voraussetzungen geschaffen wurden, sollen hier auch die korrekten Trägheitsmomente verwendet werden. Das im vorherigen Abschnitt eingeführte Trägheitsmoment J_{tot} setzt sich aus mehreren Teilträgheiten

zusammen:

$$J_{tot} = J_L + J_A + J_G \quad (15)$$

Während die die Trägheitsmomente der Luftkugel und der Aluminiumhohlkugel mittels Satz von Steiner einfach zu berechneten sind, es gilt

$$\begin{aligned} J_L &= \frac{2}{5}m_L r_L^2 + m_L d^2 \\ J_A &= \frac{2}{5}m_A \frac{r_A^5 - r_L^5}{r_A^3 - r_L^3} + m_A d^2 \end{aligned} \quad (16)$$

muss für das Trägheitsmoment des Gummimantels auf die Grunddefinition des Trägheitsmoment zurückgegriffen werden:

$$J_G = \int \int \int (y^2 + z^2) dx dy dz \quad (17)$$

also ist

$$\begin{aligned} J_G &= \int_{-r_G}^{r_G} \int_{-\sqrt{r_G^2 - (z)^2}}^{\sqrt{r_G^2 - (z)^2}} \int_{-\sqrt{r_G^2 - (z)^2 - y^2}}^{\sqrt{r_G^2 - (z)^2 - y^2}} r_x^2 dx dy dz \\ &\quad - \int_{-(r_G - d_G) + d}^{(r_G - d_G) + d} \int_{-\sqrt{(r_G - d_G)^2 - (z-d)^2}}^{\sqrt{(r_G - d_G)^2 - (z-d)^2}} \int_{-\sqrt{(r_G - d_G)^2 - (z-d)^2 - y^2}}^{\sqrt{(r_G - d_G)^2 - (z-d)^2 - y^2}} r_x^2 dx dy dz \\ &= \frac{4}{15}\pi(-5d^2r_A^3 - 2r_A^5 + 2(d_G + r_A)^5)\rho_G \end{aligned} \quad (18)$$

Numerische Auswertung:

$$\begin{aligned} \text{mit } d = 1 \text{ mm ist } J_G &= 0.0144 \text{ kg m}^2 \\ \text{mit } d = 4 \text{ mm ist } J_G &= 0.0142 \text{ kg m}^2 \end{aligned} \quad (19)$$

Die Abhängigkeit des Trägheitsmomentes J_{tot} von der Absinktiefe d verhält sich ähnlich klein, daher wird in der Simulation $J_{tot} = 0.02765 \text{ kg m}^2$ gesetzt.

Die Richtigkeit der Formeln und Überlegungen wurden anhand des Trägheitsmomentes einer normalen Hohlkugel überprüft.

3.3 Simulation

Die Simulation wurde folgendermassen durchgeführt. Für jeweils Absinktiefen von $d = 1 \text{ mm}, 2 \text{ mm}, 3 \text{ mm}, 4 \text{ mm}$ wurde die Bewegung der Kugel für eine bestimmte Anfangsposition und Anfangsgeschwindigkeit simuliert.

Die erste Situation untersucht, wie sich die Kugel im schlimmsten Fall verhält, wenn sie praktisch nur auf den Boden gelegt wird.

Die restlichen drei Situationen unterscheiden sich in der Position der ausgelenkten Aluminiumkugel in Bezug zum geometrischen Mittelpunkt des Gummimantels. Der Winkel ϕ wird aus der Vertikalen gemessen, er ist Null am höchsten Punkt der Kugel.

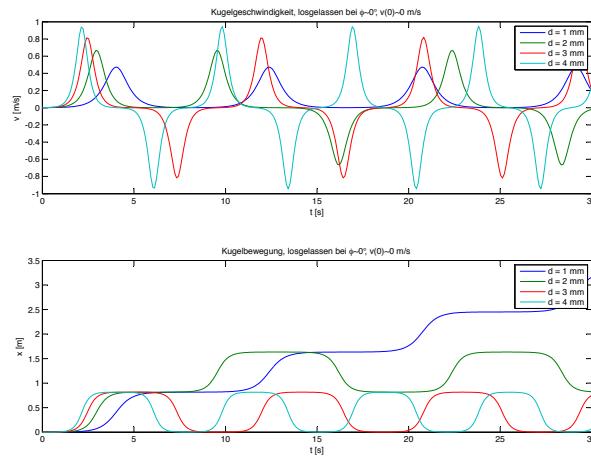


Abbildung 2: Situation 1

3.4 Diskussion

Abbildung 2 zeigt das Verhalten der Kugel bei marginaler Anfangsgeschwindigkeit. Eigentlich sollte die Kugel einfach sehr langsam wegrollen. Stattdessen oszilliert sie am Boden mit einer Amplitude, welche dem Umfang $u_{Kugel} = 0.82$ m entspricht. Je nach Absinktiefe gelingen der Kugel eine, zwei oder mehr Umdrehungen. Man stelle sich den Ballbot vor, der diese Bewegung zusätzlich durch Instabilität auszuregeln hat.

Abbildung 3 zeigt die Bewegung der Kugel bei einer Anfangsgeschwindigkeit von 10 cm/s. Eine normale Kugel sollte in 30 Sekunden 3 Meter weit Rollen, durch die Exzentrizität rollt unsere Kugel mindestens doppelt so weit. Dies liegt an der potentiellen Energie, die durch den Winkel $\phi_0 = 0^\circ$ vorhanden ist. Natürlich sind sämtliche Reibungseffekte vernachlässigt.

Die prophezeite „Eierbewegung“ ist ganz klar erkennbar und beträchtlich.

Mit Abbildung 4 wird die kritische Abhängigkeit der Eindringtiefe verdeutlicht. Bei einem Anfangswinkel $\phi = 90^\circ$ reicht bei einer Absinktiefe von $d = 3$ mm und $d = 4$ mm eine Anfangsgeschwindigkeit von $v(0) = 0.5$ m/s bereits nicht mehr, um die Kugel ins Rollen zu bringen. Das scheint ein hoher Wert zu sein. Schön ersichtlich ist auch, was für die Richtkeite der

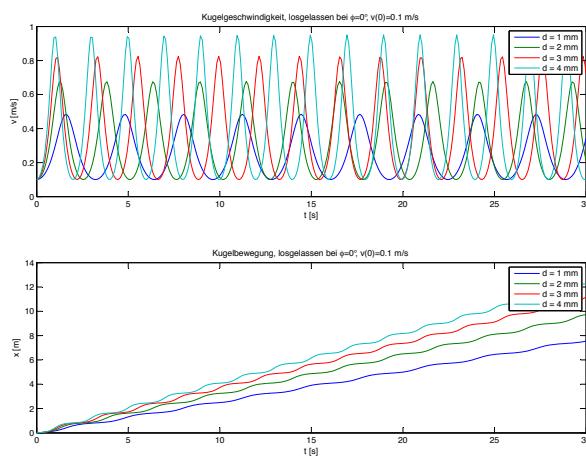


Abbildung 3: Situation 2

Simulation spricht, dass die Anfangsgeschwindigkeit über die Zeit konstant bleibt. Außerdem ist zu erkennen, dass sich der „Eiereffekt“ mit steigender Geschwindigkeit verringert.

Einen weiteren „Worst-Case“-Fall zeigt Abbildung 5: Liegt der Kugelschwerpunkt am tiefsten Punkt (der Normalfall), dann reicht selbst eine Anfangsgeschwindigkeit von 0.8 m/s nur für die zwei geringeren Absinktiefen, um die Kugel ins Rollen zu bringen.

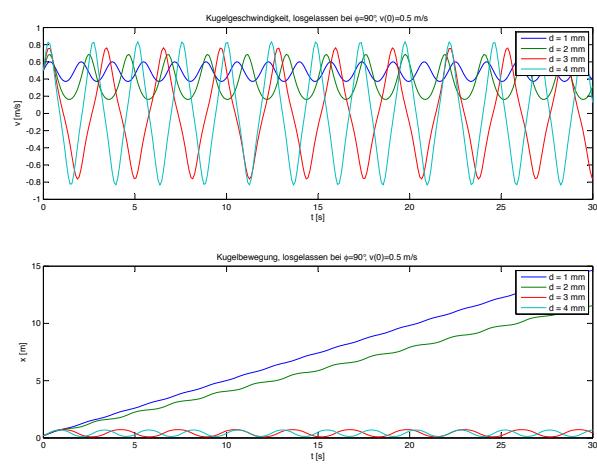


Abbildung 4: Situation 3

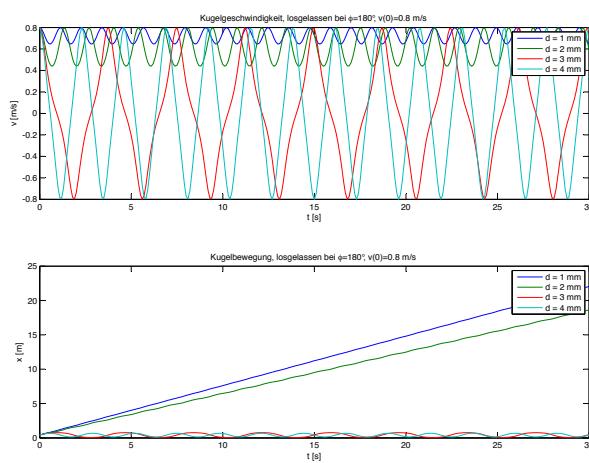


Abbildung 5: Situation 4

4 Fazit

Der Eiereffekt wurde ganz klar nachgewiesen und seine Auswirkungen erfasst. Die Untersuchungen der Bewegungen ohne Reibungseinflüsse zeigen ein pessimistisches Bild. So wäre die Kugel wohl kaum brauchbar. Abbildung 6 zeigt jedoch, dass die Kräfte, die für diese Bewegungen ver-

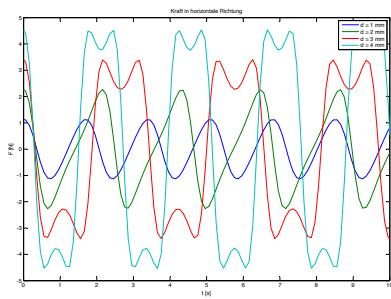


Abbildung 6: Kugelkraft $F_K = \ddot{\phi} r_G m_{tot}$

antwortlich sind, eher klein sind und vom Ballbot ohne weiteres aufgebracht werden können. Sie übersteigen 5 N auch bei grösserer Geschwindigkeit nicht. Auch die kinetische Energie der Kugel bewegt sich im Joule-Bereich.

Der „Eier-Effekt“ aufgrund der Exzentrizität der beiden Kugeln wird wohl mit Reibungs- und Dämpfungseffekten kaum noch messbar sein.

A.9 Vergleich der IMUs

| | Crista | GX3 | IG-500 | MTi |
|----------------------------|----------------|--------------|--|--|
| Gyros | | | | |
| Dynamic Range °/sec | ±300 | ±300 or more | ± 300 | ± 300 Range: ± 90 Pitch ± 180 deg Roll/Heading |
| Sensitivity | 0.6°/s | ±2° dynamic | ± 2.0° RMS (Res < 0.05°) ± 0.5° (Pitch, Roll) ± 1° (Heading) | 2 deg RMS (Res < 0.05 deg) |
| Sampling Rate | | | | |
| Onboard Hz | 200 | 1k | 166 AHRS | 120 |
| External Hz | (1000) | | 500 cal. Sensors | 512 |
| Attitude | | | x | |
| Magnetic Field | | | | |
| Dynamic Range gauss | | ±2.5 | ± 1.2 | ± 0.75 |
| Power Consumption W | 0.5 | 0.4 | 0.320 | 0.35 |
| Dimensions mm | 28x30x15 | 44x25x11 | 50x36x22 | 58x58x22 |
| Weight g | 38 | 18 | 40 | 50 |
| Prize | 2000\$ | ~ 2300\$ | 1699 Euro | 1750 Euro |
| Interface | CAN, RS-232 | USB, RS-232 | USB, RS-232 | RS-232, RS-485, RS-422, USB |
| Useability | CAN | | | ETH Support |

Abbildung A.23: Vergleich der IMUs

| | | |
|---------------------------------|--|---|
| | XSens MTi | SBG IG-500 |
| Dynamic Range °/sec | ± 300 | ± 500 |
| Sensitivity | 2 deg RMS (Res < 0.05 deg) | ± 5 °/s |
| Accelerometer Range | ±5 g | ±5g |
| Data output rate onboard | 120 Hz | 160 Hz |
| Data output rate raw | (512 with windows) | 500 Hz |
| Output data | Euler Angles, rotation matrix, quaternion and magnetic field | Euler, Matrix, Quaternion, Raw data and magnetic field |
| Magnetic Field gauss | ± 0.75 | ± 1.2 |
| Power Consumption W | 0.35 | 0.32 |
| Dimensions mm | 58x58x22 | 27x30x14 |
| Weight g | 50 | 39 |
| Interface | RS-232, RS-485, RS-422, USB | RS-232, TTL, USB |
| Prize | 1990 Euro | 1700 Euro |
| Lead Time | 2d – 2w | ? |
| Usability | ETH Support | |

Abbildung A.24: Vergleich der besten IMU-Kandidaten

A.10 Linear Actuator



Electrak 1SP
12, 24 und 36 VDC – Lasten bis 340 N

» Bestellschlüssel – siehe Seite 64
 » Glossar – siehe Seite 72
 » Schaltbild – siehe Seite 44

| Standardmerkmale und Vorteile | |
|--|--|
| <ul style="list-style-type: none"> • Sehr kompakt und leicht • Potentiometer-Rückmeldung • Korrosionsfestes Gehäuse • Selbsthemmendes ACME-Gewinde • Wartungsfrei • Intern begrenztes Schubrohr • Idealer Ersatz für gleichgroße Pneumatik- und Hydraulikzylinder | |

| Allgemeine Daten | |
|---------------------|---|
| Parameter | Electrak 1SP |
| Gewindetyp | ACME |
| Intern begrenzt | ja |
| Handbetätigung | nein |
| Dynamisches Bremsen | nein |
| Haltebremse | nein, selbsthemmend |
| Endlagenschutz | nein |
| Mittellagenschutz | nein |
| Motorschutz | Autom. rückstellender Thermoschalter |
| Motoranschluss | freie Kabelanschlüsse und Steckverbinder |
| Motorsteckverbinder | Packard Electric Pack-Con Stecker 8911773 mit Klemme 6294511. Passender Steckverbinder: 8911772 mit Klemme 8911639 (Teilenr. 9300-448-001) |
| Zertifikate | CE |
| Optionen | keine |

| Leistungsspezifikation | |
|--|--------------------|
| Parameter | Electrak 1SP |
| Maximale Last, dynamisch / statisch | [N] |
| SP •• -09A04 | 110 / 1300 |
| SP •• -09A08 | 225 / 1300 |
| SP •• -17A08 | 340 / 1300 |
| SP •• -17A16 | 340 / 1300 |
| Geschwindigkeit, ohne / bei max. Last | [mm/s] |
| SP •• -09A04 | 75 / 52 |
| SP •• -09A08 | 45 / 33 |
| SP •• -17A08 | 26 / 17 |
| SP •• -17A16 | 14 / 7 |
| Verfügbare Eingangsspannungen | [VDC] |
| Standardhublängen | [Zoll] |
| Betriebstemperaturgrenzen | [°C] |
| Einschaltdauer bei voller Last und 25° C | [%] |
| Längsspiel, max. | [mm] |
| Einspannmoment | [Nm] |
| Leiterquerschnitt | [mm ²] |
| Leiterlänge | [mm] |
| Schutzart | |
| Potentiometer | [kOhm] |

* Hublänge von (6 Zoll) für SP •• -17A16 nicht möglich.
** Siehe Tabelle auf Seite 17 für Widerstandsänderung pro mm.

| Kompatible Steuerungen | |
|------------------------|-------------|
| Steuerung | Siehe Seite |
| DPDT-Schalter | 48 |
| DPDT-Schalterkasten | 49 |
| AC-247 ELS | 52 |
| DCG-150 | 54 |

Linearaktuatoren

Electrak 1SP

12, 24 und 36 VDC – Lasten bis 340 N

S: Hub
A: eingefahrene Länge
A1: Kabel für Potentiometer-Rückmeldung, Länge = 635 mm

A2: Schwarzer Leiter für 12-VDC-Einheiten, weißer Leiter für 24-VDC-Einheiten, blauer Leiter für 36-VDC-Einheiten
A3: Gelber Leiter

| Bestellter Hub | [Zoll] | 2 | 4 | 6* |
|-----------------------------------|-------------|-------------|--------------|--------------|
| Tatsächlicher Hub (S) | [mm (Zoll)] | 58,7 (2,31) | 115,1 (4,53) | 171,5 (6,75) |
| Eingefahrene Länge (A) | [mm] | 197,9 | 254,3 | 310,7 |
| Gewicht | [kg] | 0,54 | 0,64 | 0,68 |
| Potentiometer-Widerstandsänderung | [Ohm/mm] | 94 | 47 (63)** | 31 |

* Hublänge von 6 Zoll für SP ** -17A16 nicht möglich. ** SP ** -17A16 mit Hublänge von 4 Zoll = 63 Ohm/mm, alle anderen Hublängen = 47 Ohm/mm.

Leistungsdiagramme

Geschwindigkeit/Strom vgl. mit Last Geschwindigkeit/Strom vgl. mit Last Geschwindigkeit/Strom vgl. mit Last

12 VDC 24 VDC 36 VDC

V: Geschwindigkeit I: Strom F: Last

1: Geschwindigkeit SP12-09A04
2: Geschwindigkeit SP12-09A08
3: Geschwindigkeit SP12-17A08
4: Geschwindigkeit SP12-17A16
5: Strom SP12-09A04
6: Strom SP12-09A08
7: Strom SP12-17A08
8: Strom SP12-17A16

V: Geschwindigkeit I: Strom F: Last

1: Geschwindigkeit SP24-09A04
2: Geschwindigkeit SP24-09A08
3: Geschwindigkeit SP24-17A08
4: Geschwindigkeit SP24-17A16
5: Strom SP24-09A04
6: Strom SP24-09A08
7: Strom SP24-17A08
8: Strom SP24-17A16

V: Geschwindigkeit I: Strom F: Last

1: Geschwindigkeit SP36-09A04
2: Geschwindigkeit SP36-09A08
3: Geschwindigkeit SP36-17A08
4: Geschwindigkeit SP36-17A16
5: Strom SP36-09A04
6: Strom SP36-09A08
7: Strom SP36-17A08
8: Strom SP36-17A16

www.danahermotion.com

17

A.11 Servo

HS-805MG Mega Metal Gear Servo

32805S



Additional Views



[Click to view larger image](#)

The HS-805MG heavy duty supersized servo was designed to handle the punishment dished out by the latest wave of large 1/5th scale vehicles. With big gears in a big case powered by a big motor this servos was designed to take abuse and keep on going.

Features

- Large 8mm Output shaft
- Dual Ball Bearings
- Heavy Duty Metal Gear Train
- Water and Dust Resistant Case

| Specifications | | Spare Parts |
|--------------------------------|----------------------|--------------------|
| Motor Type: | 3 Pole Ferrite | 56410 - Gear Set |
| Bearing Type: | Dual Ball Bearing | 56352 - Case Set |
| Speed (4.8V/6.0V): | 0.19 / 0.14 | |
| Torque oz./in. (4.8V/6.0V): | 275 / 343 | |
| Torque kg./cm. (4.8V/6.0V): | 19.8 / 24.7 | |
| Size in Inches: | 2.59 x 1.18 x 2.26 | |
| Size in Millimeters: | 65.79 x 29.97 x 57.4 | |
| Weight ounces: | 6.95 | |
| Weight grams: | 197.03 | |

Abbildung A.25: Der Modellbauservo HS-805MG von Hitec

A.12 Die Laserdistanzsensoren im Vergleich

Evaluation Laserdistanzsensor

| Typ | URG-04LX-F01 | URG-04LX | URG-04LX-UG01 | PBS-03JN |
|--------------------|--|---|--------------------------------|---|
| Producer | Hokuyo | Hokuyo | Hokuyo | Hokuyo |
| Power source | 12VDC±10% | 5VDC±5% ->2) | 5VDC±5%(USB Bus power) | 24VDC(Allowable range 18 to 30VDC including ripple) |
| Scan Time | 28msec./scan | 100ms/scan | 100ms/scan | 100msec./scan ->5 |
| Detection Distance | 20 to 500mm(White Square Kent Sheet 80mm) | 60 to 4095mm | 20 to 5600mm | 200mm to 3000mm ->5 |
| Angle | 240° | 240° | 240° | 178.2° ->5 |
| Weight | Approx. 260g(with cable attachment) | Approx. 160 g | 160g | 500g |
| Dimensions | 60 x 75 x 60 mm | 50 x 50 x 70 mm | 50 x 50 x 70 mm | 75 x 70 x 60mm |
| Interface | USB2.0(Full Speed), RS-232C(19.2k, 57.6k, 115.2k, 250k, 500k, 750kbps) | USB, RS-232C(19.2k, 57.6k, 115.2k, 250k, 500k, 750kbps) | USB2.0/1.1[Mini B](Full Speed) | |
| Angular Resolution | 0.36°(360°/1,024 steps) | 0.36°(360°/1,024 steps) | 0.36°(360°/1,024 steps) | 0.36°(360°/1,024 steps) |
| Price | \$2845.00 ->1) | \$ 2369 ->3 | \$ 1284 ->4, \$ 1175 ->6 | \$ 1374.39 ->5 |

1) <http://www.robotshop.ca/high-end-lasers-obstacle-detectors-2.html> am 20.11.2009

2) Sensor will not operate with USB bus power. Prepare power source separately.

3) <http://www.robotshop.ca/hokuyo-urg-04lx-laser-rangefinder-1.html> am 20.11.2009

4) <http://www.robotshop.ca/hokuyo-urg-04lx-ug01-scanning-laser-rangefinder-1.html> am 20.11.2009

5) <http://www.robotshop.ca/hokuyo-pbs-03in-infrared-rangefinder-1.html> am 23.11.2009

6) http://www.aaronname.com/robotics/parts/c_Sensors.html, am 23.11.2009

restliche Daten zu den Hokuyo-Geräten von der Hokuyo-Homepage: <http://www.hokuyo-aut.jp/>

A.13 Systemmodellierung Planar

1 Systemmodellierung

1.1 Modell

1.1.1 Annahmen

- **Entkoppelte Bewegungen:** 3 planare Modelle

Wesentliche Vereinfachung der Modellierung ermöglicht schnelleren Einstieg in den physikalischen Charakter des Systems. In diesem Schritt werden die vorhandenen Kopplungseffekte vernachlässigt und zu einem späteren Zeitpunkt genauer betrachtet.

- **3 Starrkörper:** Kugel (K), Antrieb (Omniwheel und Motoren, W), Aufbau (A)

Dies sind die Körper, zu denen das System zusammengefasst werden kann. Sie bewegen sich unabhängig voneinander und haben durch ihre Masse den grössten Einfluss auf die Dynamik.

- **Keine Schlupf:**

Wird versucht durch geeignete Konstruktion zu minimieren und sollte am realen System höchstens in zu vernachlässigendem Masse auftreten. Schlupf würde zudem das Modell erheblich komplizierter machen.

- **Reibung vernachlässigt:**

Durch unendlich hohe Haftreibung (kein Schlupf) kann man die Gleitreibung in den Kontaktstellen der Starrkörper vernachlässigen. Die Rollreibung und die viskose Reibung aus dem Luftwiderstand wird aus dem Vergleich mit vergleichbaren Projekten vernachlässigt, da diese relativ zur Dynamik als sehr klein dokumentiert wurden.

- **Motorendynamik schnell:** Konstantes Drehmoment durch Leistungselektronik gesteuert.

Dynamik der Leistungselektronik und des Motors ist um Größenordnungen schneller als die mech. Dynamik.

- **Kugel bewegt sich nur in horizontaler Richtung:**

Um keinen Schlupf zu erhalten, darf sich die Kugel nicht vom Boden abheben. Diese Bedingung schränkt das System in unserem Rahmen aber nicht wesentlich ein.

1.1.2 Aufbau

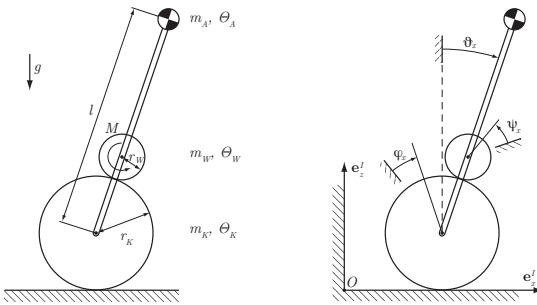


Abbildung 1.1: Vereinfachtes Modell des Ballbots

1.1.3 Parameter

- $m_K = 2.29 \text{ kg}$ - Masse der Kugel
- $m_W = 3 \text{ kg}$ - Masse der Motoren und Omnidriven
- $m_A = 10 \text{ kg}$ - Masse des Aufbaus
- Θ_K - Trägheit der Kugel
- Θ_W - Trägheit der Motoren und Omnidriven
- Θ_A - Trägheit des Aufbaus
- $r_K = 0.125 \text{ m}$ - Radius der Kugel
- $r_W = 0.06 \text{ m}$ - Radius der Omnidriven
- $l = 0.34 \text{ m}$ - Höhe des Schwerpunktes ab Kugelmittelpunkt
- $g = 9.81 \text{ m/s}^2$ - Gravitationskonstante
- $k_M = 20.2 \text{ mNm/A}$ - Drehmomentkonstante
- $i = 26 : 1$ - Übersetzung Getriebe
- $\eta_G = 0.81$ - maximaler Wirkungsgrad Getriebe
- $\eta_M = 0.89$ - maximaler Wirkungsgrad Motor
- M - von den Motoren erzeugtes Moment

1.1.4 Koordinaten

- φ_x - absoluter Winkel der Kugeldrehung um x Achse
- ϑ_x - absoluter Neigungswinkel des Körpers um x Achse
- ψ_x - Winkel des Antriebsrades in der y-z-Ebene
- x_K - Position der Kugel

Das System besitzt zwei Freiheitsgrade.

Zur Beschreibung des Systems wählen wir die Minimalkoordinaten $\vec{q} = \begin{bmatrix} \varphi_x \\ \vartheta_x \end{bmatrix}$

1.1.5 Bindungsgleichungen

Das System besitzt zwei Freiheitsgrade und die Koordinaten können in Abhängigkeit von φ_x und ϑ_x formuliert werden.

Für die Kugel gilt:

$$x_K = \varphi_x r_K$$

$$z_K = r_K$$

Für das Antriebsrad gilt:

$$\begin{aligned} x_W &= x_K + \sin \vartheta_x \cdot (r_K + r_W) \\ &= \varphi_x r_K + \sin \vartheta_x \cdot (r_K + r_W) \\ z_W &= r_K + \cos \vartheta_x \cdot (r_K + r_W) \end{aligned}$$

Für den Aufbau gilt:

$$\begin{aligned} x_A &= x_K + \sin \vartheta_x \cdot l \\ &= \varphi_x r_K + \sin \vartheta_x \cdot l \\ z_A &= r_K + \cos \vartheta_x \cdot l \end{aligned}$$

Die Bindungsgleichung für ψ_x wird mit Hilfe der Gleichsetzung der Geschwindigkeiten (Starrkörper-Geschwindigkeits-Formel) im Kontaktpunkt zwischen Kugel und Antriebsrad hergeleitet.

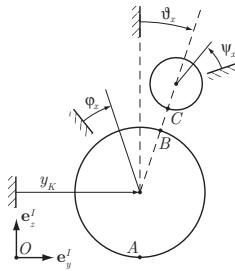


Abbildung 1.2: Skizze mit Koordinaten und Kontaktstellen

$$v_A = 0$$

$$v_B = \begin{bmatrix} \dot{x}_K \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \dot{\varphi}_x \\ 0 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} r_K \sin \vartheta_x \\ 0 \\ r_K \cos \vartheta_x \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{x}_K + \dot{\varphi}_x r_K \cos \vartheta_x \\ 0 \\ -r_K \dot{\varphi}_x \sin \vartheta_x \end{bmatrix}$$

$$\begin{aligned} v_C &= \begin{bmatrix} \dot{x}_K \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \dot{\vartheta}_x \\ 0 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} (r_K + r_W) \sin \vartheta_x \\ 0 \\ (r_K + r_W) \cos \vartheta_x \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ -\dot{\psi}_x \\ 0 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} -r_W \sin \vartheta_x \\ 0 \\ -r_W \cos \vartheta_x \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} \dot{x}_K + \dot{\vartheta}_x (r_K + r_W) \cos \vartheta_x + r_W \dot{\psi}_x \cos \vartheta_x \\ 0 \\ -\dot{\vartheta}_x (r_K + r_W) \sin \vartheta_x - r_W \dot{\psi}_x \sin \vartheta_x \end{bmatrix} \end{aligned}$$

Da das System ohne Schlupf modelliert wird, muss gelten $v_B = v_C$. Die erste und dritte Komponente von v_B und v_C lassen sich somit gleichsetzen und Auflösen nach $\dot{\psi}_x$ ergibt aus beiden Gleichungen:

$$\dot{\psi}_x = \frac{r_K}{r_W} (\dot{\varphi}_x - \dot{\vartheta}_x) - \dot{\vartheta}_x$$

1.1.6 Systemstruktur

Input: Strom für Motoren zwischen Aufbau und Omnidisk $i_x(t)$. Es gilt $M_x(t) = k_d \cdot i_x(t)$

Output: $\varphi(t), \dot{\vartheta}(t)$

Zustände: $\varphi(t), \dot{\varphi}(t), \vartheta(t), \dot{\vartheta}(t)$

1.2 Lagrange

1.2.1 Vorgehen

Wir haben uns für die Lagrange-Methode entschieden, weil diese für Probleme dieser Art einfacher anzuwenden ist, und es bei vergleichbaren Projekten auch so gehandhabt wird. Das Vorgehen nach Lagrange ist folgendes:

- Kinetische(T) und Potentielle(V) Energien aller Starrkörper bestimmen.
- Nichtpotentialkräfte bestimmen und als Vektor notieren.
- Lagrangegleichung nach \ddot{q} auflösen, bzw. in Matrixform aufschreiben.

1.2.2 Energien

Der Kugel:

$$T_K = \frac{1}{2}m_K(r_K\dot{\varphi}_x)^2 + \frac{1}{2}\Theta_K\dot{\varphi}_x^2$$

$$V_K = m_Kgr_K$$

Der Motoren und Omnidrives:

$$\begin{aligned} T_W &= \frac{1}{2}m_W\dot{\vec{x}}_W \cdot \dot{\vec{x}}_W^\top + \frac{1}{2}\Theta_W\dot{\psi}_x^2, \quad \text{wobei } \vec{x}_W = \begin{bmatrix} r_K\varphi_x + (r_K + r_W)\sin\vartheta_x \\ 0 \\ r_K + (r_K + r_W)\cos\vartheta_x \end{bmatrix} \\ &= \frac{1}{2}m_W \begin{bmatrix} (r_K\dot{\varphi}_x) + (r_K + r_W)\cos\vartheta_x\dot{\vartheta}_x \\ 0 \\ -(r_K + r_W)\sin\vartheta_x\dot{\vartheta}_x \end{bmatrix}^2 + \frac{1}{2}\Theta_W \left(\frac{r_K}{r_W}(\dot{\varphi}_x - \dot{\vartheta}_x) - \dot{\vartheta}_x \right)^2 \\ &= \frac{1}{2}m_W \left((r_K\dot{\varphi}_x)^2 + 2 \cdot (r_K + r_W)\cos\vartheta_x\dot{\vartheta}_x(r_K\dot{\varphi}_x) + (r_K + r_W)^2\dot{\vartheta}_x^2 \right) \\ &\quad + \frac{1}{2}\Theta_W \left(\frac{r_K}{r_W}(\dot{\varphi}_x - \dot{\vartheta}_x) - \dot{\vartheta}_x \right)^2 \\ V_W &= m_Wg(r_K + (r_K + r_W)\cos\vartheta_x) \end{aligned}$$

Des Aufbaus:

$$\begin{aligned}
 T_A &= \frac{1}{2}m_A \dot{\vec{x}}_A \cdot \ddot{\vec{x}}_A^\top + \frac{1}{2}\Theta_A \dot{\vartheta}_x^2, \quad \text{wobei } \vec{x}_A = \begin{bmatrix} r_K \varphi_x + l \sin \vartheta_x \\ 0 \\ r_K + l \cos \vartheta_x \end{bmatrix} \\
 &= \frac{1}{2}m_A \begin{bmatrix} (r_K \dot{\varphi}_x) + l \cos \vartheta_x \dot{\vartheta}_x \\ 0 \\ -l \sin \vartheta_x \dot{\vartheta}_x \end{bmatrix}^2 + \frac{1}{2}\Theta_A \dot{\vartheta}_x^2 \\
 &= \frac{1}{2}m_A \left((r_K \dot{\varphi}_x)^2 + 2 \cdot l \cos \vartheta_x \dot{\vartheta}_x (r_K \dot{\varphi}_x) + l^2 \dot{\vartheta}_x^2 \right) + \frac{1}{2}\Theta_A \dot{\vartheta}_x^2 \\
 V_A &= m_A g(r_K + l \cos \vartheta_x)
 \end{aligned}$$

1.2.3 Nichtpotentialkraft

Antriebsmoment:

$$\begin{aligned}
 \vec{M} &= \begin{bmatrix} 0 \\ -M \\ 0 \end{bmatrix}, \quad \vec{\Omega} = \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{r_K}{r_W}(\dot{\varphi}_x - \dot{\vartheta}_x) + \dot{\vartheta}_x \\ 0 \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} 0 & 0 \\ -\frac{r_K}{r_W} & \left(\frac{r_K}{r_W} + 1\right) \\ 0 & 0 \end{bmatrix}}_{\vec{J}} \cdot \dot{\vec{q}}
 \end{aligned}$$

$$\vec{f}_{NP} = \vec{J}^T \vec{M} = \begin{bmatrix} \frac{r_K}{r_W} M \\ -\left(1 + \frac{r_K}{r_W}\right) M \\ 0 \end{bmatrix}$$

Reibungskräfte werden vernachlässigt.

$$\begin{bmatrix} \mu_K \dot{\varphi}_x \\ \mu_W \dot{\vartheta}_x \end{bmatrix}$$

1.2.4 Bewegungsgleichungen nach Lagrange II

Lagrange II:

$$\begin{aligned}
 T &= T_K + T_W + T_A \\
 V &= V_K + V_W + V_A \\
 \dot{\vec{T}}_{\vec{q}} - \vec{T}_{\vec{q}} + \vec{V}_{\vec{q}} - \vec{f}_{NP} &= 0
 \end{aligned}$$

Die Bewegungsgleichungen lassen sich dann in folgender Form schreiben:

$$M_x(\vec{q}, \dot{\vec{q}}) \ddot{\vec{q}} + C_x(\vec{q}, \dot{\vec{q}}) + G_x(\vec{q}) = f_{NP}$$

wobei die Massen-, Coriolis- und Gravitationsmatrizen (M_x, C_x, G_x) wie folgt aussehen:

$$M_x = \begin{bmatrix} m_{tot}r_K^2 + \Theta_K + \left(\frac{r_K}{r_W}\right)^2 \Theta_W & -\frac{r_K}{r_W}(r_K + r_W)\Theta_W + \gamma r_K \cos \vartheta_x \\ -\frac{r_K}{r_W}(r_K + r_W)\Theta_W + \gamma r_K \cos \vartheta_x & \frac{(r_K+r_W)^2}{r_W^2}\Theta_W + \Theta_A + m_A l^2 + m_W(r_K + r_W)^2 \end{bmatrix}$$

$$C_x = \begin{bmatrix} -r_K \gamma \sin \vartheta_x \dot{\vartheta}_x^2 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$G_x = \begin{bmatrix} 0 \\ -g \sin \vartheta_x \gamma \end{bmatrix}$$

Mit

$$m_{tot} = m_K + m_A + m_W$$

$$\gamma = l m_A + (r_K + r_W) m_W$$

Zustandsraumdarstellung:

$$\dot{\tilde{x}} = \begin{bmatrix} \ddot{\tilde{q}} \\ \dot{\tilde{q}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{\tilde{q}} \\ M_x^{-1}(f_{NP} - (C_x + G_x)) \end{bmatrix}$$

Für die y-z-Ebene gelten die genau gleichen Gleichungen auch. Für die x-y-Ebene (Rotation um eigene Achse) gilt folgende Herleitung:

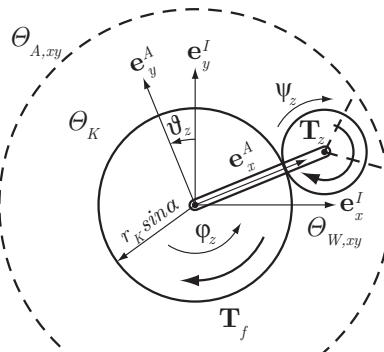


Abbildung 1.3: Planares Modell für die x-y-Ebene

Minimal Koordinaten

$$\vec{q} = \begin{bmatrix} \varphi_z \\ \dot{\vartheta}_z \end{bmatrix} \quad (1.1)$$

Energien

Der Kugel:

$$T_K = \frac{1}{2} \Theta_K \dot{\varphi}_z^2 \quad (1.2)$$

Des Antriebes:

$$T_W = \frac{1}{2} \Theta_{W,xy} \dot{\psi}_z^2 \quad (1.3)$$

Beachte: $\Theta_{W,xy}$ beinhaltet Trägheiten der Omniwheels und der Motoren um ψ_z .

Des Aufbaus:

$$T_A = \frac{1}{2} \Theta_{A,xy} \dot{\vartheta}_z^2 \quad (1.4)$$

Beachte: $\Theta_{A,xy}$ beinhaltet zusätzlich Trägheiten der Omniwheels und der Motoren um ϑ_z .

Bindungsgleichungen

$$\dot{\psi}_z = \frac{r_K}{r_W} \cdot \sin \alpha \cdot (\dot{\varphi}_z - \dot{\vartheta}_z) \quad (1.5)$$

Nichtpotential Kräfte

Antriebs Momente:

$$T_1 = T_z \quad (1.6)$$

$$J_1 = \begin{bmatrix} \frac{r_K}{r_W} \cdot \sin \alpha \\ -\frac{r_K}{r_W} \cdot \sin \alpha \end{bmatrix} \quad (1.7)$$

Reibung zwischen Kugel und Boden:

$$T_2 = -T_f \quad (1.8)$$

$$J_2 = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (1.9)$$

f_{NP} :

$$f_{NP} = J_1 \cdot T_1 + J_2 \cdot T_2 = \begin{bmatrix} -T_f + \frac{r_K}{r_W} \cdot \sin \alpha \cdot T_z \\ -\frac{r_K}{r_W} \cdot \sin \alpha \cdot T_z \end{bmatrix} \quad (1.10)$$

Bewegungsgleichungen

Gesamte kinetische Energie:

$$T = T_K + T_W + T_A \quad (1.11)$$

Gesamte potentielle Energie:

$$V = 0 \quad (1.12)$$

Die Lagrange Gleichung nach $\ddot{\varphi}$ und $\ddot{\vartheta}$ aufgelöst:

$$\ddot{\varphi} = -\frac{(r_W^2 \Theta_{A,xy} + r_K^2 \Theta_{W,xy} \sin^2 \alpha) \cdot T_f + r_K r_W \Theta_{A,xy} \sin \alpha \cdot T_z}{r_W^2 \Theta_{A,xy} \Theta_K + r_K^2 (\Theta_{A,xy} + \Theta_K) \Theta_{W,xy} \sin^2 \alpha} \quad (1.13)$$

$$\ddot{\vartheta} = -\frac{r_K \sin \alpha (r_K \Theta_{W,xy} \sin \alpha \cdot T_f + r_W \Theta_K \cdot T_z)}{r_W^2 \Theta_{A,xy} \Theta_K + r_K^2 (\Theta_{A,xy} + \Theta_K) \Theta_{W,xy} \sin^2 \alpha} \quad (1.14)$$

Reibungsmodell

Bedingung für Haften:

$$\ddot{\varphi} = 0 \quad (1.15)$$

Bewegungsgleichung nach T_f aufgelöst:

$$T_f = \frac{r_K r_W \Theta_{A,xy} \sin \alpha \cdot T_z}{r_W^2 \Theta_{A,xy} + r_K^2 \Theta_{W,xy} \sin^2 \alpha} \quad (1.16)$$

1.3 Kräfte

1.3.1 Freischneiden

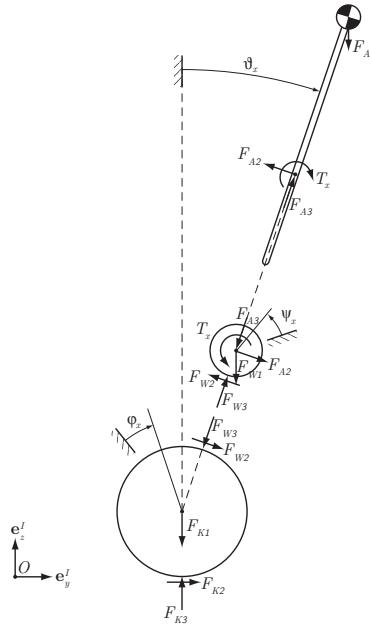


Abbildung 1.4: Freischnitt

1.3.2 Impuls- und Spinsätze

Für die Kugel gilt:

$$\text{Impulssatz x-Richtung: } m_K \ddot{x}_K = F_{K2} + F_{W2} \cos \vartheta_x - F_{W3} \sin \vartheta_x \quad (1.17)$$

$$\text{Impulssatz z-Richtung: } m_K \ddot{z}_K = F_{K3} - F_{K1} - F_{W2} \sin \vartheta_x - F_{W3} \cos \vartheta_x \quad (1.18)$$

$$\text{Spinsatz: } \Theta_K \ddot{\varphi}_x = F_{W2} r_K - F_{K2} r_K \quad (1.19)$$

Für das Antriebsrad gilt:

$$\text{Impulssatz x-Richtung: } m_W \ddot{x}_W = -F_{W2} \cos \vartheta_x + F_{W3} \sin \vartheta_x + F_{A2} \cos \vartheta_x - F_{A3} \sin \vartheta_x \quad (1.20)$$

$$\text{Impulssatz z-Richtung: } m_W \ddot{z}_W = -F_{W1} + F_{W2} \sin \vartheta_x + F_{W3} \cos \vartheta_x - F_{A2} \sin \vartheta_x - F_{A3} \cos \vartheta_x \quad (1.21)$$

$$\text{Spinsatz: } \Theta_W \ddot{\psi}_x = -F_{W2} r_W + M_x \quad (1.22)$$

Für den Aufbau gilt:

$$\text{Impulssatz x-Richtung: } m_A \ddot{x}_A = -F_{A2} \cos \vartheta_x + F_{A3} \sin \vartheta_x \quad (1.23)$$

$$\text{Impulssatz z-Richtung: } m_A \ddot{z}_A = -F_{A1} + F_{A2} \sin \vartheta_x + F_{A3} \cos \vartheta_x \quad (1.24)$$

$$\text{Spinsatz: } \Theta_A \ddot{\vartheta}_x = F_{A2}(l - r_K - r_W) + M_x \quad (1.25)$$

1.3.3 Potentialkräfte

Es wirken folgende Potentialkräfte:

$$F_{K1} = m_K \cdot g$$

$$F_{W1} = m_W \cdot g$$

$$F_{A1} = m_A \cdot g$$

1.3.4 Bindungsgleichungen

Die Bindungsgleichungen entnehme man dem Kap. 1.1.5

1.3.5 Bindungskräfte

Die Gleichungen (1.23) und (1.24) kann nach den Kräften F_{A2} und F_{A3} auflösen:

$$F_{A2} = m_A \cdot (g \sin \vartheta_x - r_K \ddot{\varphi}_x \cos \vartheta_x - \ddot{\vartheta}_x l)$$

$$F_{A3} = m_A \cdot (g \cos \vartheta_x + r_K \ddot{\varphi}_x \sin \vartheta_x - \dot{\vartheta}_x^2 l)$$

Mit Hilfe dieser Resultate, kann man Gleichungen (1.20) und (1.21) verwenden, um die Kräfte F_{W2} und F_{W3} zu erhalten:

$$F_{W2} = (m_A + m_W) \cdot (g \sin \vartheta_x - r_K \ddot{\varphi}_x \cos \vartheta_x) - \gamma \ddot{\vartheta}_x$$

$$F_{W3} = (m_A + m_W) \cdot (g \cos \vartheta_x + r_K \ddot{\varphi}_x \sin \vartheta_x) - \gamma \dot{\vartheta}_x^2$$

Analog kann man jetzt Gleichungen (1.17) und (1.18) nach F_{K2} und F_{K3} auflösen:

$$\begin{aligned}F_{K2} &= \gamma \left(\ddot{\vartheta}_x \cos \vartheta_x - \dot{\vartheta}_x^2 \sin \vartheta_x \right) + r_K m_{tot} \ddot{\varphi}_x \\F_{K3} &= -\gamma \left(\ddot{\vartheta}_x \sin \vartheta_x + \dot{\vartheta}_x^2 \cos \vartheta_x \right) + g m_{tot}\end{aligned}$$

Mit

$$\begin{aligned}m_{tot} &= m_K + m_A + m_W \\ \gamma &= l m_A + (r_K + r_W) m_W\end{aligned}$$

A.14 Umrechnungen

1 Umrechnungen

1.1 Momenten Umrechnung

Da im planaren Modell ein virtueller Antrieb modelliert ist, welcher sich stark von dem echten Antriebskonzept unterscheidet, ist es notwendig die berechneten virtuellen Momente so umzurechnen, dass sie den echten entsprechen.

Definitionen

Ein Antriebselement bestehend aus Omniwheel und Motor ist auf der linken Seite in Abbildung 1.1 aufgezeigt. Das Omniwheel treibt die Kugel durch abrollen auf dem Teilkreis, welcher durch den Winkel α charakterisiert ist, an.

Auf der rechten Seite der Abbildung 1.1 ist eine Ansicht von Oben des echten Antriebskonzept gezeigt. Die Momente der Omniwheels erzeugen eine tangentiale Kraft auf der Kugel.

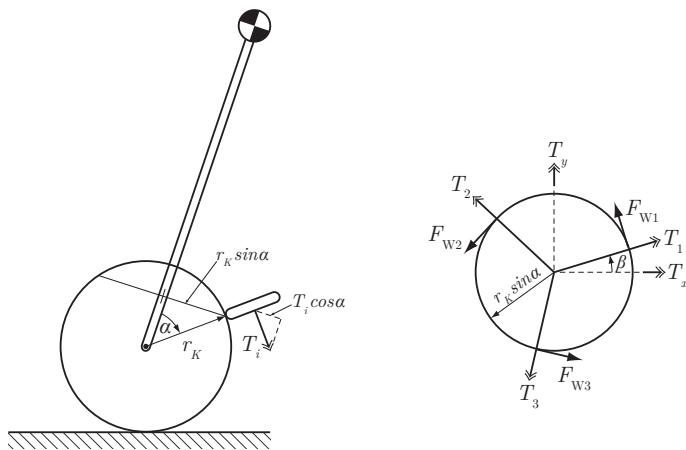


Abbildung 1.1: Momente und Kräfte im echten Antriebssystem

Anhand Abbildung 1.1 können folgende Beziehungen aufgestellt werden.

Tangential Kräfte im echten System:

$$F_{W,1} = \frac{T_1}{r_W} \cdot \begin{bmatrix} -\sin \beta \\ \cos \beta \\ 0 \end{bmatrix} \quad (1.1)$$

$$F_{W,2} = \frac{T_2}{r_W} \cdot \begin{bmatrix} -\sin(\beta + \frac{2}{3}\pi) \\ \cos(\beta + \frac{2}{3}\pi) \\ 0 \end{bmatrix} \quad (1.2)$$

$$F_{W,3} = \frac{T_3}{r_W} \cdot \begin{bmatrix} -\sin(\beta - \frac{2}{3}\pi) \\ \cos(\beta - \frac{2}{3}\pi) \\ 0 \end{bmatrix} \quad (1.3)$$

Hebelarme im echten System:

$$r_{KW,1} = r_K \cdot \begin{bmatrix} \cos \beta \sin \alpha \\ \sin \beta \sin \alpha \\ \cos(\alpha) \end{bmatrix} \quad (1.4)$$

$$r_{KW,2} = r_K \cdot \begin{bmatrix} \cos(\beta + \frac{2}{3}\pi) \sin(\alpha) \\ \sin(\beta + \frac{2}{3}\pi) \sin(\alpha) \\ \cos(\alpha) \end{bmatrix} \quad (1.5)$$

$$r_{KW,3} = r_K \cdot \begin{bmatrix} \cos(\beta - \frac{2}{3}\pi) \sin(\alpha) \\ \sin(\beta - \frac{2}{3}\pi) \sin(\alpha) \\ \cos(\alpha) \end{bmatrix} \quad (1.6)$$

Tangential Kräfte für die virtuellen Antriebsräder:

$$F_{W,x} = \frac{T_x}{r_W} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (\text{y-Richtung}) \quad (1.7)$$

$$F_{W,y} = \frac{T_y}{r_W} \cdot \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (\text{x-Richtung}) \quad (1.8)$$

$$F_{W,z} = \frac{T_z}{r_W} \cdot \begin{bmatrix} -\sin \beta \\ \cos \beta \\ 0 \end{bmatrix} \quad (1.9)$$

Hebelarme der virtuellen Kräfte:

$$r_{KW,x} = r_{KW,y} = r_K \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (1.10)$$

$$r_{KW,z} = r_K \cdot \begin{bmatrix} \cos \beta \cdot \sin \alpha \\ \sin \beta \cdot \sin \alpha \\ 0 \end{bmatrix} \quad (1.11)$$

Moment auf die Kugel

Mit den obigen Beziehungen kann das resultierende Moment auf die Kugel für die echte sowie die virtuelle Konfiguration berechnet werden.

Resultierendes Moment der echten Omniwheels

$$T_{KW,1} = r_{KW,1} \times F_{W,1} \quad (1.12)$$

$$T_{KW,2} = r_{KW,2} \times F_{W,2} \quad (1.13)$$

$$T_{KW,3} = r_{KW,3} \times F_{W,3} \quad (1.14)$$

Resultierendes Moment der virtuellen Antriebsräder

$$T_{KW,x} = r_{KW,x} \times F_{W,x} \quad (1.15)$$

$$T_{KW,y} = r_{KW,y} \times F_{W,y} \quad (1.16)$$

$$T_{KW,z} = r_{KW,z} \times F_{W,z} \quad (1.17)$$

Lösung

Die beiden resultierenden Momente können nun gleich gesetzt werden.

$$T_{KW,1} + T_{KW,2} + T_{KW,3} = T_{KW,x} + T_{KW,y} + T_{KW,z} \quad (1.18)$$

Diese Gleichung kann nach den gesuchten Größen aufgelöst werden.

Lösung für die Momente der echten Omniwheels:

$$T_1 = \frac{1}{3} \cdot \left(T_z + \frac{2}{\cos \alpha} \cdot (T_x \cdot \cos \beta - T_y \cdot \sin \beta) \right) \quad (1.19)$$

$$T_2 = \frac{1}{3} \cdot \left(T_z + \frac{1}{\cos \alpha} \cdot (\sin \beta \cdot (-\sqrt{3}T_x + T_y) - \cos \beta \cdot (T_x + \sqrt{3}T_y)) \right) \quad (1.20)$$

$$T_3 = \frac{1}{3} \cdot \left(T_z + \frac{1}{\cos \alpha} \cdot (\sin \beta \cdot (\sqrt{3}T_x + T_y) + \cos \beta \cdot (-T_x + \sqrt{3}T_y)) \right) \quad (1.21)$$

$$(1.22)$$

Lösung für die Momente der virtuellen Motoren:

$$T_x = \cos \alpha \cdot \left(T_1 \cdot \cos \beta - T_2 \cdot \sin \left(\beta + \frac{\pi}{6} \right) + T_3 \cdot \sin \left(\beta - \frac{\pi}{6} \right) \right) \quad (1.23)$$

$$T_y = \cos \alpha \cdot \left(-T_1 \cdot \sin \beta - T_2 \cdot \cos \left(\beta + \frac{\pi}{6} \right) + T_3 \cdot \cos \left(\beta - \frac{\pi}{6} \right) \right) \quad (1.24)$$

$$T_z = T_1 + T_2 + T_3 \quad (1.25)$$

1.2 Trägheitsmomente Umrechnen

Da das modellierte Antriebskonzept nicht mit dem tatsächlichen übereinstimmt, wird für das Trägheitsmoment des virtuellen Antriebes eine Annäherung über ein Energievergleich gemacht.

Trägheiten der Kugel und des Aufbaus

$$\Theta_K = \frac{2}{3} m_K r_K^2 \quad (\text{Hohlkugel}) \quad (1.26)$$

$$\Theta_A = m_A l^2 \quad (\text{Steiner}) \quad (1.27)$$

Trägheiten für den Antrieb

Die Trägheit des Motorwelle ist gegeben als

$$\Theta_M = 3.33 \cdot 10^{-6} \text{ kgm}^2$$

die Trägheit eines Omniwheels lässt sich berechnen als

$$\Theta_{OW} = \frac{1}{2} m_{OW} r_W^2 = 900 \cdot 10^{-6} \text{ kgm}^2$$

Wegen der Untersetzung des Getriebes $i = 26$, dreht die Motorwelle 26 mal schneller als das Omniwheel. Daher kommt bei der Energieberechnung ein Faktor i^2 dazu. Die Energie der

Motorwelle ist somit grösser als diejenige des Omniwheel und wird darum auch mit einbezogen.
Die Trägheit der Getriebewelle ist $9.1 \cdot 10^{-6} \text{ kgm}^2$ und somit vernachlässigbar.

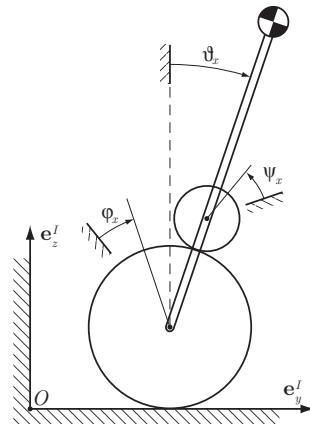


Abbildung 1.2: Koordinaten des planaren Modell

Angenommen der Roboter bewegt sich mit positiver Geschwindigkeit v in y Richtung, dann berechnet sich die Drehgeschwindigkeit der Kugel zu

$$\omega_{K,x} = \frac{v}{r_K} = \omega_{W,x} \frac{r_W}{r_K}, \quad \text{with } \omega_{W,x} = \frac{v}{r_W}$$

Aus der Odometrie lässt sich die Drehgeschwindigkeit jedes Omniwheels berechnen, für Geschwindigkeiten in y Richtung

$$\omega_{OW,1} = \omega_{W,x} \cos \alpha \tag{1.28}$$

$$\omega_{OW,2/3} = -\frac{1}{2} \omega_{W,x} \cos \alpha \tag{1.29}$$

in y Richtung:

$$\omega_{OW,1} = 0 \tag{1.30}$$

$$\omega_{OW,2} = -\frac{\sqrt{3}}{2} \omega_{W,y} \cos \alpha \tag{1.31}$$

$$\omega_{OW,3} = \frac{\sqrt{3}}{2} \omega_{W,y} \cos \alpha \tag{1.32}$$

für die Rotation um die z Achse:

$$\omega_{OW,1/2/3} = \omega_{W,z} \sin \alpha \quad (1.33)$$

Gleichungen für Energiegleichgewicht in y Richtung

$$\begin{aligned} \frac{1}{2} \Theta_{W,x} \dot{\psi}_x^2 &= \frac{1}{2} \Theta_{OW} (\dot{\psi}_x \cos \alpha)^2 + \frac{1}{2} \Theta_M (i \cdot \dot{\psi}_x \cos \alpha)^2 \\ &\quad + \frac{1}{2} \cdot 2 \left(\Theta_{OW} \left(-\frac{1}{2} \dot{\psi}_x \cos \alpha \right)^2 + \Theta_M \left(-\frac{1}{2} i \cdot \dot{\psi}_x \cos \alpha \right)^2 \right) \\ \Theta_{W,x} &= \cos^2(\alpha) \left(\Theta_{OW} + i^2 \Theta_M + \frac{1}{2} (\Theta_{OW} + i^2 \Theta_M) \right) \\ &= \frac{3}{2} \cos^2(\alpha) (\Theta_{OW} + i^2 \Theta_M) \end{aligned}$$

in x Richtung:

$$\begin{aligned} \frac{1}{2} \Theta_{W,y} \dot{\psi}_y^2 &= \frac{1}{2} \cdot 2 \left(\Theta_{OW} \left(\frac{\sqrt{3}}{2} \dot{\psi}_y \cos \alpha \right)^2 + \Theta_M \left(-\frac{\sqrt{3}}{2} i \cdot \dot{\psi}_x \cos \alpha \right)^2 \right) \\ \Theta_{W,y} &= \frac{3}{2} \cos^2(\alpha) (\Theta_{OW} + i^2 \Theta_M) \end{aligned}$$

Folgende Schreibweise ist gebraucht

$$\begin{aligned} \dot{\psi}_x &= \omega_{W,x} \\ \dot{\psi}_y &= \omega_{W,y} \\ \dot{\psi}_1 &= \omega_{OW,1} \\ \dot{\psi}_2 &= \omega_{OW,2} \\ \dot{\psi}_3 &= \omega_{OW,3} \end{aligned}$$

Numerischer Vergleich

Trägheiten:

$$\begin{aligned} \Theta_K &= \frac{2}{3} \cdot 2.8 \text{ kg} \cdot (0.125 \text{ m})^2 = 0.029 \text{ kgm}^2 \\ \Theta_A &= 15 \text{ kg} \cdot (0.5 \text{ m})^2 = 7.5 \text{ kgm}^2 \\ \Theta_W &= \frac{3}{2} \cdot \left(\frac{\sqrt{2}}{2} \right)^2 (900 \cdot 10^{-6} \text{ kgm}^2 + 26^2 \cdot 3.33 \cdot 10^{-6} \text{ kgm}^2) = 2.36 \cdot 10^{-3} \text{ kgm}^2 \end{aligned}$$

Rotationsenergien ($v = 3 \text{ m/s}$ and $\dot{\vartheta}_x = 1 \text{ rad/s}$):

$$E_K = \frac{1}{2} \Theta_K \dot{\varphi}_x^2 = 0.5 \cdot 0.029 \text{ kgm}^2 \cdot \left(\frac{3 \text{ m/s}}{0.125 \text{ m}} \right)^2 = 8.35 \text{ J}$$

$$E_A = \frac{1}{2} \Theta_A \dot{\vartheta}_x^2 = 0.5 \cdot 7.5 \text{ kgm}^2 \cdot (1/\text{s})^2 = 3.75 \text{ J}$$

$$E_W = \frac{1}{2} \Theta_W \dot{\psi}_x^2 = 0.5 \cdot 0.00236 \text{ kgm}^2 \cdot \left(\frac{3 \text{ m/s}}{0.06 \text{ m}} \right)^2 = 2.95 \text{ J}$$

Trägheiten für das x-y Modell

$$\Theta_{A,xy} = \frac{1}{2} \cdot (m_A + m_W) \cdot r_A^2 \quad (1.34)$$

$$\Theta_{W,xy} = 3 \cdot (\Theta_{OW} + i^2 \cdot \Theta_M) \quad (1.35)$$

A.15 Systemmodellierung 3D

System Modeling 3D

Parameters

- Radius of the ball

$rK;$

- Radius of the Omniwheel

$rW;$

- Radius of the body

$rA;$

- Distance between center of the ball an center of gravity of the body

$l;$

- Mass of body and omniwheels

$mAW;$

- Mass of ball

$mK;$

- Inertia of body and omniwheels in the body reference frame A

$A_ThetaAW = \{ \{A_ThetaAWx, 0, 0\}, \{0, A_ThetaAWy, 0\}, \{0, 0, A_ThetaAWz\} \};$

- Inertia of ball in the inertial reference frame I or L

$ThetaK = \{ \{ThetaKi, 0, 0\}, \{0, ThetaKi, 0\}, \{0, 0, ThetaKi\} \};$

- Inertia of omniwheel and motor (gear ratio!) about the motor axis

$ThetaWi;$

- Angle of the motors

```
alpha = 45 °;
beta1 = 0 °;
beta2 = 120 °;
beta3 = 240 °;
```

- Rotation speed vector of the ball in the Lisa reference frame L (no Rotation of the ball around the z-axis in L, which is same as the z-axis in I)

$L_OmegaK[t] = \{phiX'[t], phiY'[t], 0\};$

Printed by Mathematica for Students

2 | System Modeling 3D alternative print.nb

- Relative rotation speed between the omniwheels and body about the motor axis in the body reference frame A (scalar, encoder value)

```
A~omegaW1[t] = psil'[t];
A~omegaW2[t] = psi2'[t];
A~omegaW3[t] = psi3'[t];
```

- Gravity vector

```
G = {0, 0, -g};
```

Minimal coordinates

Phix and phiy are not orientation angles but roll angles of the ball. Phiz is not a state, since it's assumed to be always 0.

```
q[t_] = {thetax[t], thetay[t], thetaz[t], phix[t], phiy[t]},
```

Coordinates and rotation matrices (I↔L↔A)

- Rotation matrices I↔L↔A

Rotations around z, y and x Axes

```
Rz = {{Cos[thetaz[t]], -Sin[thetaz[t]], 0},
      {Sin[thetaz[t]], Cos[thetaz[t]], 0}, {0, 0, 1}};
Ry = {{Cos[thetay[t]], 0, Sin[thetay[t]]}, {0, 1, 0},
      {-Sin[thetay[t]], 0, Cos[thetay[t]]}};
Rx = {{1, 0, 0}, {0, Cos[thetax[t]], -Sin[thetax[t]]},
      {0, Sin[thetax[t]], Cos[thetax[t]]}};
```

Rotation Matrix (I to L and L to I)

```
RIL = Rz;
RLI = Transpose[RIL];
```

Rotation Matrix (I to A and A to I)

```
RIA = RIL.Ry.Rx;
RAI = Transpose[RIA];
```

- Ball

Rotation of the ball in I

```
OmegaK[t] = RIL.L~OmegaK[t];
```

- Jacob

Jacobian Matrix

```
J = {{1, 0, -Sin[thetay[t]]}, {0, Cos[thetax[t]], Sin[thetax[t]] * Cos[thetay[t]]},
      {0, -Sin[thetax[t]], Cos[thetax[t]] * Cos[thetay[t]]}};
```

Time variation of Tait-Bryan angles

```
ThetaDot[t] = {thetax'[t], thetay'[t], thetaz'[t]};
```

Rotation Vector of the Aufbau (in A)

Printed by Mathematica for Students

```
A_OmegaA[t] = J.ThetaDot[t];
```

Binding equations

■ Absolut rotation of the omniwheels

Vector from intersection of the motor directions M to the center point of the omniwheels (W1, W2, W3) in A

```
A_MW1 = {Cos[beta1]*Sin[alpha], Sin[alpha]*Sin[beta1], -Cos[alpha]};
A_MW2 = {Cos[beta2]*Sin[alpha], Sin[alpha]*Sin[beta2], -Cos[alpha]};
A_MW3 = {Cos[beta3]*Sin[alpha], Sin[alpha]*Sin[beta3], -Cos[alpha]};
```

Test: Norm has to be 1! (ok)

```
Norm[A_MW1];
Norm[A_MW2];
Norm[A_MW3];
```

Absolute rotation speed of the omniwheels about the motor axis in the body reference frame A (scalar)

```
A_OmegaW1[t] = FullSimplify[A_omegaW1[t] + A_MW1.A_OmegaA[t]];
A_OmegaW2[t] = FullSimplify[A_omegaW2[t] + A_MW2.A_OmegaA[t]];
A_OmegaW3[t] = FullSimplify[A_omegaW3[t] + A_MW3.A_OmegaA[t]];
```

■ Dependency on the rotation of the omniwheels

Vector from center of the ball (P) to the contact point with the omniwheels (K1, K2, K3) in A

```
A_rPK1 = {rK*Sin[alpha]*Cos[beta1], rK*Sin[alpha]*Sin[beta1], rK*Cos[alpha]};
A_rPK2 = {rK*Sin[alpha]*Cos[beta2], rK*Sin[alpha]*Sin[beta2], rK*Cos[alpha]};
A_rPK3 = {rK*Sin[alpha]*Cos[beta3], rK*Sin[alpha]*Sin[beta3], rK*Cos[alpha]};
```

Direction of the tangential speed of the rotation of the omniwheels in A

```
A_d1 = {-Sin[beta1], Cos[beta1], 0};
A_d2 = {-Sin[beta2], Cos[beta2], 0};
A_d3 = {-Sin[beta3], Cos[beta3], 0};
```

Rotation speed of the ball in A

```
A_OmegaK[t] = RAI.OmegaK[t];
```

Rotation speed of the ball relative to the body in A

```
A_omegaK[t] = FullSimplify[A_OmegaK[t] - A_OmegaA[t]];
```

Speed on the surface of the ball (in omniwheel direction) has to be the same speed as the tangential speed of the omniwheel

```
E1 = Cross[A_omegaK[t], A_rPK1].A_d1 == A_OmegaW1[t]*rW;
E2 = Cross[A_omegaK[t], A_rPK2].A_d2 == A_OmegaW2[t]*rW;
E3 = Cross[A_omegaK[t], A_rPK3].A_d3 == A_OmegaW3[t]*rW;
sol = Solve[{E1, E2, E3}, {psi1'[t], psi2'[t], psi3'[t]}];
psi1'[t] = FullSimplify[psi1'[t] /. sol[[1]]];
psi2'[t] = FullSimplify[psi2'[t] /. sol[[1]]];
psi3'[t] = FullSimplify[psi3'[t] /. sol[[1]]];
```

Simplify

```
A_OmegaW1[t] = FullSimplify[A_OmegaW1[t]];
A_OmegaW2[t] = FullSimplify[A_OmegaW2[t]];
A_OmegaW3[t] = FullSimplify[A_OmegaW3[t]];
```

4 | System Modeling 3D alternative print.nb

Translation of the ball

Vector from the ground to center of the ball (P)

```
rBP = {0, 0, rK};
```

Speed vector of the center of the ball (P) in I

```
rPdot = FullSimplify[Cross[OmegaK[t], rBP]];
```

Energies

- Ball

- Kinetic

```
T_K = FullSimplify[1/2*mK*rPdot.rPdot + 1/2*L_OmegaK[t].ThetaK.L_OmegaK[t]];
```

- Potential

```
V_K = 0;
```

- Aufbau (und Omniwheels)

Vector from center of the ball to the center of gravity of the body in A

```
A_rPSA = {0, 0, 1};
```

- Kinetic

```
T_AW =
FullSimplify[1/2*mAW*rPdot.rPdot + mAW*(RAI.rPdot).(Cross[A_OmegaA[t], A_rPSA]) +
1/2*A_OmegaA[t].A_ThetaAW.A_OmegaA[t]];
```

- Potential

```
V_AW = -mAW*G.RIA.A_rPSA;
```

- Rotational energy of the omniwheels

Considering only the rotation energy of the omniwheel and motors about the motor axis

```
T_W1 = FullSimplify[1/2*ThetaWi*A_OmegaW1[t]^2];
T_W2 = FullSimplify[1/2*ThetaWi*A_OmegaW2[t]^2];
T_W3 = FullSimplify[1/2*ThetaWi*A_OmegaW3[t]^2];
```

Non potential forces

- Jacobi Matrices

```
{JT1, R1} = FullSimplify[PolynomialReduce[A_OmegaW1[t], q'[t], q'[t]]];
{JT2, R2} = FullSimplify[PolynomialReduce[A_OmegaW2[t], q'[t], q'[t]]];
{JT3, R3} = FullSimplify[PolynomialReduce[A_OmegaW3[t], q'[t], q'[t]]];
```

Printed by Mathematica for Students

Actuating torques

```
T1[t];
T2[t];
T3[t];

■ f_NP
fNP[t_] = FullSimplify[JT1 * T1[t] + JT2 * T2[t] + JT3 * T3[t]];
```

Equation of movement**■ Total kinetic energy**

```
T[t_] = FullSimplify[T_K + T_AW + T_W1 + T_W2 + T_W3];
```

■ Total potential energy

```
V[t_] = V_K + V_AW;
```

■ Lagrange II

```
L1[t_] = FullSimplify[D[T[t], {q'[t]}], t];
L2[t_] = FullSimplify[D[T[t], {q[t]}]];
L3[t_] = D[V[t], {q[t]}];
EQ = L1[t] - L2[t] + L3[t] - fNP[t] == 0;

EQ1 = FullSimplify[EQ[[1]][[1]]];
EQ2 = FullSimplify[EQ[[1]][[2]]];
EQ3 = FullSimplify[EQ[[1]][[3]]];
EQ4 = FullSimplify[EQ[[1]][[4]]];
EQ5 = FullSimplify[EQ[[1]][[5]]];
```

Solve for second derivative

```
varList = {thetax''[t], thetay''[t], thetaz''[t], phix''[t], phiy''[t];

{q1, r1} = FullSimplify[PolynomialReduce[EQ1, varList, varList]];
{q2, r2} = FullSimplify[PolynomialReduce[EQ2, varList, varList]];
{q3, r3} = FullSimplify[PolynomialReduce[EQ3, varList, varList]];
{q4, r4} = FullSimplify[PolynomialReduce[EQ4, varList, varList]];
{q5, r5} = FullSimplify[PolynomialReduce[EQ5, varList, varList]];

Solve system with substitution

q1S = {q11S, q12S, q13S, q14S, q15S};
q2S = {q21S, q22S, q23S, q24S, q25S};
q3S = {q31S, q32S, q33S, q34S, q35S};
q4S = {q41S, q42S, q43S, q44S, q45S};
q5S = {q51S, q52S, q53S, q54S, q55S};

varSols =
FullSimplify[LinearSolve[{q1S, q2S, q3S, q4S, q5S}, {-r1S, -r2S, -r3S, -r4S, -r5S}]];
```

Printed by Mathematica for Students

6 | System Modeling 3D alternative print.nb

```

HeavySubstitution = {q11S -> q1[[1]],
q12S -> q1[[2]],
q13S -> q1[[3]],
q14S -> q1[[4]],
q15S -> q1[[5]],
q21S -> q2[[1]],
q22S -> q2[[2]],
q23S -> q2[[3]],
q24S -> q2[[4]],
q25S -> q2[[5]],
q31S -> q3[[1]],
q32S -> q3[[2]],
q33S -> q3[[3]],
q34S -> q3[[4]],
q35S -> q3[[5]],
q41S -> q4[[1]],
q42S -> q4[[2]],
q43S -> q4[[3]],
q44S -> q4[[4]],
q45S -> q4[[5]],
q51S -> q5[[1]],
q52S -> q5[[2]],
q53S -> q5[[3]],
q54S -> q5[[4]],
q55S -> q5[[5]],
r1S -> r1,
r2S -> r2,
r3S -> r3,
r4S -> r4,
r5S -> r5};

varSol = varSolS /. HeavySubstitution;

```

Linearization

State variables

```
x = {x1[t], x2[t], x3[t], x4[t], x5[t], x6[t], x7[t], x8[t], x9[t], x10[t]};
```

Input variables

```
u = {u1[t], u2[t], u3[t]};
```

Output values

```
h = {x1[t], x2[t], x3[t], x4[t], x5[t], x6[t], x7[t], x8[t], x9[t], x10[t]};
```

State space representation

```

SPrep = {
  thetax[t] -> x1[t], thetax'[t] -> x2[t],
  thetay[t] -> x3[t], thetay'[t] -> x4[t],
  thetaz[t] -> x5[t], thetaz'[t] -> x6[t],
  phix[t] -> x7[t], phix'[t] -> x8[t],
  phiy[t] -> x9[t], phiy'[t] -> x10[t],
  T1[t] -> u1[t], T2[t] -> u2[t], T3[t] -> u3[t]};

```

Equation of movement in state variables form

```
f = {x2[t], varSol[[1]], x4[t], varSol[[2]], x6[t],
      varSol[[3]], x8[t], varSol[[4]], x10[t], varSol[[5]]} /. SPrep;
```

Point of linearization

Printed by Mathematica for Students

System Modeling 3D alternative print.nb | 7

```
equilibrium = {x1[t] → 0, x2[t] → 0, x3[t] → 0, x4[t] → 0, x5[t] → 0, x6[t] → 0,
               x7[t] → 0, x8[t] → 0, x9[t] → 0, x10[t] → 0, u1[t] → 0, u2[t] → 0, u3[t] → 0};
arbitrary = {x1[t] → LP1, x2[t] → LP2, x3[t] → LP3, x4[t] → LP4,
              x5[t] → LP5, x6[t] → LP6, x7[t] → LP7, x8[t] → LP8, x9[t] → LP9,
              x10[t] → LP10, u1[t] → LPu1, u2[t] → LPu2, u3[t] → LPu3};
```

■ A

```
MatrixForm[AA0 = D[f, {x}] /. equilibrium];
MatrixForm[AA = D[f, {x}] /. arbitrary];
```

■ B

```
MatrixForm[BB0 = D[f, {u}] /. equilibrium];
MatrixForm[BB = D[f, {u}] /. arbitrary];
```

■ C

```
MatrixForm[CC0 = D[h, {x}] /. equilibrium];
MatrixForm[CC = D[h, {x}] /. arbitrary];
```

■ D

```
MatrixForm[DD0 = D[h, {u}] /. equilibrium];
MatrixForm[DD = D[h, {u}] /. arbitrary];
```

Printed by Mathematica for Students

A.16 Odometrie

Odometry

Parameters

- Radius of the ball

$r_K;$

- Radius of the Omniwheel

$r_W;$

- Radius of the body

$r_A;$

- Distance between center of the ball an center of gravity of the body

$l;$

- Angle of the motors

```
alpha = 45 °;
beta1 = 0 °;
beta2 = 120 °;
beta3 = 240 °;
```

- Rotation speed vector of the ball in the Lisa reference frame L

```
L~OmegaK[t] = {phix'[t], phiy'[t], phiz'[t]};
```

- Rotation speed of the omniewheel about the motor axis in the body reference frame A (scalar, encoder value)

```
A~omegaW1[t] = psil'[t];
A~omegaW2[t] = psiz'[t];
A~omegaW3[t] = psiz'[t];
```

Coordinates and rotation matrices (I \leftrightarrow L \leftrightarrow A)

- Rotation matrices I \leftrightarrow L \leftrightarrow A

Rotations around z, y and x Axes

```
Rz = {{Cos[thetaz[t]], -Sin[thetaz[t]], 0},
      {Sin[thetaz[t]], Cos[thetaz[t]], 0}, {0, 0, 1}};
Ry = {{Cos[thetay[t]], 0, Sin[thetay[t]]}, {0, 1, 0},
      {-Sin[thetay[t]], 0, Cos[thetay[t]]}};
Rx = {{1, 0, 0}, {0, Cos[thetax[t]], -Sin[thetax[t]]},
      {0, Sin[thetax[t]], Cos[thetax[t]]}};
```

Rotation Matrix (I to L and L to I)

```
RIL = Rz;
RLI = Transpose[RIL];
```

Printed by Mathematica for Students

2 | *Odometry.nb*

Rotation Matrix (L to A and A to L)

```
RLA = RY.RX;
RAL = Transpose[RLA];
```

Rotation Matrix (I to A and A to I)

```
RIA = RI.RLA;
RAI = Transpose[RIA];
```

■ Ball

Rotation of the ball in I

```
 $\Omega_{KA}[t] = R_{IL}.L.\Omega_{KA}[t];$ 
```

■ Jacob

Jacobian Matrix

```
J = {{1, 0, -Sin[thetaY[t]]}, {0, Cos[thetaX[t]], Sin[thetaX[t]]*Cos[thetaY[t]]}, {0, -Sin[thetaX[t]], Cos[thetaX[t]]*Cos[thetaY[t]]}};
```

Time variation of Tait-Bryan angles

```
ThetaDot[t] = {thetaX'[t], thetaY'[t], thetaZ'[t]};
```

Rotation Vector of the Aufbau (in A)

```
A.\OmegaAA[t] = J.ThetaDot[t];
```

Rotation of the ball

Vector from center of the ball (P) to the contact point with the omniwheels (K1, K2, K3) in A

```
A.rPK1 = {rK * Sin[alpha] * Cos[beta1], rK * Sin[alpha] * Sin[beta1], rK * Cos[alpha]};
A.rPK2 = {rK * Sin[alpha] * Cos[beta2], rK * Sin[alpha] * Sin[beta2], rK * Cos[alpha]};
A.rPK3 = {rK * Sin[alpha] * Cos[beta3], rK * Sin[alpha] * Sin[beta3], rK * Cos[alpha]};
```

Direction of the tangential speed of the rotation of the omniwheels in A

```
A.d1 = {-Sin[beta1], Cos[beta1], 0};
A.d2 = {-Sin[beta2], Cos[beta2], 0};
A.d3 = {-Sin[beta3], Cos[beta3], 0};
```

Test : Absolute value has to be 1! (ok)

```
Norm[A.d1];
Norm[A.d2];
Norm[A.d3];
```

Rotation speed of the ball relative to the body in A

```
A.\omegaKA = {A.\omegaKx, A.\omegaKy, A.\omegaKz};
```

Speed on the surface of the ball (in omniwheel direction) has to be the same speed as the tangential speed of the omniwheel

```
E1 = Cross[A.\omegaKA, A.rPK1].A.d1 == A.\omegaW1[t]*rW;
E2 = Cross[A.\omegaKA, A.rPK2].A.d2 == A.\omegaW2[t]*rW;
E3 = Cross[A.\omegaKA, A.rPK3].A.d3 == A.\omegaW3[t]*rW;
sol = Solve[{E1, E2, E3}, {A.\omegaKx, A.\omegaKy, A.\omegaKz}];
A.\omegaKA = {A.\omegaKx /. sol[[1]], A.\omegaKy /. sol[[1]], A.\omegaKz /. sol[[1]]};
```

Printed by Mathematica for Students

Odometry.nb | 3

Rotation speed of the ball in A

```
A_OmegaK = A_omegaK + A_OmegaA[t];
```

Coordinate transformation from A to I System

```
L_OmegaK[t] = FullSimplify[RLA.A_OmegaK];
```

Solution

```
phix'[t] = L_OmegaK[t][[1]]

$$\frac{1}{3rK} \left( \sqrt{6} rW \sin[\theta_{tax}[t]] \sin[\theta_{tay}[t]] (-\psi_{i2}'[t] + \psi_{i3}'[t]) + \sqrt{2} rW \cos[\theta_{tax}[t]] \sin[\theta_{tay}[t]] (\psi_{i1}'[t] + \psi_{i2}'[t] + \psi_{i3}'[t]) + \cos[\theta_{tay}[t]] \left( \sqrt{2} rW (-2\psi_{i1}'[t] + \psi_{i2}'[t] + \psi_{i3}'[t]) + 3rK \theta_{tax}'[t] \right) \right)$$

phiy'[t] = L_OmegaK[t][[2]]

$$\frac{1}{3rK} \left( \sqrt{6} rW \cos[\theta_{tax}[t]] (-\psi_{i2}'[t] + \psi_{i3}'[t]) - \sqrt{2} rW \sin[\theta_{tax}[t]] (\psi_{i1}'[t] + \psi_{i2}'[t] + \psi_{i3}'[t]) + 3rK \theta_{tay}'[t] \right)$$

phiz'[t] = L_OmegaK[t][[3]]

$$\frac{1}{3rK} \left( \sqrt{2} rW (\cos[\theta_{tax}[t]] \cos[\theta_{tay}[t]] + 2 \sin[\theta_{tay}[t]]) \psi_{i1}'[t] + \sqrt{2} rW \left( \sqrt{3} \cos[\theta_{tay}[t]] \sin[\theta_{tax}[t]] (-\psi_{i2}'[t] + \psi_{i3}'[t]) + \cos[\theta_{tax}[t]] \cos[\theta_{tay}[t]] (\psi_{i2}'[t] + \psi_{i3}'[t]) - \sin[\theta_{tay}[t]] (\psi_{i2}'[t] + \psi_{i3}'[t]) \right) + 3rK (-\sin[\theta_{tay}[t]] \theta_{tax}'[t] + \theta_{taz}'[t]) \right)$$

```

Translation of the ball

Vector from the ground to center of the ball (P)

```
rBP = {0, 0, rK};
```

Substitution

```
OmegaK_given[t] = RIL.{phix_given'[t], phiy_given'[t], phiz_given'[t]};
```

Speed vector of the center of the ball (P) in I

Lightweight solution with use of solutions above

```
rPdot_light = FullSimplify[Cross[OmegaK_given[t], rBP]]
{rK (Sin[thetaz[t]] phix_given'[t] + Cos[thetaz[t]] phiy_given'[t]),
 -rK Cos[thetaz[t]] phix_given'[t] + rK Sin[thetaz[t]] phiy_given'[t], 0}
```

Explicit solution

Printed by Mathematica for Students

4 | Odometry.nb

```
rPdot = FullSimplify[Cross[\!(*\!\(\*SubscriptBox[\(\Omega\), \(\kappa\)]\)[t]), rBP]]
```

$$\begin{aligned} & \left\{ \frac{1}{3} \left(\sqrt{2} rW \sin[\theta_{\text{ay}}[t]] \sin[\theta_{\text{az}}[t]] \left(\sqrt{3} \sin[\theta_{\text{ax}}[t]] (-\psi_{\text{i2}}'[t] + \psi_{\text{i3}}'[t]) + \right. \right. \right. \\ & \quad \left. \left. \left. \cos[\theta_{\text{ax}}[t]] (\psi_{\text{i1}}'[t] + \psi_{\text{i2}}'[t] + \psi_{\text{i3}}'[t]) \right) + \cos[\theta_{\text{ay}}[t]] \right. \\ & \quad \left. \sin[\theta_{\text{az}}[t]] \left(\sqrt{2} rW (-2 \psi_{\text{i1}}'[t] + \psi_{\text{i2}}'[t] + \psi_{\text{i3}}'[t]) + 3 rK \theta_{\text{ax}}'[t] \right) + \right. \\ & \quad \left. \cos[\theta_{\text{az}}[t]] \left(\sqrt{6} rW \cos[\theta_{\text{ax}}[t]] (-\psi_{\text{i2}}'[t] + \psi_{\text{i3}}'[t]) - \right. \right. \\ & \quad \left. \left. \sqrt{2} rW \sin[\theta_{\text{ax}}[t]] (\psi_{\text{i1}}'[t] + \psi_{\text{i2}}'[t] + \psi_{\text{i3}}'[t]) + 3 rK \theta_{\text{ay}}'[t] \right) \right), \\ & \frac{1}{3} \left(\sqrt{2} rW \left((\cos[\theta_{\text{az}}[t]] (2 \cos[\theta_{\text{ay}}[t]] - \cos[\theta_{\text{ax}}[t]] \sin[\theta_{\text{ay}}[t]]) - \right. \right. \\ & \quad \left. \sin[\theta_{\text{ax}}[t]] \sin[\theta_{\text{az}}[t]]) \psi_{\text{i1}}'[t] - \left(\cos[\theta_{\text{az}}[t]] \right. \right. \\ & \quad \left. \left(\cos[\theta_{\text{ay}}[t]] + (\cos[\theta_{\text{ax}}[t]] - \sqrt{3} \sin[\theta_{\text{ax}}[t]]) \sin[\theta_{\text{ay}}[t]] \right) + \right. \\ & \quad \left. \left(\sqrt{3} \cos[\theta_{\text{ax}}[t]] + \sin[\theta_{\text{ax}}[t]] \right) \sin[\theta_{\text{az}}[t]] \right) \psi_{\text{i2}}'[t] - \\ & \quad \left(\cos[\theta_{\text{ay}}[t]] \cos[\theta_{\text{az}}[t]] + \cos[\theta_{\text{az}}[t]] \right. \\ & \quad \left. \left(\cos[\theta_{\text{ax}}[t]] + \sqrt{3} \sin[\theta_{\text{ax}}[t]] \right) \sin[\theta_{\text{ay}}[t]] + \right. \\ & \quad \left. \left(-\sqrt{3} \cos[\theta_{\text{ax}}[t]] + \sin[\theta_{\text{ax}}[t]] \right) \sin[\theta_{\text{az}}[t]] \right) \psi_{\text{i3}}'[t] - \\ & \quad \left. 3 rK \cos[\theta_{\text{ay}}[t]] \cos[\theta_{\text{az}}[t]] \theta_{\text{ax}}'[t] + 3 rK \sin[\theta_{\text{az}}[t]] \theta_{\text{ay}}'[t] \right), 0 \} \end{aligned}$$

Printed by Mathematica for Students

A.17 Motorenevaluation

1 Motoren Auswahl

1.1 Anforderungen

In folgender Tabelle sind die entscheidenden Variablen und die allgemeinen Annahmen aufgetragen.

| Variabel | Wert | Einheit | Variabel | Wert | Einheit |
|-------------|------|---------|----------|------|----------------|
| m_K | 2 | kg | g | 9.81 | m/s^2 |
| m_R | 14 | kg | l | 0.5 | m |
| ϑ | 20 | deg | r_K | 0.13 | m |
| v_{max} | 3 | m/s | r_W | 0.06 | m |
| v_{nom} | 1 | m/s | | | |

Aus dem Neigungswinkel ϑ lässt sich die Beschleunigung $a = g \cdot \tan \vartheta = 3.57 \text{ m/s}^2$ und daraus das maximale vom allen Omniwheels zu übertragende Moment $T_{max} = r_W \cdot m_{tot} \cdot a = 3.5 \text{ Nm}$ berechnen. Das von einem einzelnen Omniwheel aufzubringende Moment wird entsprechend eher geringer sein, im ungünstigsten Fall aber auch etwa 3 Nm. Dieses Moment gilt jedoch nur für das quasi statische Modell, bei welchem eine konstante Beschleunigung angenommen wird. Es ist klar, dass bei vollständig dynamischer Betrachtung noch höhere Spitzennmomente auftreten werden. Erste Simulationen zeigen, dass bei einem maximalen Moment von ca. 5 Nm die angestrebte Dynamik erreichbar sein sollte.

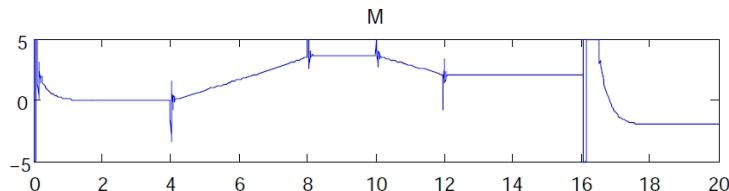


Abbildung 1: Simulation

Aus der Maximalgeschwindigkeit $v_{max} = 3 \text{ m/s}$ erhalten wir die maximale Drehzahl eines Omniwheels

$$n_{max} = \frac{v_{max} \cos \alpha \cdot 60}{2\pi r_W} = 337.62 \text{ U/min}$$

Wobei $\alpha = 45$ dem Eingriffswinkel der Omniwheels entspricht.

Man beachte dabei, dass diese Geschwindigkeit bei 20° Neigung schon nach 0.84 s erreicht ist!
 $v_{nom} = 1 \text{ m/s}$ entspricht einer Drehzahl von 112.6 U/min.

Das würde einer maximalen Leistung von ca. $P_{max} = \omega_{max} \cdot T_{max} \approx 180 \text{ W}$ entsprechen.

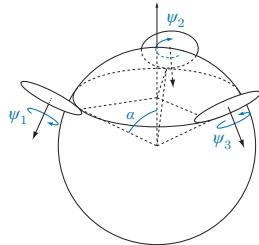
Herleitung der Geschwindigkeit

Abbildung 2: Skizze der Omniwheels Anordnung

Der Ballbot bewege sich mit konstanter Geschwindigkeit v_{max} in die positive x-Richtung. Dann ist

$$\omega_K = \frac{v_{max}}{r_K}$$

Die Omniwheels bewegen sich nur im Abstand $r_K \cos \alpha$ vom Dreh- und Mittelpunkt der Kugel auf einem aufbaufesten Teilkreis mit Radius $r_K \sin \alpha$. Die Geschwindigkeit auf diesem Teilkreis ergibt sich zu:

$$v_{TK} = \omega_K \cdot r_{TK} = v_{max} \cos \alpha$$

Mit der „no slip“ Bedingung gilt für die Umfangsgeschwindigkeit des Omni-Wheels:

$$v_W = v_{TK}$$

Dies ist die Maximalgeschwindigkeit eines Omni-Wheels, wenn es genau in Bewegungsrichtung zeigt. Dreht es sich mit dem Aufbau, so nimmt seine Geschwindigkeit in Kraftübertragungsrichtung ab, bis es genau senkrecht zur Bewegungsrichtung steht. Die Drehzahl des Omni-Wheels berechnet sich folgendermassen:

$$\omega_W = \frac{v_W}{r_W} = \frac{2\pi n}{60} \quad \rightarrow n_{max} = \frac{v_{max} \cos \alpha \cdot 60}{2\pi r_W}$$

1.2 Auslegung

Mit diesen Werten konnten die Motoren ausgelegt werden. Weiter wurde angenommen, dass die maximale Versorgungsspannung $V_{max} = 37$ V und der maximale Strom $I_{max} = 140$ A sei.¹ Der nominelle Betriebspunkt kann bei $T_{nom} \approx 1$ Nm und v_{nom} angenommen werden, da der Ballbot über die Zeit gemittelt mehrheitlich Winkel kleiner als 1 deg ausgleichen wird. Mit diesen Werten wurden mittels Maxon Software und Katalog diejenigen Motoren herausgesucht, die den Anforderungen am besten genügen (siehe Datenblatt).

1.3 Auswahl

Ausgewählt wurde als beste Eignung der EC-powermax-30 200 W mit einem GP-42 C Getriebe. Als Vergleich und als Ausweichmodelle seien der EC-powermax-30 100 W und der EC-powermax-22 120 W aufgeführt.

Ein Vergleich der Dimensionen und Gewichte:

| Motor | EC-pm-22 120W | EC-pm-30 100W | EC-pm-30 200W |
|-------------------|---------------|---------------|---------------|
| Gewicht | 160 g | 165 g | 271 g |
| Länge | 66 mm | 47 mm | 64 mm |
| Getriebe | GP-22 HP 18:1 | GP-32 HP 14:1 | GP-42 C 26:1 |
| Gewicht | 64 g | 178 g | 360 g |
| Länge | 32,2 mm | 50 mm | 55,4 mm |
| Encoder | HEDL 5540 | HEDL 5540 | HEDL 5540 |
| Gewicht | 40 g | 40 g | 40 g |
| Länge | 20 mm | 20 mm | 20 mm |
| Elektronik | EPOS 70/10 | EPOS 70/10 | EPOS 70/10 |
| Gewicht | 330 g | 330 g | 330 g |
| Gesamtgewicht | 594 g | 713 g | 1001 g |
| Gesamtlänge | 120 mm | 137 mm | 140 mm |

Genauere Daten können den Datenblätter entnommen werden.

Vergleich und Getriebeauswahl

Um das Moment und die Drehzahl zu berechnen wurden folgende Formeln² angewandt:

$$T = i \cdot k_M \cdot I \cdot \eta_M \eta_G$$

$$n = \frac{1}{i} \left(k_n \cdot U - \frac{\Delta n}{\Delta M} \cdot k_M \cdot I \eta_M \right)$$

Die entsprechenden Motordaten wurden ebenfalls dem Maxon Katalog entnommen.

¹Folgt aus der Akku Spezifikation

²siehe Maxon Katalog

| 200 W - 48 V | | | | | |
|---|--------|--------|--------|--------|--------|
| Untersetzung | 12 | 15 | 19 | 21 | 26 |
| Nennmoment | 1.11 | 1.39 | 1.75 | 1.94 | 2.4 |
| Max. Dauermoment LE | 2.36 | 2.95 | 3.73 | 4.13 | 5.11 |
| Max. erreichbares Moment | 5.9 | 7.37 | 9.33 | 10.32 | 12.77 |
| Max. erreichbare Drehzahl bei max. Moment | 617.82 | 494.26 | 390.21 | 353.04 | 285.15 |
| Max Geschwindigkeit, bei max. Moment | 5.49 | 4.39 | 3.47 | 3.14 | 2.53 |
| 200 W - 36 V | | | | | |
| Untersetzung | 12 | 15 | 19 | 21 | 26 |
| Nennmoment | 1.1 | 1.38 | 1.75 | 1.93 | 2.39 |
| Max. Dauermoment LE | 1.73 | 2.16 | 2.73 | 3.02 | 3.74 |
| Max. erreichbares Moment | 4.31 | 5.39 | 6.83 | 7.55 | 9.35 |
| Max. erreichbare Drehzahl bei max. Moment | 998.23 | 798.58 | 630.46 | 570.41 | 460.72 |
| Max Geschwindigkeit, bei max. Moment | 8.87 | 7.1 | 5.6 | 5.07 | 4.09 |
| 200 W - 24 V | | | | | |
| Untersetzung | 12 | 15 | 19 | 21 | 26 |
| Nennmoment | 1.05 | 1.31 | 1.66 | 1.84 | 2.28 |
| Max. Dauermoment LE | 1.14 | 1.43 | 1.81 | 2.00 | 2.47 |
| Max. erreichbares Moment | 2.85 | 3.56 | 4.51 | 4.99 | 6.18 |
| Max. erreichbare Drehzahl bei max. Moment | 1642.3 | 1313.9 | 1037.3 | 938.48 | 758.00 |
| Max Geschwindigkeit, bei max. Moment | 14.59 | 11.67 | 9.22 | 8.34 | 6.74 |
| 120 W - 48 V | | | | | |
| Untersetzung | 14 | 16 | 19 | 21 | 26 |
| Nennmoment | 0.58 | 0.66 | 0.79 | 0.87 | 1.08 |
| Max. Dauermoment LE | 2.36 | 2.7 | 3.21 | 3.55 | 4.39 |
| Max. erreichbares Moment | 5.91 | 6.75 | 8.02 | 8.86 | 10.97 |
| Max. erreichbare Drehzahl bei max. Moment | 69.480 | 60.790 | 51.190 | 46.320 | 37.410 |
| Max Geschwindigkeit, bei max. Moment | 0.62 | 0.54 | 0.45 | 0.41 | 0.33 |
| 120 W - 36 V | | | | | |
| Untersetzung | 14 | 16 | 19 | 20 | 21 |
| Nennmoment | 0.57 | 0.66 | 0.78 | 0.82 | 0.86 |
| Max. Dauermoment LE | 1.67 | 1.91 | 2.27 | 2.39 | 2.51 |
| Max. erreichbares Moment | 4.19 | 4.78 | 5.68 | 5.98 | 6.28 |
| Max. erreichbare Drehzahl bei max. Moment | 582.87 | 510.02 | 429.49 | 408.01 | 388.58 |
| Max Geschwindigkeit, bei max. Moment | 5.18 | 4.53 | 3.82 | 3.63 | 3.45 |
| 120 W - 24 V | | | | | |
| Untersetzung | 16 | 19 | 20 | 24 | 33 |
| Nennmoment | 0.64 | 0.76 | 0.8 | 0.96 | 1.32 |
| Max. Dauermoment LE | 1.35 | 1.6 | 1.68 | 2.02 | 2.78 |
| Max. erreichbares Moment | 3.36 | 3.99 | 4.21 | 5.05 | 6.94 |
| Max. erreichbare Drehzahl bei max. Moment | 1000.9 | 842.82 | 800.68 | 667.23 | 485.26 |
| Max Geschwindigkeit, bei max. Moment | 8.89 | 7.49 | 7.11 | 5.93 | 4.31 |

| 100 W - 48 V | | | | | |
|---|--------|--------|--------|--------|--------|
| Untersetzung | 12 | 15 | 19 | 21 | 26 |
| Nennmoment | 0.64 | 0.81 | 1.02 | 1.13 | 1.4 |
| Max. Dauermoment LE | 2.18 | 2.72 | 3.45 | 3.81 | 4.72 |
| Max. erreichbares Moment | 5.45 | 6.81 | 8.62 | 9.53 | 11.8 |
| Max. erreichbare Drehzahl bei max. Moment | 358.17 | 286.54 | 226.21 | 204.67 | 165.31 |
| Max Geschwindigkeit, bei max. Moment | 3.18 | 2.55 | 2.01 | 1.82 | 1.47 |
| 100 W - 36 V | | | | | |
| Untersetzung | 12 | 15 | 19 | 21 | 26 |
| Nennmoment | 0.65 | 0.81 | 1.03 | 1.14 | 1.41 |
| Max. Dauermoment LE | 1.64 | 2.05 | 2.6 | 2.87 | 3.55 |
| Max. erreichbares Moment | 4.1 | 5.13 | 6.49 | 7.18 | 8.89 |
| Max. erreichbare Drehzahl bei max. Moment | 816.74 | 653.39 | 515.84 | 466.71 | 376.96 |
| Max Geschwindigkeit, bei max. Moment | 7.26 | 5.81 | 4.58 | 4.15 | 3.35 |
| 100 W - 24 V | | | | | |
| Untersetzung | 12 | 15 | 19 | 21 | 26 |
| Nennmoment | 0.6 | 0.75 | 0.94 | 1.04 | 1.29 |
| Max. Dauermoment LE | 1.09 | 1.37 | 1.73 | 1.91 | 2.37 |
| Max. erreichbares Moment | 2.73 | 3.42 | 4.33 | 4.78 | 5.92 |
| Max. erreichbare Drehzahl bei max. Moment | 1525.9 | 1220.7 | 963.71 | 871.92 | 704.25 |
| Max Geschwindigkeit, bei max. Moment | 13.56 | 10.85 | 8.56 | 7.75 | 6.26 |

Fazit

Aus diesen Tabellen lässt sich leicht erkennen, dass wenn bei Höchstgeschwindigkeit die maximale Drehzahl von ca. 400 U/min nicht überschritten wird und ein möglichst hohes Drehmoment angestrebt wird, das 26:1 Getriebe die Spezifikationen am besten erfüllt. Man beachte dabei allerdings, dass diese Geschwindigkeit dann nicht überschritten werden kann, was heisst, dass die maximalen Beschleunigungen bzw. der maximale Neigungswinkel von 20 grad wie bereits erwähnt nur sehr kurz vorkommen kann (keine ganze Sekunde).

Des weiteren sei angemerkt, dass mit einem 120 W Motor bei entsprechenden Drehzahlen zwar auch maximale Momente von 5 Nm erreicht werden können, dies aber nur bei extremer Überlastung der Motoren so wie auch der passenden Getriebe, welche nur Drehmomente bis 3.75 Nm zulassen.

EC-powermax 30 Ø30 mm, bürstenlos, 200 Watt

High Power

Lagerprogramm **Standardprogramm** **Sonderprogramm (auf Anfrage)**

Bestellnummern

| | | |
|--------|--------|--------|
| 305013 | 305014 | 305015 |
|--------|--------|--------|

Motordaten (provisorisch)

| | Werte bei Nennspannung | V | 24.0 | 36.0 | 48.0 |
|---|------------------------|-------|-------|-------|------|
| 1 Nennspannung | V | 24.0 | 36.0 | 48.0 | |
| 2 Leerlaufdrehzahl | min ⁻¹ | 17000 | 17000 | 16500 | |
| 3 Leerlaufstrom | mA | 885 | 590 | 422 | |
| 4 Nenndrehzahl | min ⁻¹ | 16200 | 16200 | 15800 | |
| 5 Nennmoment (max. Dauerdrehmoment) | mNm | 114 | 119 | 120 | |
| 6 Nennstrom (max. Dauerbelastungsstrom) | A | 9.21 | 6.39 | 4.70 | |
| 7 Anhältemoment | mNm | 3180 | 3460 | 3430 | |
| 8 Anlaufstrom | A | 236 | 171 | 124 | |
| 9 Max. Wirkungsgrad | % | 88 | 89 | 89 | |

Kenndaten

| | | | | |
|--------------------------------------|-------------------------------------|--------|--------|--------|
| 10 Anschlusswiderstand Phase-Phase | Ω | 0.102 | 0.210 | 0.386 |
| 11 Anschlussinduktivität Phase-Phase | mH | 0.0163 | 0.0368 | 0.0653 |
| 12 Drehmomentkonstante | mNm A ⁻¹ | 13.5 | 20.2 | 27.6 |
| 13 Drehzahlkonstante | min ⁻¹ V ⁻¹ | 710 | 473 | 346 |
| 14 Kennliniensteigung | min ⁻¹ mNm ⁻¹ | 5.36 | 4.92 | 4.83 |
| 15 Mechanische Anlaufzeitkonstante | ms | 1.87 | 1.72 | 1.68 |
| 16 Rotorträgheitsmoment | gcm ² | 33.3 | 33.3 | 33.3 |

Spezifikationen

Thermische Daten

| | |
|---------------------------------------|-------------------------|
| 17 Therm. Widerstand Gehäuse-Luft | 5.3 KW ⁻¹ |
| 18 Therm. Widerstand Wicklung-Gehäuse | 0.0785 KW ⁻¹ |
| 19 Therm. Zeitkonstante der Wicklung | 0.738 s |
| 20 Therm. Zeitkonstante des Motors | 848 s |
| 21 Umgebungstemperatur | -20 ... +100°C |
| 22 Max. Wicklungstemperatur | +155°C |

Mechanische Daten (vorgespannte Kugellager)

| | | |
|--|-------------------------|---------|
| 23 Grenzdrehzahl | 25000 min ⁻¹ | |
| 24 Axialspiel bei Axiallast < 6.0 N | 0 mm | |
| | > 6.0 N | 0.14 mm |
| 25 Radialspiel | vorgespannt | |
| 26 Max. axiale Belastung (dynamisch) | 5.5 N | |
| 27 Max. axiale Aufpresskraft (statisch) | 100 N | |
| (statisch, Welle abgesetzt) | 1300 N | |
| 28 Max. radiale Belastung, 5 mm ab Flansch | 25 N | |

Weitere Spezifikationen

| | |
|------------------|-------|
| 29 Polpaarzahl | 2 |
| 30 Anzahl Phasen | 3 |
| 31 Motorgewicht | 271 g |

Motordaten gemäss Tabelle sind Nenndaten.

Anschlüsse Motor (Kabel AWG 18)

| | |
|---------|-----------------|
| schwarz | Motorwicklung 2 |
| weiss | Motorwicklung 3 |
| rot | Motorwicklung 1 |

Anschlüsse Sensoren (Kabel AWG 26)

| | |
|--------------|---------------------------------|
| schwarz/grau | Hall-Sensor 2 |
| blau | GND |
| grün | V _{bus} 4.5 ... 24 VDC |
| rot/grau | Hall-Sensor 1 |
| weiss/grau | Hall-Sensor 3 |

Betriebsbereiche

Legende

- Dauerbetriebsbereich**: Unter Berücksichtigung der angegebenen thermischen Widerstände (Ziffer 17 und 18) und einer Umgebungstemperatur von 25°C wird bei dauernder Belastung die maximal zulässige Rotortemperatur erreicht = thermische Grenze.
- Kurzzeitbetrieb**: Der Motor darf kurzzeitig und wiederkehrend überlastet werden.

Typenleistung

maxon-Baukastensystem

Übersicht Seite 16 - 21

Planetengetriebe

- Ø32 mm
8 Nm
Seite 237
- Ø42 mm
3 - 15 Nm
Seite 241

Empfohlene Elektronik:

| | |
|------------|-----------|
| DECS 5/5 | Seite 288 |
| DEC 70/10 | 295 |
| DES 70/10 | 296 |
| EPOS 70/10 | 303 |
| EPOS 50/5 | 303 |

Hinweise

Encoder MR
128 - 1000 Imp.,
3 Kanal
Seite 264

Encoder HEDL 5540
50 Imp.,
3 Kanal
Seite 272

Bremse AB 20
Ø20 mm
24 VDC, 0.1 Nm
Seite 314

Ausgabe April 2009 / Änderungen vorbehalten

A.18 Harmonic Drive

Untersuchung des Einflusses des Getriebespiels auf die Bewegungsgenauigkeit und Einsatz eines Harmonic Drive

Péter Fankhauser

1 Problemformulierung

Ein grosses Spiel im Getriebe des Antriebs von Rezero könnte zu einer Einbusse der Bewegungsgenauigkeit führen. Rezero wäre dadurch nicht in der Lage ruhig in einem Ort zu stehen und würde ständig schwanken.

In diesem Dokument wird untersucht, wie stark sich das Getriebespiel auf die Bewegungsgenauigkeit auswirkt und ob in diesem Stand des Projekts ein Harmonic Drive eine mögliche Alternative darstellt.

2 Einfluss des Getriebespiels

Aus dem Maxon Katalog kann das mittlere Getriebespiel für den unbelasteten Fall entnommen werden. Für das Getriebe GP 42 C (S. 240) wird 0.4° angegeben. Als oberer Grenzwert nach einigen Betriebsstunden wird hier 1° Getriebespiel angenommen, wobei dies nur eine grobe Schätzung ist.

Es wird der Zustand angenommen, wenn Rezero am Ort stehen bleiben soll und die Belastungen sehr klein sind. Für hohe Beschleunigungen würde das Getriebespiel entsprechend grösser, die Unsicherheit der Bewegung aber weniger stark sichtbar.

Unsicherheit Getriebespiel: $\Delta\psi_x$

Bogenlänge auf Omni wheel: $\Delta B_W = r_W \cdot \Delta\psi_x$

Entspricht Bogenlänge auf Kugel: $\Delta B_K = \Delta B_W$

Die Unsicherheit auf der Kugeloberfläche entspricht der Unsicherheit des Auflagepunktes (Pendelbewegung ignoriert). Für die oben angegebenen Werte entspricht dies einer Unsicherheit des Auflagepunktes auf dem Boden von $\Delta B_K = 0.42 \text{ mm} - 1.05 \text{ mm}$.

Weiter wird hier untersucht, wie stark sich das Getriebespiel auf die Bewegung des obersten Punktes des Roboters auswirkt, wenn man den Auflagepunkt als fixiert annimmt.

Aufbau Unsicherheits-Winkel (Drehpunkt ist Auflagepunkt Boden): $\Delta\vartheta'_x = \frac{\Delta B_K}{2r_K}$

Unsicherheits-Bogenlänge des obersten Punktes: $\Delta B_A \approx (l' + r_K) \cdot \Delta\vartheta'_x = (l' + r_K) \frac{\Delta B_K}{2r_K}$

Für die oben angegebenen Werte entspricht dies einer

Unsicherheit des Ortes des obersten Punktes von ungefähr $\Delta B_A = 1.05 \text{ mm} - 2.6 \text{ mm}$
wobei $l' = 0.75 \text{ m}$.

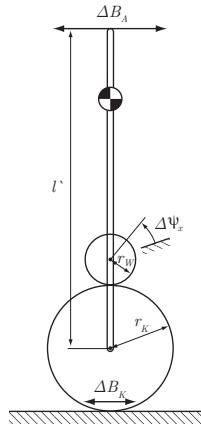


Abbildung 1:

3 Harmonic Drive

Als Alternative zum Planetengetriebe GP 42 C von Maxon werden im Folgendem verschiedene Harmonic Drive Getriebe angegeben. Als Hersteller für Harmonic Drives mit Untersetzungen bis 30 wurde einzig die Harmonic Drive LLC (US) gefunden, welche einen Sitz in Deutschland (Harmonic Drive AG) und eine Vertretung in der Schweiz (Ass AG) hat.

CSF: Untersetzung 30, Grösse 11 oder 14

CSF Mini: CSF-2XH-F, Untersetzung 30, Grösse 11 oder 14

SHF: Untersetzung 30, Grösse 14

CSF-GH: Quick Connect, kein Modell mit Untersetzung 30

Alle aufgelisteten Getriebe können an eine Motorenwelle angeschlossen werden und der Abtrieb erfolgt über ein Flansch.

4 Fazit

Die Untersuchung des Getriebespiels zeigt, das die Bewegungsunsicherheit in einem akzeptablen Bereich liegt. Grundsätzlich bieten die Harmonic Drive eine sehr gute Lösung für das Getriebe,

da sie spielfrei, kleiner und leichter sind, als das von uns gewählte Planetengetriebe. Der Aufwand zu diesem Zeitpunkt des Projektes auf ein Harmonic Drive umzusteigen ist sehr hoch, da die Aufhängung, die Omniwheels, die Motorenbestellung angepasst und wahrscheinlich neue Teile konstruiert werden müssten. Des weiteren ist der Preis und die Lieferzeit der Harmonic Drives zu diesem Zeitpunkt nicht bekannt. Der Preis wird jedoch als sehr hoch geschätzt im Vergleich zur momentanen Lösung.

A.19 Auslegung der Lagerungen für das Omniwheel

1.1 Auslegung der Lagerungen für das Omniwheel

1.1.1 Wirkende Kräfte aus Kräftemodell

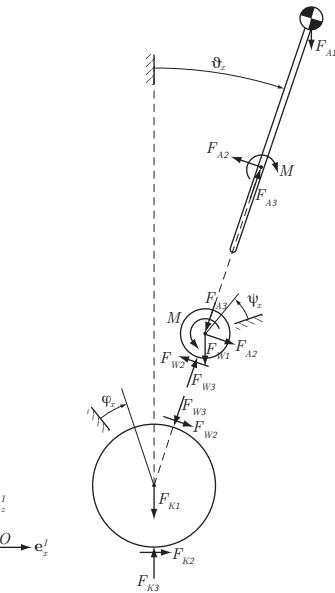


Abbildung 1.1: Freischnitt des Modells

Die Berechnungen aus dem Modell ergeben für die Auslegung der Rillenkugellager folgende Radial- und Axialbelastungen:

- $F_r = 0.120 \text{ kN}$
- $F_a = 0.070 \text{ kN}$

1.1.2 Statisch äquivalente Belastung

Die auf die Lager wirkenden Kräfte sind um das Omniwheel umlaufende Kräfte, die Belastung auf die einzelnen Lagerungen ist nicht stetig.

Die unter dieser Belastung erreichten Umlaufzahlen sind sehr gering. Die maximal auftretenden Umdrehungen pro Minute werden bei einer Anordnung quer zur Fahrtrichtung erreicht. Bei einer Geschwindigkeit von 2 m/s ergibt

sich somit für die kleine Rolle eine maximale Drehzahl von 1000 U/min. Da diese Drehzahl aber nur lokal und über ein kurzes Zeitintervall erreicht wird, wird für die Auslegung der Lagerung die statisch äquivalente Belastung verwendet, genauer die statische Tragzahl P_0 . Dies ist in den folgenden Fällen zulässig:

- Das Lager läuft unter Belastung mit sehr niedriger Drehzahl um $n < 10 \text{ U/min}$.
- Das Lager steht still und wird dabei dauernd oder kurzzeitig stossartig belastet.
- Das umlaufende Lager muss zusätzlich zur normalen Betriebsbelastung während eines Bruchteils einer Umdrehung eine hohe Stossbelastung aufnehmen.

Die Bewegungen des Ballbots werden nur selten über längere Zeit konstant gehalten. Aufgrund der gemachten Annahmen kommt man einer Drehzahl von 10 U/min sehr nahe, insbesondere wenn man die kurzen Betriebsintervalle des Ballbots berücksichtigt.

1.1.3 Auslegung

Für die statisch äquivalente Belastung gilt für Rillenkugellager:

$$P_0 = X_0 \cdot F_r + Y_0 \cdot F_a \quad (1.1)$$

Der Radialfaktor für die vorliegende Belastungsart beträgt $X_0 = 0.6$, der Axialfaktor $Y_0 = 0.5$.

$$P_0 = 0.6 \cdot F_r + 0.5 \cdot F_a = 0.102 \text{ kN} \quad (1.2)$$

Die statische Tragzahl C_0 für das Rillenkugellager W618-4 ist 0.173 kN.

Der Sicherheitsfaktor berechnet sich aus folgender Gleichung:

$$s_0 = \frac{C_0}{P_0} = \frac{0.173 \text{ kN}}{0.102 \text{ kN}} = 1.69 \quad (1.3)$$

Der Sicherheitsfaktor von 1.69 ist ausreichend, das gewählte Rillenkugellager W618-4 das grösstmögliche, welches sich in der grossen Rolle einbauen lässt bei einem Durchmesser des Omniwheels von 120 mm.

A.20 Berechnung der durchschnittlichen Akkulaufzeit

1.1 Berechnung der durchschnittlichen Akkulaufzeit

Alle eingebauten Komponenten haben eine durchschnittliche Leistungsaufnahme und einen Wirkungsgrad. Aufgrund der Zahlen in den Tabellen 0.1 und 0.2 lässt sich nun die Akkulaufzeit, bestimmt durch alle eingebauten Komponenten, berechnen.

Leistungsaufnahme Motoren, Leistungselektronik

$$P_1 = \frac{P_{Leistungselektronik} + P_{Motor} + P_{Encoder} + P_{Hallsensor}}{Leistungselektronik - EFF} \quad (1.1)$$

$$P_1 = \frac{3 \cdot 5 \text{ W} + 1.5 \cdot 200 \text{ W} + 3 \cdot 0.5 \text{ W} + 3 \cdot 0.15 \text{ W}}{0.93} = 340 \text{ W} \quad (1.2)$$

Leistungsaufnahme IMU und LED's:

$$P_2 = \frac{P_{IMU} + P_{LED}}{DC - DC - EFF} = \frac{0.32 \text{ W} + 8.1 \text{ W}}{0.91} = 9.25 \text{ W} \quad (1.3)$$

Leistungsaufnahme von Microcontroller, Linuxboard, Ultraschall, Bluetoothmodul, Laserrange und Mikrofon

$$P_3 = \frac{P_{MiC} + P_{LiBo} + P_{Ultras} + P_{Blt} + P_{Lsr} + P_{Micro}}{DC - DC - EFF} \quad (1.4)$$

$$P_3 = \frac{3 \text{ W} + 5 \text{ W} + 2 \cdot 0.015 \text{ W} + 0.2 \text{ W} + 2.5 \text{ W} + 0.1 \text{ W}}{0.88} = 12.3 \text{ W} \quad (1.5)$$

Die totale Leistung beträgt

$$P_{tot} = P_1 + P_2 + P_3 = 362.366 \text{ W} \quad (1.6)$$

$$t_{Laufzeit} = \frac{I_{Akku}}{\frac{P_{tot}}{V_{Akku}}} = \frac{5 \text{ Ah}}{\frac{362.366 \text{ W}}{37 \text{ V}}} = 0.51 \text{ h} \quad (1.7)$$

resultiert.

| Komponente | Leistungsaufnahme [W] |
|-----------------------|-----------------------|
| Leistungselektronik | 5 |
| Encoder | 0,5 |
| Hallsensoren | 0,15 |
| Motor | 200 |
| IMU | 0,32 |
| Mikrofon | 0,1 |
| Ultraschallsensor | 0,015 |
| Atmel Mikrocontroller | 3 |
| Linuxboard | 5 |
| Laserdistanzsensor | 2,5 |
| LED-Beleuchtung | 8,1 |
| Bluetoothmodul | 0,2 |

Tabelle 1.1: Leistungsaufnahme der Komponenten

| Komponente | Effizienz [%] |
|---------------------|---------------|
| Leistungselektronik | 93 |
| DC/DC Wandler 15 V | 91 |
| DC/DC Wandler 5 V | 88 |

Tabelle 1.2: Effizienz der Komponenten

A.21 Testbenchwerte

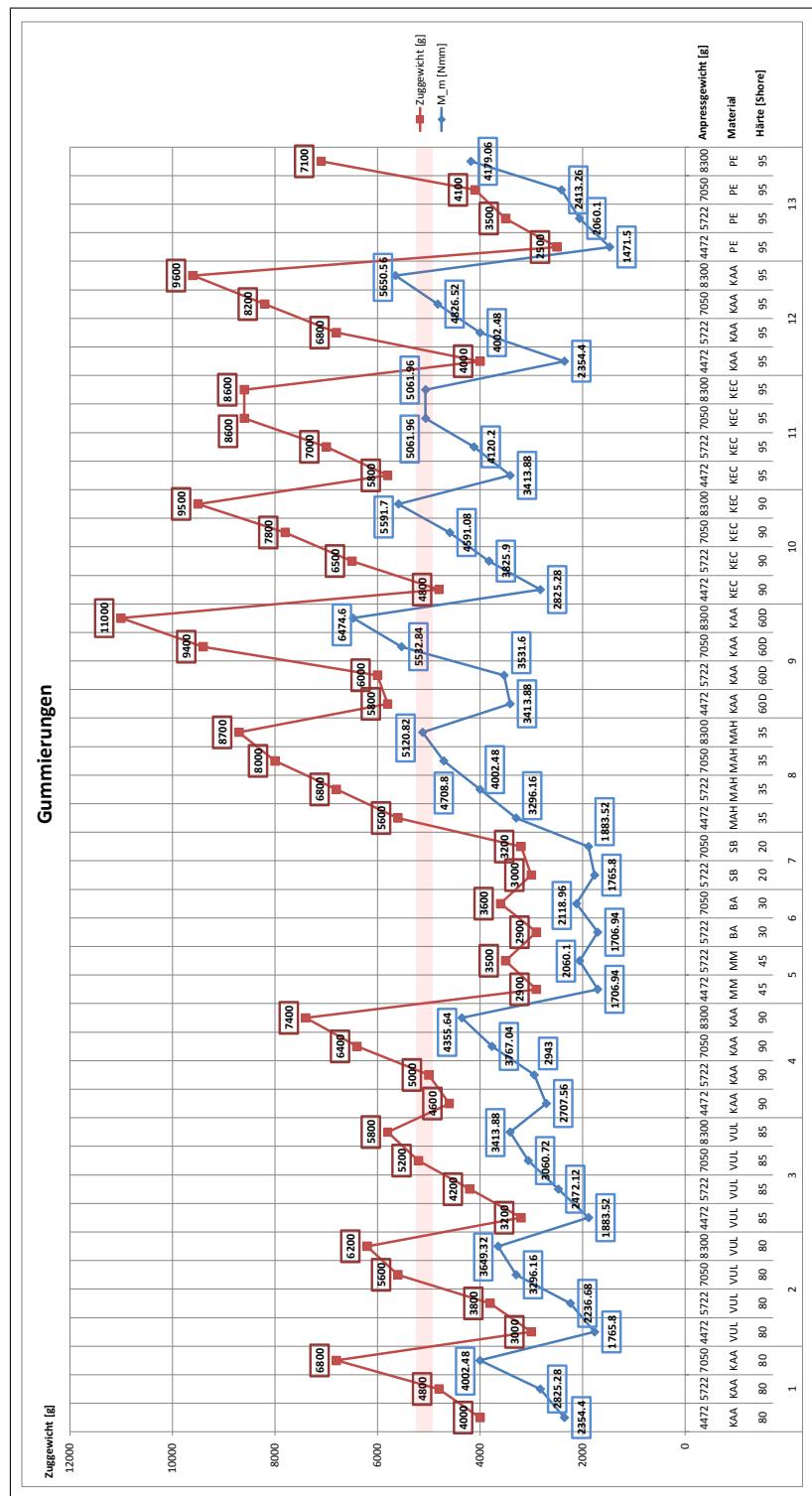


Abbildung A.26: Messwerte der Beschichtungstests