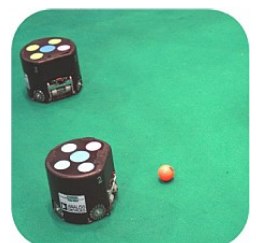


Neuentwicklung eines Small Size League Roboters

Christoph Lueglinger

Diplomarbeit am
Institut für Maschinenelemente und
Entwicklungsmethodik, TU Graz
Graz 2010

Betreuung: O.Univ.-Prof. Dr. Gunter Jürgens
Ass.-Prof. Dr. Michael Bader



Abstract

This thesis deals with the mechanical side of an autonomous soccer-robot for the "RoboCup Small Size Soccer League". It describes the design itself and the entire process, that ranges from specifications to design method and the findings due to experiments and the operation of the robot. The important criteria of each component and their problems are considered and solutions are presented.

Additionally, two components are singled out and examined closely, the omnidirectional undercarriage and the kicking device. The properties of an omnidirectional undercarriage were identified by a simulation and completed and verified with data from experiments. This gives a good description of the influence of various parameters on the performance of a Small Size League robot. The kicking device was optimized geometrically by tests and the impact of some parameters was analyzed. The results of these two studies were also discussed in the context of the entire robot.

All in all, this work provides a guidance for a development team of a Small Size League robot and shows the potential of further research.

Kurzfassung

Diese Arbeit behandelt die Mechanik eines autonomen Fußballroboters der "RoboCup Small Size Soccer League". Beschrieben wird die Konstruktion selbst sowie der gesamte Prozess vom Lastenheft, über die Konstruktionsmethode bis hin zu den Erkenntnissen aus Versuchen und dem Betrieb. Dabei werden die wichtigen Kriterien und Probleme jeder Komponente betrachtet und Lösungsansätze präsentiert.

Zusätzlich werden zwei Komponenten herausgegriffen und genauer betrachtet, das omnidirektionale Fahrwerk und der Kicker. Die Eigenschaften eines omnidirektionalen Fahrwerks wurden dabei mit Hilfe einer Simulation ermittelt und mit Daten aus praktischen Versuchen ergänzt und verifiziert. Dadurch erhält man ein gutes Bild über den Einfluss verschiedenster Parameter auf die Leistungsfähigkeit eines Small Size League Roboters. Der Kicker wurde durch Versuche geometrisch optimiert und der Einfluss einiger Parameter untersucht. Der Ergebnisse dieser beiden Einzeluntersuchungen wurden auch im Kontext des gesamten Roboters diskutiert.

In Summe kann diese Arbeit dem Entwicklungsteam eines Small Size League Roboters als Anleitung dienen und zeigt das Potential weiterführender Forschung auf.

Danksagung

Ohne Unterstützung wäre es mir nicht möglich gewesen, mich über zwei Jahre diesem interdisziplinären Thema zu widmen und als Dokumentation diese Arbeit zu verfassen. Deshalb bedanke ich mich sehr herzlich bei folgenden Personen und Teams:

Meinen Eltern, Stefan und Dagmar Lueglinger, die mir das Studium überhaupt erst ermöglicht haben und mich zu jedem Zeitpunkt unterstützt haben.

O.Univ.-Prof. Dipl. Ing. Dr.techn. Gunter Jürgens für die Begutachtung der Diplomarbeit.

Ass.-Prof. Dipl. Ing. Dr.techn. Michael Bader für die Betreuung der Diplomarbeit und für die Unterstützung unseres Teams.

Manfred Wilding für die Hilfe bei der mechanischen Fertigung vieler Teile für die Roboter.

Allen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des Instituts für Maschinenelemente und des Instituts für Leichtbau für die vielen kleinen Hilfestellungen, die freundliche Aufnahme in das Institut und das angenehme Arbeitsklima.

Allen Mitgliedern unseres Teams, den Austrian Cubes, die mich bei der mechanischen Fertigung unterstützt haben sowie für das Feedback zu den Robotern im Betrieb.

Dem TU Graz Racing Team für die Nutzung ihres Equipments für die CFK-Fertigung.

Elisabeth Lueglinger und Gerlinde Kier für das stundenlange Korrekturlesen meiner Diplomarbeit.

Den Sponsoren unseres Teams, ohne die die Roboter nie gefertigt werden hätten können, und die somit die vielen Erfahrungen und Erkenntnisse aus dem Bau und dem Betrieb der Roboter ermöglicht haben.

Eidesstattliche Erklärung / statutory declaration

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen bzw. Hilfsmittel nicht benutzt und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommene Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

I declare that I have authored this thesis independently, that I have not used other than the declared sources / resources and that I have explicitly marked all material which has been quoted either literally or by content from the used sources.

Graz, am 24.07.2010

.....

Unterschrift /signature

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis.....	1	2.6.1 Die Fertigung.....	39
Abkürzungsverzeichnis.....	2	2.6.2 Die Montage.....	39
1 Einleitung.....	3	2.6.3 Der Betrieb.....	40
1.1 Ausgangslage.....	5	2.7 Ergebnis und weiterführende Ideen.....	41
1.2 Lastenheft und Ziele.....	5	3 Das Fahrwerk.....	43
1.3 Vorgehensweise.....	6	3.1 Lastenheft.....	43
2 Die Konstruktion.....	7	3.2 Theoretische Basis.....	44
2.1 Die Komponenten.....	8	3.2.1 Die Reibung.....	44
2.1.1 Das Fahrwerk.....	8	3.2.2 Der Schwerpunkt.....	45
2.1.2 Der Kicker.....	8	3.2.3 Das Omniwheel.....	45
2.1.3 Der Dribbler.....	9	3.2.4 Das Querrad des Omniwheels.....	45
2.1.4 Die Elektronik.....	9	3.3 Das Modell des Fahrwerks.....	46
2.1.5 Der Rahmen.....	10	3.3.1 Betrachtung der Modellannahmen...	47
2.2 Die Methode.....	10	3.4 Berechnung und Simulation.....	48
2.2.1 Checkliste.....	13	3.4.1 Das Simulationsprogramm.....	49
2.3 Stand der Technik.....	15	3.4.2 Simulation über den Einfluss der Roboter­masse.....	52
2.3.1 Fahrwerk.....	15	3.4.3 Simulationen über den Einfluss der Schwer­punkthöhe.....	55
2.3.2 Kicker.....	16	3.4.4 Simulation über den Einfluss der Schwer­punktlage.....	59
2.3.3 Dribbler.....	17	3.4.5 Das Beschleunigungsprofil diverser Räder.....	61
2.3.4 Rahmen.....	17	3.4.6 Simulationen zum Öffnungswinkel...	62
2.4 Konzept- und Komponentenwahl.....	17	3.4.7 Simulationen zum Grip.....	63
2.4.1 Der Antriebsmotor.....	18	3.4.8 Zusammenfassung der Simulationsergebnisse.....	66
2.4.2 Der Kicker.....	21	3.5 Versuche zur Radreibung.....	67
2.4.3 Die Dribblereinheit.....	24	3.5.1 Die Anforderungen an den Prüfstand	67
2.4.4 Weitere Komponenten im Überblick...	27	3.5.2 Der Prüfstand.....	68
2.4.5 Werkstoffwahl.....	28	3.5.3 Die Messung allgemein.....	69
2.5 Konstruktive Ausführung.....	29	3.5.4 Messung Rad "1".....	70
2.5.1 Das Fahrwerk.....	29	3.5.5 Messung und Vergleich aller Prüflinge	74
2.5.2 Der Kicker.....	32		
2.5.3 Die Dribblereinheit.....	33		
2.5.4 Der Rahmen.....	35		
2.5.5 Die Außenhaut.....	37		
2.6 Erkenntnisse aus dem Betrieb.....	38		

Inhaltsverzeichnis

3.5.6 Auswertung zur Richtungsabhängigkeit des Grips.....	77	4.5.3 Der Einfluss des Kicker-Ball-Abstandes	92
3.5.7 Messung der Kraftspitzen.....	77	4.5.4 Die Ballenenergie in Abhängigkeit des Winkels.....	94
3.5.8 Zusammenfassung der Versuche.....	78	4.6 Zusammenfassung der Kicker-Versuche	95
3.6 Das Ergebnis.....	79	5 Resümee.....	97
4 Der Kicker.....	80	5.1 Die Organisation.....	97
4.1 Lastenheft.....	80	5.1.1 Das Team und die Aufgaben.....	97
4.2 Theorie.....	81	5.1.2 Die Fertigung.....	98
4.2.1 Der Stoß.....	81	5.2 Zusammenfassung.....	99
4.2.2 Die Masse des Kickers.....	82	5.2.1 Die Erfüllung der Ziele.....	99
4.2.3 Der Hub des Elektromagneten.....	83	5.2.2 Ausblick.....	100
4.3 Versuchsaufbau.....	83	Verzeichnisse.....	101
4.4 Versuche zum H-Kicker.....	86	Abbildungsverzeichnis.....	101
4.5 Versuche zum C-Kicker.....	89	Tabellenverzeichnis.....	105
4.5.1 Die Flugparabeln.....	89	Quellenverzeichnis.....	105
4.5.2 Der Einfluss der Höhe.....	91	Anhang.....	107

Kontaktaufnahme:
Christoph Lueginger
christoph82@gmx.at

Abkürzungsverzeichnis

C-Kicker....Chipkicker, Kicker für hohen Schuss
CFK.....kohlenstofffaserverstärkter Kunststoff
H-Kicker...Kicker für horizontalen Schuss
SSL.....Small Size League

1 Einleitung

Im Jahr 2050 sollen Roboter in der Lage sein, den amtierenden Fußballweltmeister zu besiegen. So lautet das generelle Ziel im RoboCup, der 1997 seine erste Weltmeisterschaft im Roboterfußball ausgetragen hat. [Robocup Federation 2010] Es war auch das Jahr, in dem zum ersten mal künstliche Intelligenz einen Menschen besiegt hat: Deep Blue schlug den amtierenden Schachweltmeister Garri Kasparow in einem ganzen Wettkampf [Campell 2001].



Abbildung 1.1: Robocup Logo [Robocup Federation 2010]

Das Ziel im RoboCup ist, an künstlicher Intelligenz und Robotik zu forschen. Eine Klasse im RoboCup ist die "Small Size League" (SSL). Nach den üblichen Fußballregeln (Ausnahmen siehe Reglement 2009) treten zwei Mannschaften mit je fünf Robotern gegeneinander an. Die Roboter werden dabei von einem Rechner gesteuert, der sich am Spielfeldrand befindet. Die eigenen und gegnerischen Roboter sowie der Ball werden mit Kameras über dem Spielfeld erfasst und mittels Bilderkennung (engl. Vision) werden die Positionen errechnet. Die künstliche Intelligenz "überlegt" nun den nächsten Spielzug, zum Beispiel einen Gegner decken, zum Ball fahren, ein Tor schießen, usw. und schickt die entsprechenden Befehle per Funk an die Roboter am Spielfeld. Die Robotermannschaft agiert somit völlig autonom, kein Mensch (mit Ausnahme des Schiedsrichters) darf während des Spieles eingreifen. Das Spielfeld ist 4x6 m groß, gespielt wird mit einem orangen Golfball. [Reglement 2009, S.2ff]

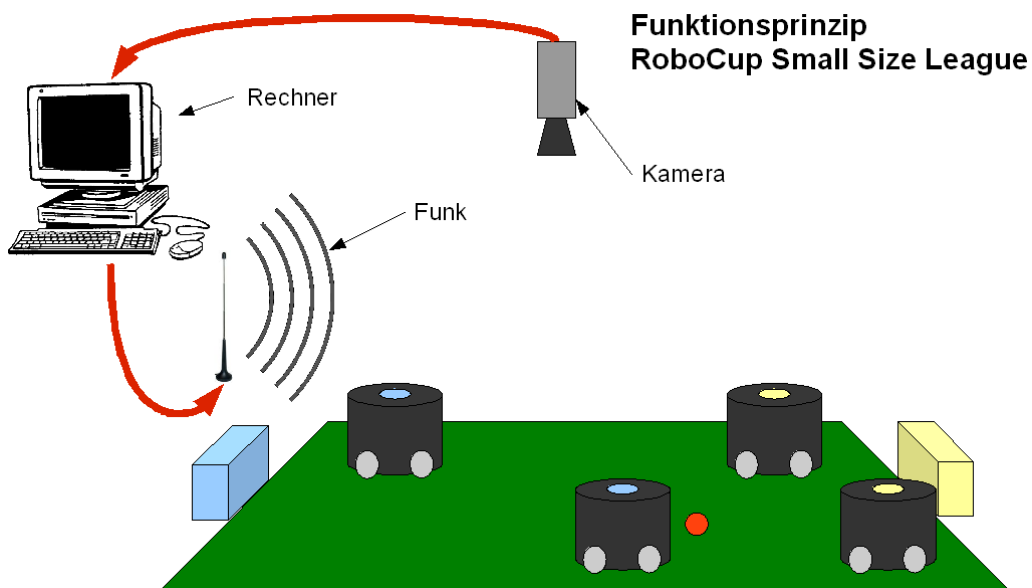


Abbildung 1.2: Funktionsprinzip der Small Size League

1 Einleitung

In anderen RoboCup-Ligen ist das Vision-System (engl.) direkt am Roboter angebracht und nicht wie in der SSL über dem Spielfeld, wodurch ein solcher Roboter die Rechenleistung für die Bilderkennung und die künstliche Intelligenz selbst mitführen muss. Das macht ihn in Relation schwerer als einen Small Size Roboter und führt dazu, dass – subjektiv betrachtet – diese Ligen eher langsam wirken, während in der SSL durch die zentrale Steuerung schon jetzt die Zuseher mit einem flotten Fußballspiel begeistert werden.

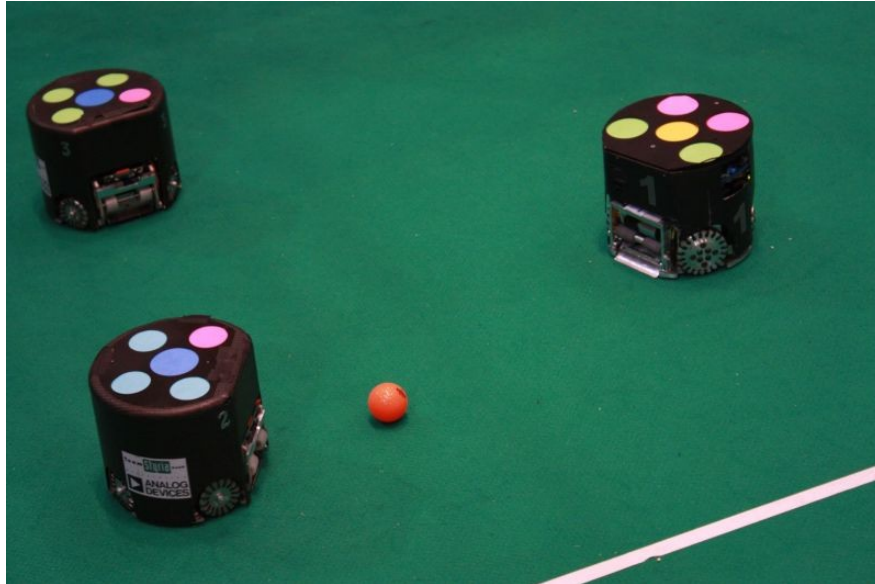


Abbildung 1.3: Spielsituation in der Small Size League [Austrian Cubes 2009]

Mit dem Ziel, an der RoboCup Weltmeisterschaft 2009 in Graz erfolgreich teilnehmen zu können, entstanden 2008 aus den "Vienna Cubes", einem RoboCup SSL Team aus Wien, die "Austrian Cubes".



Abbildung 1.4: Logo der Austrian Cubes www.austriancubes.at

Es handelt sich um eine Kooperation von Studierenden der FH Technikum Wien und der TU Graz. An der TU Graz sollte eine neue Hardware entwickelt werden, während in Wien die künstliche Intelligenz weiterentwickelt wurde. Die Hardware – also der Roboter – wurde zunächst in zwei große Bereiche geteilt, die Mechanik und die Elektronik. Die mechanische Neuentwicklung des Small Size Roboters der Austrian Cubes ist nun Thema dieser Diplomarbeit.

Nach einer Beschreibung der Ausgangslage und der Ziele werden in einem ersten Teil die Konstruktion als solches sowie die Erkenntnisse aus dem praktischen Betrieb beschrieben. Danach werden einzelne Komponenten wie das Fahrwerk und der Kicker herausgegriffen und genauer behandelt. Dann folgt noch eine Übersicht über das Vorgehen in der Fertigung und der Organisation sowie ein abschließendes Resumee.

1.1 Ausgangslage

Als Basis für die mechanische Neuentwicklung eines Small Size Roboters stand zunächst der alte Roboter der Vienna Cubes zur Verfügung. Gemeinsam mit einem ehemaligen Teammitglied der Vienna Cubes wurden die Schwachstellen des Roboters und Verbesserungsmöglichkeiten besprochen. Aktuelle Entwicklungen in der Liga konnten nicht berücksichtigt werden, da die Vienna Cubes zum damaligen Zeitpunkt seit einem Jahr an keinem Wettbewerb mehr teilgenommen haben. Dafür standen – wie es im RoboCup üblich ist – von den anderen Teams kurze Beschreibungen ihrer Roboter und ihrer aktuell eingesetzter Technologien im Internet zur Verfügung.

Daraus konnte man zwar schon grobe Ziele ableiten (siehe Kapitel 1.2), Detaillösungen der einzelnen Komponenten standen aber nicht zur Verfügung und mussten somit entwickelt werden.

1.2 Lastenheft und Ziele

Das Lastenheft ist an dieser Stelle sehr allgemein gehalten, da die genaue Definition von Leistungsdaten zu diesem Zeitpunkt nicht möglich war. Vielmehr definierte das Austrian Cubes Team das Lastenheft in Bezug auf den alten Roboter und Schätzungen erfahrener Teammitglieder über die aktuellen Leistungen, die die Spitzenteams in der SSL erreichen.

Lastenheft für die Mechanik des Roboters:

- Lagerung der Räder einführen (bisher waren die Räder direkt an der Motorwelle befestigt)
- Ballsensorik implementieren (Lageerkennung des Balles vor dem Roboter ermöglichen)
- Räder neu entwickeln
- Ballannahme / Passannahme ermöglichen
- Chipkick (C-Kick) ermöglichen. Als "Chipkick" wird in der SSL die Fähigkeit des Roboters bezeichnet, den Ball auch hoch zu schießen, um einen Gegner überheben zu können oder um flanken zu können.
- Höhenverstellung des Fahrwerks ermöglichen, da der Boden nicht genormt ist und bei den Weltmeisterschaften unterschiedliche Teppichfabrikate zum Einsatz kommen.
- Handling im Betrieb und bei der Reparatur einfach gestalten
- Beschleunigung 6 bis 8 m/s²
- Höchstgeschwindigkeit 3,5 m/s
- Schussgeschwindigkeit 10 m/s (entspricht dem Gentlemen's Agreement zwischen den Teams für die höchste Schussgeschwindigkeit)
- Verwendung von Lithium Polymer Akkus (LiPo) aufgrund des sehr guten Kapazitäts-Gewichtsverhältnisses im Vergleich zu anderen Akku-Typen.
- Verwendung von bürstenlosen Motoren für den Antrieb (Details dazu siehe Kapitel 2.4.1)
- Passgenaue Deckelbefestigung um die Robotererkennung genauer zu machen (in Position und Winkel)

Aus dem Lastenheft wurden nun folgende Ziele abgeleitet:

- Hohe Gesamtperformance, die mindestens der der besten Teams in der Liga entspricht.
- Hohe Zuverlässigkeit und Lebensdauer.
- Einfaches Handling und einfache Wartung, auch für Teammitglieder, die nicht vom Fach sind.

- Erforschung der einzelnen Komponenten für diesen Roboter aber auch für die Zukunft, um ein breites Wissen über das Verhalten der Komponenten zu erlangen.

Weiters ergibt sich, dass aufgrund des begrenzten Budgets die Kosten möglichst niedrig gehalten werden sollten.

1.3 Vorgehensweise

Zu den im vorigen Absatz beschriebenen Zielen kommen nun weitere Faktoren dazu. Zum einen die Zeitvorgabe, damit die neuen Roboter vor der Weltmeisterschaft 2009 in Graz fertig werden. Zum anderen ist natürlich das Budget ein limitierender Faktor.

So ergibt sich, dass die Serien-Roboter im April 2009 fertig sein sollten, um damit bei den "German Open" (eine Art Europäische Meisterschaft im RoboCup) als Generalprobe anzutreten. Bis zur WM im Juli 2009 sollten die Roboter dann fertig getestet und abgestimmt und die künstliche Intelligenz auf die neuen Roboter optimiert sein.

Die Grafik zeigt den daraus resultierenden Zeitplan für das Projekt sowie parallele Prozesse, die für die Erreichung der Ziele erforderlich sind.

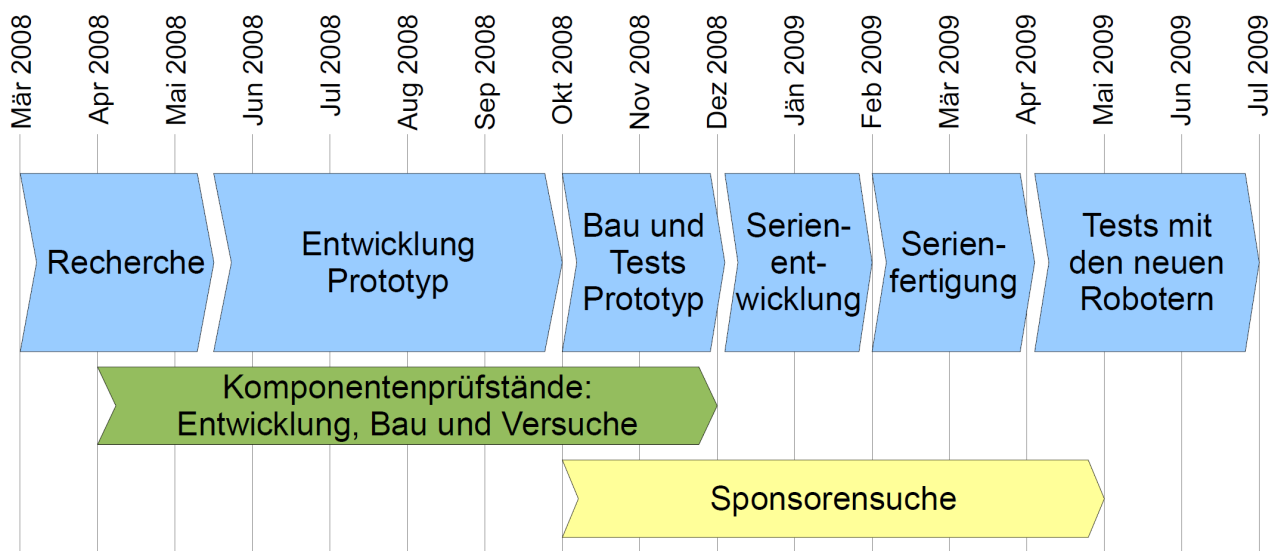


Abbildung 1.5: Zeitplan

Da sich abzeichnete, dass für diese Art Roboter kaum Literatur existiert, sondern nur kurze Dokumentationen und Präsentationen von SSL Teams, wurde den Versuchen und Tests von einzelnen Komponenten großes Gewicht beigemessen. So sollten einzelne Komponenten wie der Kicker oder das Fahrwerk auf einem separaten Prüfstand optimiert werden, sowie Simulationen durchgeführt werden.

Weiters sollten durch ausgiebige Tests des Prototypen möglichst viele Erkenntnisse gewonnen werden, damit der Serienroboter möglichst leistungsfähig und dabei gleichzeitig zuverlässig ist.

Um die Produktion der Roboterserie überhaupt erst zu ermöglichen, war es auch notwendig, Partner aus der Wirtschaft für die Fertigung zu gewinnen, da weder die Universität noch das Team die Kapazität besitzt, eine derartige Menge an Teilen selbst anzufertigen.

2 Die Konstruktion

Im folgenden Kapitel wird die Konstruktion des Small Size Roboters der Austrian Cubes beschrieben. Zunächst wurden weitere Ziele fixiert, die für alle Komponenten gelten, und die über die in Kapitel 1.2 angeführten Ziele hinausgehen im Sinne höherer Leistung und geringerer Kosten.

Unter Fahrleistung des Roboters wird der Teil der Beschleunigung und Geschwindigkeit verstanden, den der Roboter tatsächlich "auf den Teppich" bringt, und nicht etwa die verbaute Motorleistung.

- Leichtbau (Fahrleistung)
- niedriger Gesamtschwerpunkt (Fahrleistung)
- Energieeffizienz (Fahrleistung)
- einfach zu fertigende Bauteile (Kosten)
- möglichst große Toleranzen (Kosten)
- Ansprechendes Design und saubere Verarbeitung (Sponsoring, PR)

Das Koordinatensystem, das für die Konstruktion und die Simulationen nachfolgend immer gültig ist, ist folgendermaßen orientiert:

Die xy-Ebene befindet sich am Boden, die x-Achse ist nach vorne gerichtet. Die z-Achse ist nach oben gerichtet und deckungsgleich mit der Roboter-Hochachse.

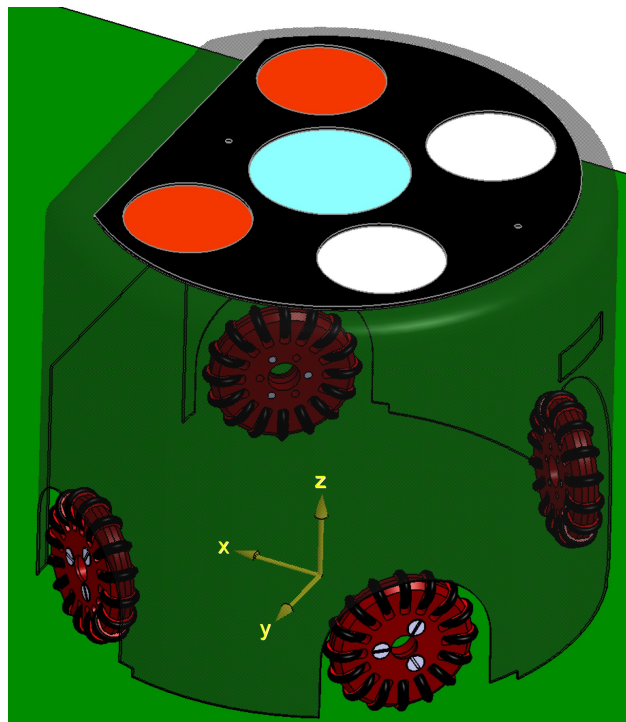


Abbildung 2.1: gewähltes Koordinatensystem

Dieses Kapitel ist folgendermaßen gegliedert: Zuerst werden die Komponenten definiert und voneinander abgegrenzt, dann werden die Konstruktionsmethode beschrieben und der aktuelle Stand der Technik in der SSL. Ein wichtiger Bereich ist die Konzeptwahl, bei der verschiedene Varianten betrachtet und bewertet werden. Schließlich wird die Konstruktion selbst beschrieben.

2.1 Die Komponenten

Zunächst wird die Mechanik des Roboters in einzelne Funktionsblöcke, im Folgenden "Komponenten" genannt, aufgeteilt. Es werden die Abgrenzung zu den anderen Komponenten sowie die Faktoren, die die Konstruktion dieser Komponente beeinflussen, erklärt. Diese Faktoren gliedern sich in die Bereiche Reglement und Zielerreichung.

Dass jede Komponente auch durch den begrenzt vorhandenen Bauraum von jeder anderen Komponente beeinflusst wird, gilt für alle Komponenten und wird nicht extra angeführt. Der Roboter darf eine Höhe von 150 mm und einen Durchmesser von 180 mm zu keinem Zeitpunkt überschreiten [Reglement 2009, S.7ff].

Weiters darf während des Betriebes von keiner Komponente eine Gefahr für den Menschen ausgehen [Reglement 2009, S.7].

Generell ist jede Komponente auch von der Elektronik des Roboters abhängig, da die Elektronikkomponenten ebenfalls die Zielvorgaben erreichen müssen bzw. das Budget nicht überschreiten dürfen.

Folgende Komponenten werden definiert:

- Fahrwerk
- Kicker
- Dribbler
- Elektronik
- Rahmen

2.1.1 Das Fahrwerk

Das Fahrwerk beinhaltet im Wesentlichen die vier Räder mit Getriebe und Elektromotor.

Einflussfaktoren auf die Komponente:

- Reglement: Das Rad darf den Boden nicht beschädigen und keine spitzen Ecken oder scharfe Kanten aufweisen. Es darf kein Klettband zur Steigerung des Grips verwendet werden. [Reglement 2009, S.7ff]
- Die Ziele sind der Einsatz eines bürstenlosen Motors, die Erreichung der Leistungsdaten in Bezug auf Beschleunigung und Geschwindigkeit und möglichst hoher Grip (Details dazu in den Kapiteln 2.3.1 und 2.4.1).

Das Fahrwerk, dessen Parameter und dessen Leistungsdaten werden ausführlich im Kapitel 3 beschrieben.

2.1.2 Der Kicker

Das Kicksystem besteht aus einem Aktor (z.B. Elektromagnet) und einem durch diesen betätigten Balken, der die Kraft auf den Ball überträgt. Um sowohl horizontal Schießen bzw. Passen und als auch einen hohen Schuss abgeben zu können (in der Liga als "Chipkick" bezeichnet), benötigt der Kicker entweder zwei separate, unabhängige Kicksysteme für jede Schussart oder ein System zur Umschaltung zwischen den beiden Schussarten. Ebenfalls zum Kicksystem gehört ein Energiespeicher, da die benötigte Leistung für den Schuss im Allgemeinen nicht direkt aus dem Akku entnommen werden kann und daher zwischengespeichert werden muss (Details dazu in Kapitel 2.3.2).

Die Einflussfaktoren:

- Reglement: Die Beschädigung des Balles ist nicht erlaubt [Reglement 2009, S.21f].
- Ziele: Erreichung der Schussgeschwindigkeit von 10m/s, Haltbarkeit des Kicksystems.

Der horizontale Schuss (H-Kick) und insbesondere der Chipkick (C-Kick) werden ausführlich in Kapitel 4 beschrieben.

2.1.3 Der Dribbler

Als Dribbler wird grundsätzlich nur die Walze vorne am Roboter bezeichnet, die den Ball in Rotation versetzen kann. Aufgrund des engen Zusammenhangs mit Ballannahme und Ballführung wird an dieser Stelle als Dribbler die gesamte Einheit vorne am Roboter bezeichnet, die diese Funktionen ausführen kann. Diese Funktionen sind die Dämpfung für die Ballannahme und Ballführung sowie die Walze mit Elektromotor. Weiters sind in dieser Komponente mehrere Sensoren integriert, die dafür verantwortlich sind, einerseits festzustellen ob der Ball am Dribbler anliegt, was bedeutet, dass Roboter in Ballbesitz ist, und andererseits soll die Lage des Balles vor dem Roboter erkannt werden können, ob der Ball mittig, links oder rechts der Mitte liegt.

Die Einflussfaktoren:

- Reglement: Auf den Ball dürfen nur Kräfte in z-Richtung aufgebracht werden. Weiters dürfen von oben gesehen zu keinem Zeitpunkt mehr als 20 % der projizierten Fläche des Balles (Kreis) durch den Roboter verdeckt sein: "80-20-Regel" [Reglement 2009, S.7ff]. (Anmerkung: In der Folge dieser Regel entstehen Reaktionskräfte in x-Richtung.)

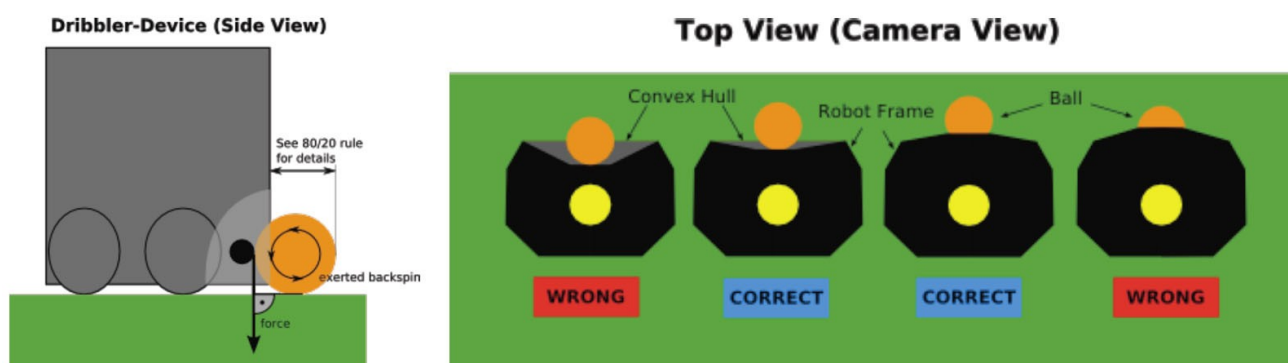


Abbildung 2.2: Dribbler Backspin und 80-20 Regel, [Reglement 2009, S.8 und S.23]

- Ziele: Der Roboter soll möglichst scharfe Pässe annehmen sowie dem Ball einen ausreichend starken Rückwärtsdrall geben können. Durch den Rückwärtsdrall wird der Ball gegen den Roboter gedrückt, was es dem Gegner erschwert, dem eigenen Roboter den Ball wegzunehmen. Zusätzlich wird damit auch ein Rückwärtsfahren des Roboters ermöglicht, da durch den Rückwärtsdrall der Ball dem Roboter nachrollt.

2.1.4 Die Elektronik

Einige Elektronikteile, wie z.B. die Antriebsmotoren, wurden schon bestimmten Komponenten zugeordnet. Alle anderen Elektronikbauteile werden als weitere Komponente mit der Bezeichnung "Elektronik" zusammengefasst. Hierbei handelt es sich um den Akku für die Energieversorgung sowie die Platinen für die Ansteuerung der Elektronikteile. Diese Komponente beinhaltet den Bauraum dieser Teile sowie deren Anbindung an das Chassis.

Die Einflussfaktoren:

- Reglement: keine.
- Ziele: Platzsparende Integration der Teile sowie eine weiche Anbindung an den Rahmen, um die Weitergabe von Stößen und Vibrationen des Roboters an die Elektronikteile zu minimieren (mechanische Tiefpassfilterung).

2.1.5 Der Rahmen

Der Rahmen (Chassis) verbindet alle vorher genannten Komponenten. Weiters wird auch die Außenhaut des Roboters, die die Farbmarkierungen am Deckel für die Vision (engl.) enthält und den Roboter gegen Beschädigung schützen soll, dem Rahmen zugerechnet.

Einflussfaktoren:

- Reglement: Einhaltung des maximal erlaubten Raumes (Zylinder: 180 mm im Durchmesser und 150 mm hoch).
- Ziele: Möglichst einfache Teile, kraftflussgerechte Ausführung, stabile und exakt montierbare Außenhaut.

2.2 Die Methode

Bevor die eigentliche Konstruktionsphase begann, wurde nach einer geeigneten Methode gesucht, die den Konstruktionsprozess strukturiert und die Zielerfüllung vereinfacht.

Zunächst wurde im Team beschlossen, einen Prototypen zu bauen und zu testen, und danach erst mit der Serienentwicklung zu beginnen. Dadurch dass die Funktion vieler Bauteile im Vorfeld nicht theoretisch beschreibbar ist, ist diese zusätzliche Iteration notwendig.

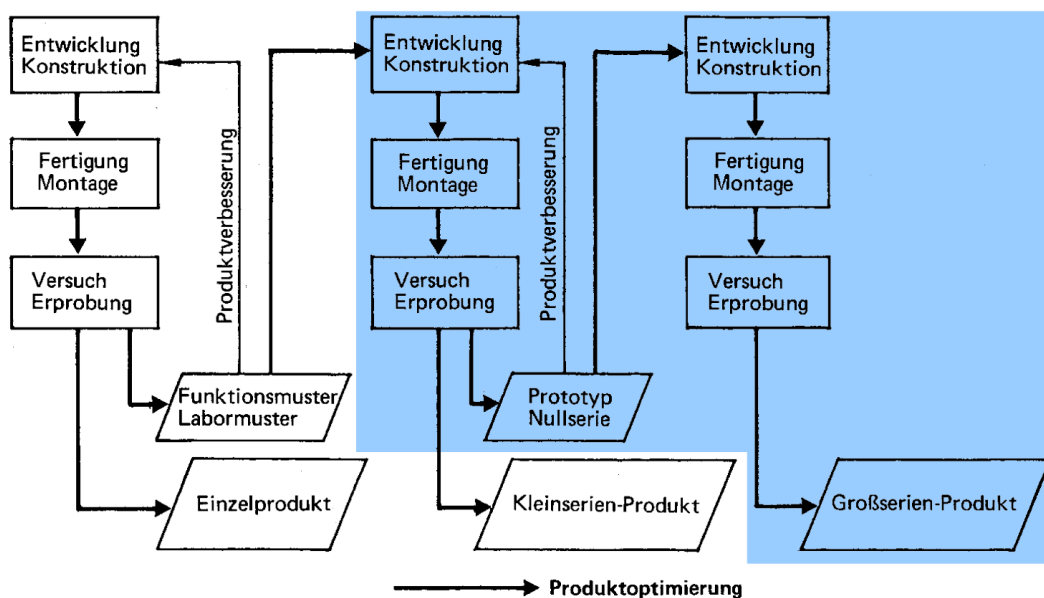


Abbildung 2.3: Phasen der Produktentstehung [VDI 2221, S.8]

Von einer Serie kann in diesem Fall insofern gesprochen werden, als dass zwölf Roboter gefertigt werden sollten. Das Ziel der Austrian Cubes war es, zwei Roboter-Mannschaften zu fertigen. Zusätzlich sollte für jede Mannschaft noch ein "Reservespieler" zur Verfügung stehen, da ein Roboter aufgrund gegnerischer Fouls, Kollisionen oder sonstiger Defekte in einem Spiel oftmals kurzfristig ausgetauscht werden muss.

Als Methode wurde der in der Abbildung 2.3 farblich unterlegte Teil aus der VDI 2221 "Schrittweises Entwickeln eines Serienproduktes" gewählt.

Als nächstes wurde eine Methode für den Entwicklungsprozess des Prototypen wie auch der Serie gesucht. Dazu wurde das in der VDI 2221 beschriebene "Generelle Vorgehen beim Entwickeln und Konstruieren" verwendet (siehe Abb. 2.4).

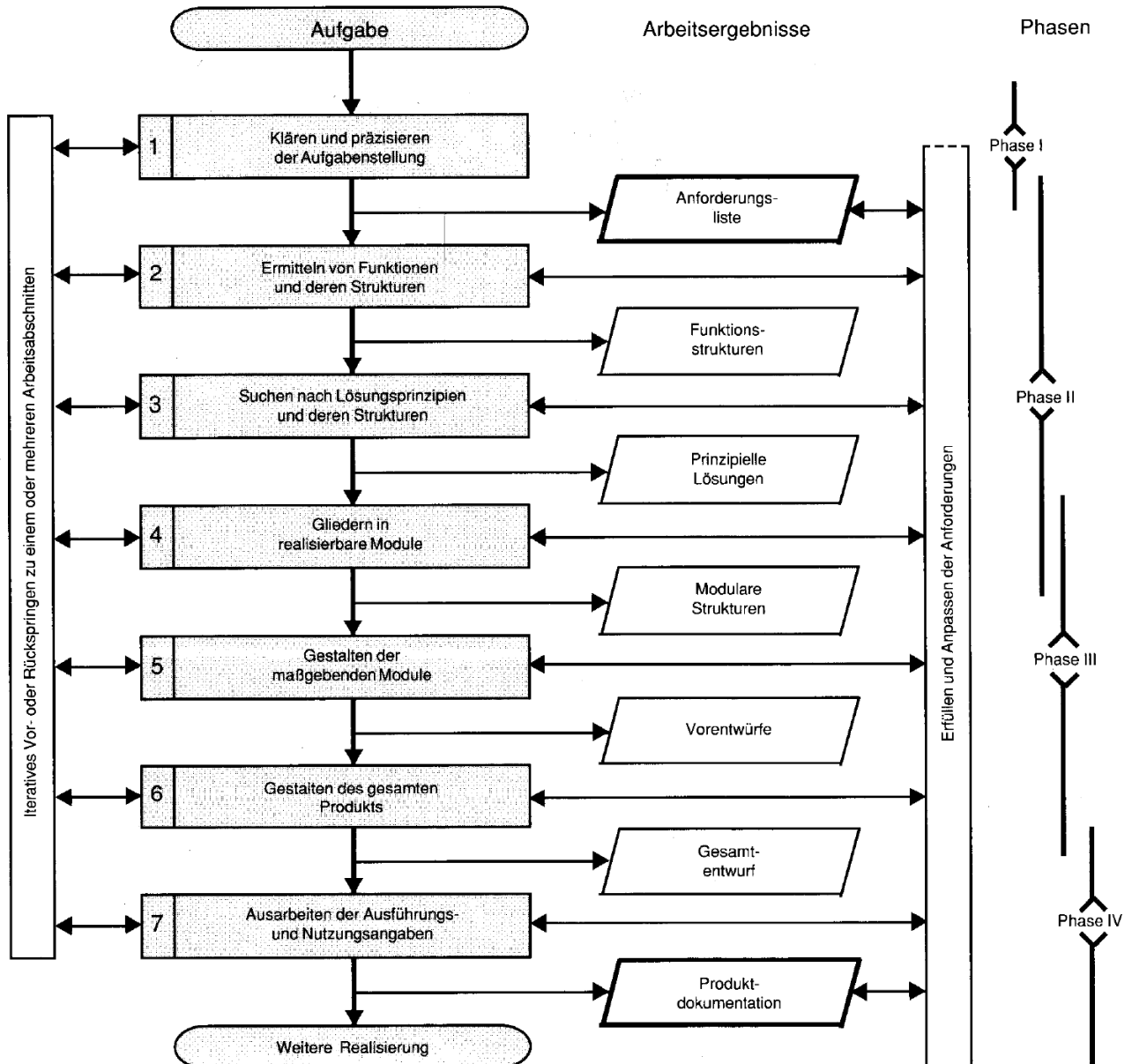


Abbildung 2.4: Generelles Vorgehen beim Entwickeln und Konstruieren [VDI 2221, S.9]

Die Punkte 1 bis 4 wurden schon abgehandelt, die Punkte 5 bis folgen im Anschluss.

- (1) Aufgabenstellung und (2) Funktionen entspricht Kapitel 1.2 (Lastenheft)
- (3) Lösungsprinzipien und (4) Gliederung entspricht Kapitel 2.1 (Komponenten).
- (5) Gestaltung maßgebender Module entspricht Kapitel 2.4 (Konzeptwahl)
- (6) Gestaltung des gesamten Produkts entspricht Kapitel 2.5 (Konstruktive Ausführung)

Punkt 7 entspricht der Erstellung von Werkstattzeichnungen und der Dokumentation. Die Dokumentation ist Kapitel 2 dieser Diplomarbeit.

Die Methode aus Abb. 2.4 wurde nun in weitere Teilschritte zerlegt und folgender Prozess für die Entwicklung des Prototypen definiert und angewendet (siehe Abb. 2.5).

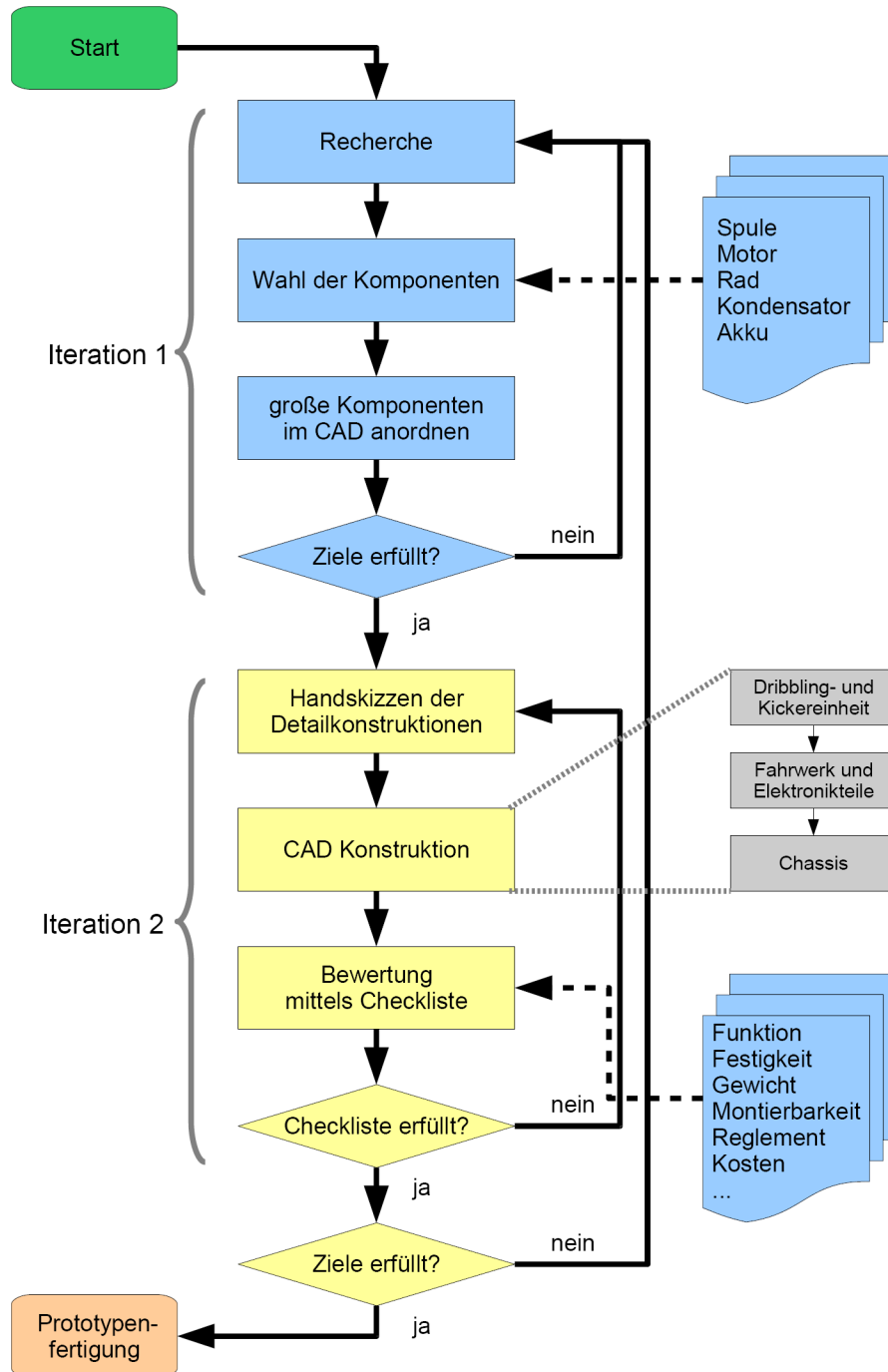


Abbildung 2.5: Entwicklung Prototyp

Die erste Schleife (Iteration 1) entspricht Punkt 5 aus Abbildung 2.4. Da der Raum begrenzt ist, sollen zunächst nur die großen Komponenten gezeichnet und verschiedenste Anordnungen ausprobiert werden. Gemeinsam mit der Elektronikentwicklung werden dann entweder andere Komponenten ausgewählt oder die Anordnung überarbeitet, bis die Ziele erfüllt sind.

Die zweite Schleife (Iteration 2) stellt die Konstruktion der Detaillösung nach Punkt 6 aus Abbildung 2.4 dar, wobei auch während der CAD-Konstruktion zunächst die Komponenten konstruiert und fixiert werden sollen, die das Reglement stark betreffen und / oder die größten und schwersten Teile enthalten (Teile mit hoher Priorität). Der Rahmen hat die geringste Priorität und wird zum Schluss konstruiert und verbindet alle Komponenten.

2.2.1 Checkliste

Die einzelnen Teile bzw. Baugruppen wurden anschließend nach folgender Checkliste geprüft. Die Checkliste stellt eine Zusammenstellung möglicher Parameter dar, die für ein Teil / eine Baugruppe von Bedeutung sein können, aber nicht müssen. So ist es zum Beispiel für das Getriebe entscheidend, Festigkeit und Verschleiß zu berechnen, während hingegen das Reglement oder auch elektrische Eigenschaften keine Rolle spielen. Umgekehrt muss zum Beispiel das Chassis gegen das Reglement gecheckt werden und auch die elektrischen Eigenschaften sind im Hinblick auf die Funkverbindung und die elektromagnetische Verträglichkeit wichtig.

Reglement

- 80-20-Regel
- Abmessungen
- Kickgeschwindigkeit

Funktion

- Funktion erfüllt
- Steifigkeit
- Festigkeit
- Härte
- Verschleiß
- Lebensdauer
- Gewicht
- Schwerpunkt
- Trägheit
- Temperaturbeständigkeit
- Temperatur bestimmter Elemente (Akku, Flüssigkeiten)
- Wärmeübergänge
- Schmierung
- elektrische Leitfähigkeit
- magnetische Eigenschaften
- Schmutzbelastung
- keine Kollision mit anderen Teilen
- bei bewegtem Teil: keine Kollision über den gesamten Bereich
- Volumen und Masse hinsichtlich Transport

Fertigung

- Fertigbarkeit
- Kosten
- Fertigungsfirmen
- Toleranzen und Passungen
- Zeichnung vorhanden und normgerecht

Montage, Wartbarkeit

- Montierbarkeit
- möglichst einheitliche Schrauben(-köpfe)
- Zugänglichkeit mit Werkzeug

Sonstiges

- Vergleich mit anderen Lösungen, Verbesserung gegenüber Vorjahr/Standardlösung?
- Design
- CAD-Modell fehlerfrei (z.B. Baugruppe korrekt, Freiheitsgrade, Aktualität)

Abschließend wurde geprüft, ob die Ziele eingehalten wurden. Hauptsächlich mit Hilfe von Berechnungen und teilweise mit Hilfe von Versuchen. Ist alles erfüllt, starten die Fertigung des Prototypen und dessen Tests. Dabei werden zunächst die einzelnen Komponenten für sich getestet, zum Beispiel nur der Kicker oder nur das Fahrwerk. Erst danach wird der Roboter als Paket getestet und die Ergebnisse fließen in die Serienentwicklung ein.

Die Serienentwicklung folgt dann dem Prinzip der Prototypenentwicklung (siehe Abb. 2.6), wobei natürlich auf den Erkenntnissen aus der Prototypenentwicklung aufgebaut werden kann und dieser Ablauf daher auch kürzere Zeit in Anspruch nehmen soll.

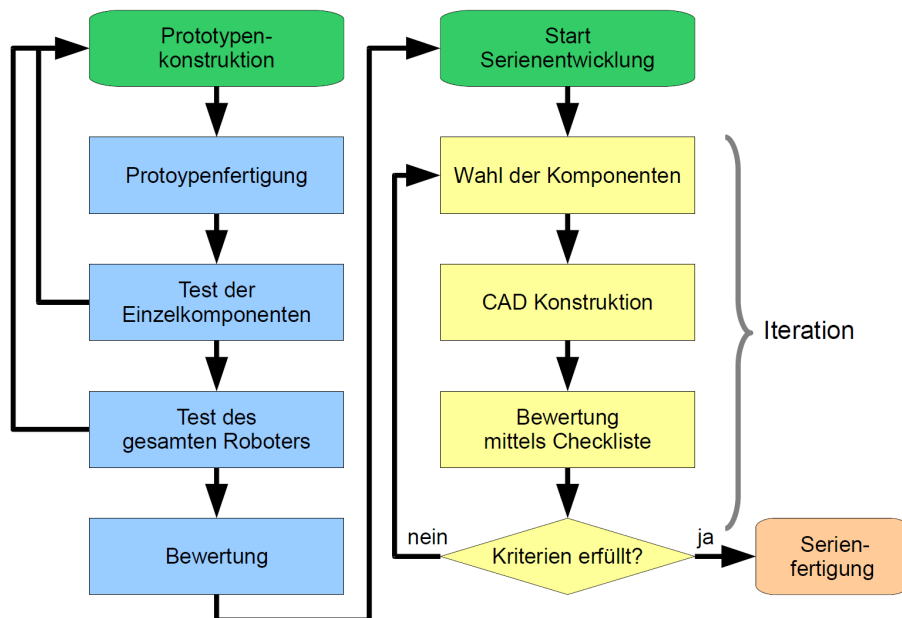


Abbildung 2.6: Serienentwicklung

2.3 Stand der Technik

Im Folgenden wird nun beschrieben, was Stand der Technik in der SSL ist bzw. wie die Topteams in der Liga bestimmte Komponenten gebaut haben.

2.3.1 Fahrwerk

Da die Beweglichkeit des Roboters am Spielfeld ein entscheidender Erfolgsfaktor ist, führt kein Weg an einem omnidirektionalen Fahrwerk vorbei. Das klassische Omniwheel ist das sogenannte "Mecanum-Wheel", benannt nach der schwedischen Firma "Mecanum", in der der Ingenieur Bengt Ilon das Rad 1973 erfunden hat [Jonsson 1987]. Es wird heute bei Hubstaplern, Hebebühnen und aber auch in der RoboCup Middle Size League eingesetzt.

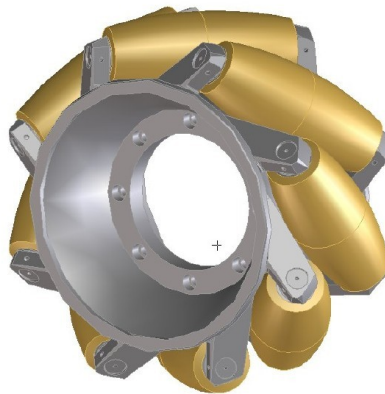


Abbildung 2.7: Mecanum Rad [MIAG 2010]

Aufgrund der Tatsache, dass Spiele in der SSL auf einem Teppich ausgetragen werden und Vibrationen im Roboter kein Problem darstellen, wird eine Abwandlung verwendet, die im 90° Winkel zum Hauptrad viele kleine Querräder besitzt. Dadurch wird Formschluss zwischen dem Rad und dem Teppich erreicht und in der Folge mehr Grip, allerdings nur, wenn der Roboter nicht zu schwer ist (siehe Kapitel 3). Da sich im Gegensatz zur "Middle Size League" keine Kamera am Roboter befindet, stören die entstehenden Vibrationen nicht. Als Ausgangspunkt der Konstruktion dienen das alte Rad der Vienna Cubes sowie die Versuche des Teams der Universität Cornell. Diese ergaben im Wesentlichen, dass schmalere und härtere Querräder mehr Grip erzeugen, da sie in den weichen Teppich eindringen, die Grenze aber dort zu ziehen ist, wo der Boden beschädigt wird, was gegen das Reglement verstößt [Cornell 2003, S.30ff und S.48ff].

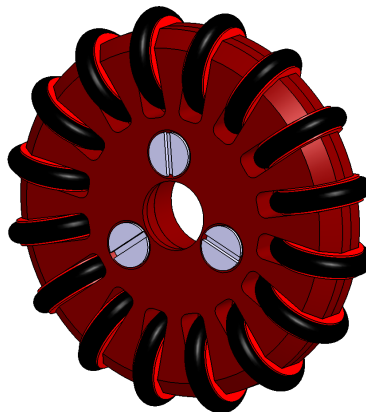


Abbildung 2.8: Omniwheel der Austrian Cubes

Trotz schwierigerer Regelung, statischer Unbestimmtheit und höherer Kosten, werden im Allgemeinen in der SSL vier anstatt drei Omniwheels eingesetzt. Der Grund dafür ist, dass damit effektiv eine wesentlich höhere Beschleunigung erreicht werden kann [Cornell 2003, S.48ff]. Auch ist das Beschleunigungsprofil bei vier Rädern gleichmäßiger, das heißt, dass man bei vier Omniwheels in alle Richtungen etwa gleich schnell beschleunigen kann, während es bei drei Rädern Richtungen gibt, die sehr hohe Beschleunigungen ermöglichen, andere wiederum nur sehr niedrige (siehe Abb. 2.9).

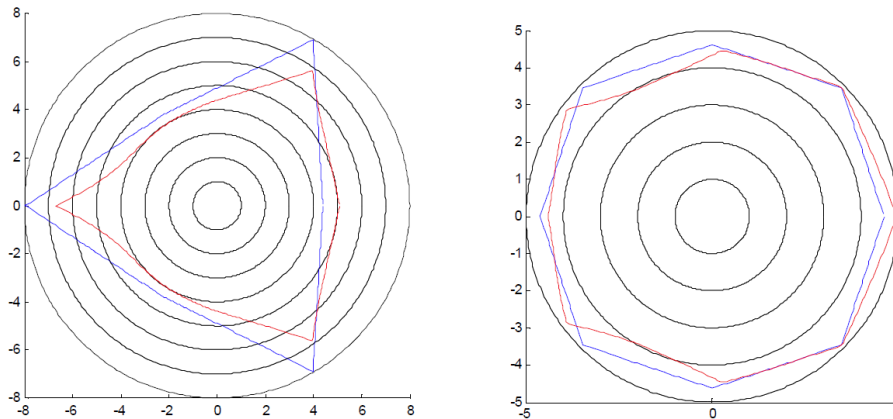


Abbildung 2.9: Beschleunigungsprofil für drei bzw. vier Omniwheels (jeweils bei verschiedenen Öffnungswinkeln), [Cornell 2003, S.49]

Ein weiterer Punkt ist die Leichtgängigkeit der Querräder des Omniwheels. Es kann der Fall eintreten, dass bei kleinen Winkeln zwischen der Bewegungsrichtung und der Radebene die Querräder sich nicht frei drehen und somit das Rad die Aufgabe des Omniwheels nicht mehr erfüllt [Cornell 2003, S.30].

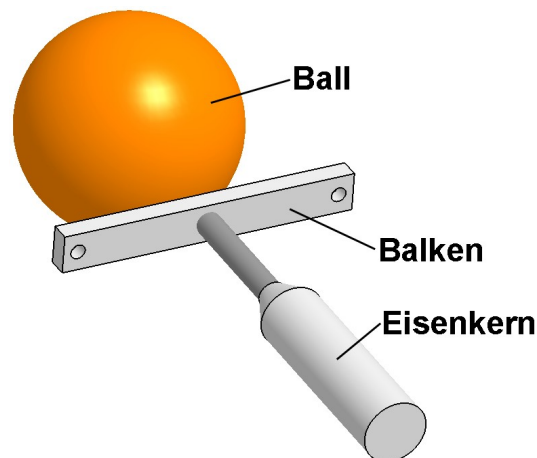


Abbildung 2.10: Das Kickerprinzip

2.3.2 Kicker

Um nur ein Energiespeichersystem am Roboter zu haben, verwenden alle Teams Elektromagnete als Aktor für den Kicker. Da der Akku die nötige Leistung für den Kickvorgang nicht liefern kann, wird die dafür benötigte Energie zunächst in Kondensatoren zwischengespeichert und beim Kicken abgerufen. Weiters verwenden fast alle Teams ein eigenes System für jede Kickart. Also ein System für den horizontalen Schuss und eines für den C-Kick. Man könnte auch ein Kicksystem entwickeln mit einer Umschaltung zwischen flachem und hohem Schuss. Aufgrund der hohen Kräfte beim

Kicken, müsste dann die Mechanik für die Umschaltung sehr massiv ausgelegt werden. Da aber ein leichter Kicker höhere Geschwindigkeiten ermöglicht und wesentlich effizienter ist [Cornell 2003, S.106], scheidet somit ein schwerer Kicker, der beide Schussarten vereint, aus.

Zunächst ist es natürlich wichtig, möglichst genau schießen zu können. Dafür ist eine spielarme Linearführung des Kickers, bzw. des Eisenkerns in der Spule, sowie ein ausreichend steifer Balken entscheidend (siehe Abb. 2.10) [Cornell 2003, S.105f].

Da zu diesem Zeitpunkt noch nichts Konkretes bezüglich C-Kick veröffentlicht war, und auch die Austrian Cubes keine Erfahrung damit hatten, wurden die Konstruktionsentscheidungen aus den Versuchen (beschrieben in Kapitel 4 "Der Kicker") abgeleitet.

2.3.3 Dribbler

Einige Teams setzen seit Kurzem eine Schwinge an der Roboterfront ein, welche die Dribblerwalze enthält, und die Energie eines auftreffenden Balles absorbieren kann. Damit wird dem Roboter ermöglicht einen scharfen Pass anzunehmen. Ein derartiges System soll ebenfalls gebaut und das Dämpfungselement in Versuchen optimiert werden. Als Ziel für die Passgeschwindigkeit, bei der der Ball gerade noch angenommen werden kann, wurden hier 4 m/s gesetzt, da dieser Wert von Cornell [2003, S.98] erreicht und sogar übertroffen wurde.

Ein sehr entscheidendes Element ist die Dribblerwalze. Sie ermöglicht es, den Ball in Rotation zu versetzen, was zwei Effekte hat: Zum einen kann der Roboter rückwärts fahren und der Ball folgt durch die Rotation dem Roboter. Zum anderen reduziert sich die Gefahr eines Ballverlustes, wenn der Roboter den Ball mit hoher Geschwindigkeit über das Spielfeld führt, da der Ball quasi gegen den Roboter gedrückt wird. Gebräuchliche Materialien für die Dribblerwalze sind Silikon und Moosgummi, da diese einen hohen Reibwert gegenüber einem Golfball aufweisen und durch ihren geringen E-Modul zusätzlich eine federnde Wirkung haben.

2.3.4 Rahmen

Als Material für den Rahmen verwendet jedes Team Aluminium. Die Gründe dafür sind einerseits das Gewicht und die einfache Fertigung. Andererseits hat Aluminium aufgrund der geringen relativen Permeabilität im Vergleich zu Stahl [Weißgerber 2007a, S.226 und S.237] keinen (negativen) Einfluss auf die Elektromagnete, die für das Kicken verwendet werden.

2.4 Konzept- und Komponentenwahl

Im Folgenden wird der Weg vom Lastenheft über verschiedene Konzepte, deren Vor- und Nachteile, bis hin zur Entscheidung für die Ausführung im Serienroboter beschrieben.

Generell wurde bei der Konstruktion immer gemäß Abbildung 2.5 vorgegangen. Das heißt, dass zuerst einige Varianten der großen Komponenten, wie Motoren oder Kondensatoren gemeinsam mit dem Elektronikmodul der Austrian Cubes ausgewählt wurden, und dann – vom Groben zum Detail – die Teile um diese Komponenten herum konstruiert wurden. Nur wenn dann die Konstruktion an sich möglich war, wurde diese Komponente als Variante vorgemerkt und danach untersucht, welche der dann noch zur Auswahl stehenden Komponenten am besten in das Konzept passen.

Folgende (Teil-)Komponenten werden im Folgenden behandelt:

- Der Antriebsmotor mit Getriebe als Teil des Fahrwerks
- Mögliche Kickergeometrien
- Die Dribblereinheit (Walze, Dämpfung und Getriebe)

2.4.1 Der Antriebsmotor

Da ein bürstenloser Motor sowohl eine höhere Lebensdauer als auch einen höheren Wirkungsgrad besitzt und auch leichter ist [Schröder 2009, S.396ff], wurde diese Antriebsart bereits im Lastenheft gewählt und fixiert. Bei dem sogenannten "bürstenlosen Motor" handelt es sich eigentlich um einen permanenterregten Synchronmotor [Busch 2008, S.283].

Als erste Variante wird der Hacker A20-50S gewählt, da er bei kleiner Baugröße und geringem Gewicht ausreichend Leistung verspricht. Dieser Motor wurde auch im Roboter-Prototyp verbaut. Als zweite Variante wird der Maxon EC45flat betrachtet, da er in der Liga stark verbreitet ist. Dieser Motor wurde dann im Serienroboter verbaut (siehe Kapitel MA 2.4.1.2).


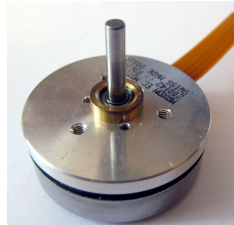
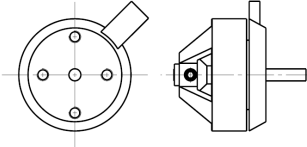
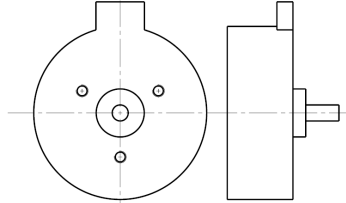
	Hacker A20-50S	Maxon EC45flat
Foto	 <p>Abbildung 2.11: Hacker A20-50S</p>	 <p>Abbildung 2.12: Maxon EC45flat</p>
CAD-Skizze (beide im gleichen Maßstab)	 <p>Abbildung 2.13: Hacker A20-50S CAD Skizze</p>	 <p>Abbildung 2.14: Maxon EC45flat CAD Skizze</p>
Bauraum (Durchmesser mal Länge bzw. Volumen)	28 x 23 mm 14 cm ³	43 x 20 mm 30 cm ³
Masse m	29 g	88 g
Nennleistung P	70 W	30 W
Drehmomentkonstante k _m	8,68 mNm/A	25,5 mNm/A

Tabelle 2.1: Vergleich der Antriebsmotorvarianten

2.4.1.1 Leistungs- und Getrieberechnung

Zunächst wurde die Leistung bestimmt, die erforderlich ist, um die Zielvorgaben hinsichtlich Geschwindigkeit und Beschleunigung zu erfüllen. Als Beschleunigungsrichtung wurden 45° zur x-Richtung angenommen, da hier aufgrund der Konfiguration des Fahrwerks nur 2 Motoren "im Eingriff" sind (die anderen beiden Räder stehen 90° zur Fahrtrichtung und können somit keinen Beitrag leisten, siehe Abb. 2.16). Als kritische Geschwindigkeitsrichtung wurde die x-Richtung gewählt, da hier nur 70 % der Geschwindigkeit gegenüber der 45° Richtung möglich sind (siehe orange Pfeile in Abb. 2.16 sowie Verlauf in Abb. 2.15). Im Umkehrschluss kann eine in die 45° Richtung auf 140 % vergrößerte Geschwindigkeit als rechnerische Zielvorgabe genommen werden.

2 Die Konstruktion

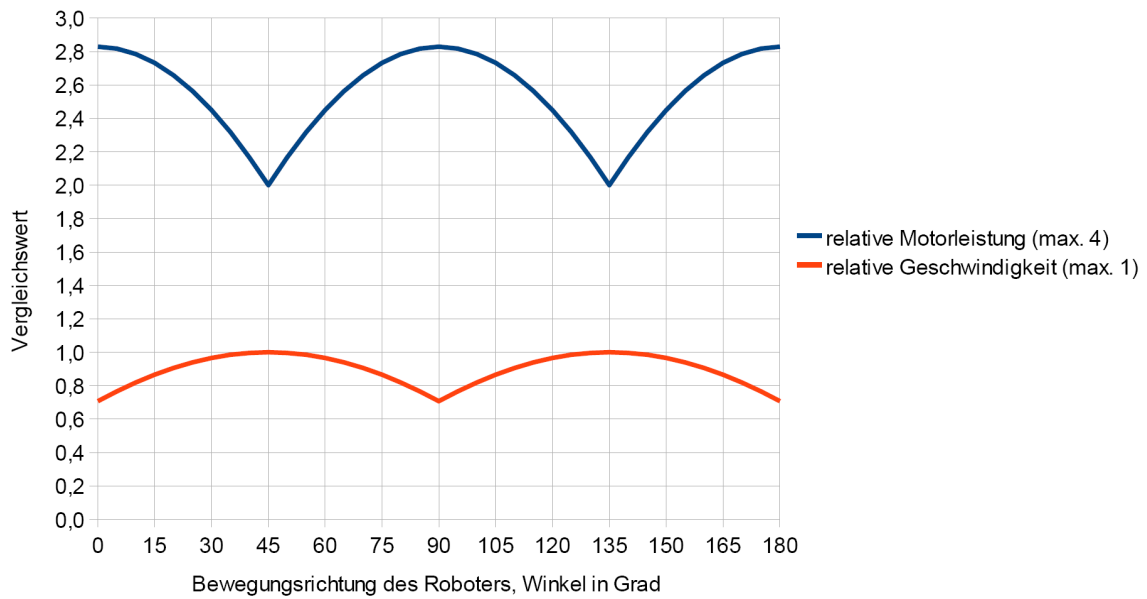


Abbildung 2.15: Leistungs- und Geschwindigkeitspotential in Abhängigkeit der Bewegungsrichtung

Weiters wurden als Zielmasse 2 kg fixiert, da diese durch die gewählten Komponenten realistisch erschien (Summe aller Komponenten plus überschlägige Berechnung der zusätzlichen Maschinenteile). Als Raddurchmesser wurden 50 mm gewählt, der Wert des Rades, welches laut den Versuchen und Simulationen in Kapitel 3 die beste Performance erreicht.

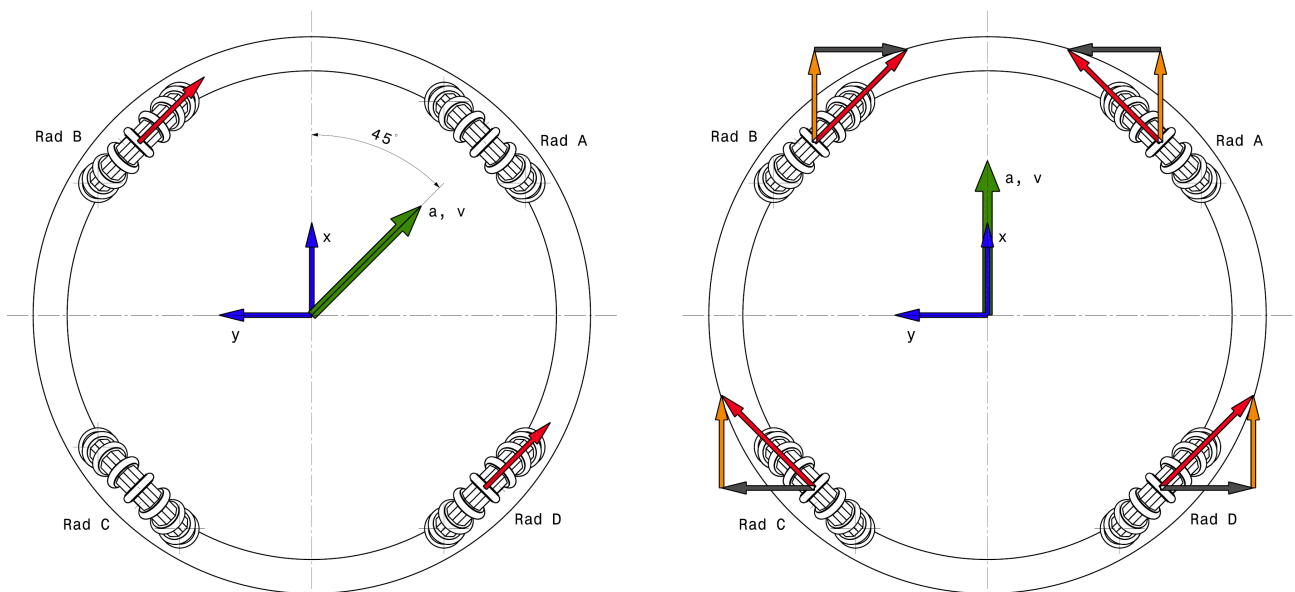


Abbildung 2.16: Skizze zur Berechnung der Motorleistung

Die Getriebeübersetzung wurde so festgelegt, dass einerseits die Beschleunigung erreicht werden kann und andererseits der elektrische Strom im erlaubten Bereich bleibt. Ein Getriebe wird nicht nur deshalb benötigt, um das nötige Drehmoment am Rad zu erzeugen, es entkoppelt auch den Motor vom Rad, wodurch die Schläge (die durch diese Art des Omniwheels entstehen) und die Radaufstandskräfte selbst nicht an den Motor weitergegeben werden (siehe auch Anforderung nach Kapitel 1.2). Ein weiterer Vorteil ist, dass der Motor damit nicht in der Radachse liegt und besser in die Gesamtkonstruktion integriert und flexibler platziert werden kann. Beim Getriebe muss nicht

nur die Funktion an sich berücksichtigt werden, sondern auch die Montagemöglichkeit des Stirnrades am Omniwheel.

Aus der Akkuspannung (11,1 V) ergibt sich über die Motorkonstante die Maximaldrehzahl, die der Motor erreichen kann, und aus der Übersetzung wiederum die maximal erreichbare Geschwindigkeit des Roboters.

In der Berechnung zeigt sich, dass mit dem Maxon Motor die Ziele nicht erreicht werden können (siehe Anhang S.A10f und A14f). Beim Maxon ist deshalb die Höchstgeschwindigkeit unter der Zielvorgabe, was aber in der Praxis kein großes Problem darstellt, da diese nur in seltenen Fällen im Spiel erreicht wird, und die meisten Teams auch keine höheren Geschwindigkeiten erreichen. Daher wurde im Team beschlossen, dass die Nichterfüllung dieser Zielvorgabe in Ordnung ist.

Zur Leistungsberechnung wurde auch der Nachweis der Haltbarkeit des Getriebes erbracht (siehe Anhang S.A11ff und S.A15ff, nach Köhler Rögnitz 2 2004)

	Ziel	Hacker A20-50S	Maxon EC45flat
Geschwindigkeit	3,5 m/s	5,28 m/s	2,73 m/s
gewählte Getriebeübersetzung	-	4,23	2,81
Strom bei einer Beschleunigung von 8 m/s ²	-	5,8 A	3,0 A

Tabelle 2.2: Leistungsdatenvergleich Antriebsmotoren

Der Maxon-Motor benötigt aufgrund der höheren Drehmomentkonstante eine schwächere Leistungselektronik (3A) als der Hacker-Motor (6A), was bei der Elektronik zu etwas geringeren Kosten führt. Aufgrund der besseren Leistungsdaten in allen anderen Bereichen, der kleineren Baugröße und der viel geringeren Gesamtkosten, wurde für den Prototyp der Hacker-Motor gewählt.

2.4.1.2 Entscheidung

Obwohl der Hacker-Motor besser geeignet ist, wurde in der Serie dennoch der Maxon-Motor verbaut. Der Grund dafür lag in der Regelung des Motors. Während der Maxon-Motor schon in der SSL im Einsatz ist und daher Quellen und Hilfestellungen für die Regelung vorhanden waren, hatte bisher niemand den Hacker-Motor (oder einen vergleichbaren) für diesen Zweck verwendet und somit musste eine Regelung für diese Anwendung entwickelt werden. Das gelang der Elektronikentwicklung des Austrian Cubes RoboCup Teams aber nicht in der geplanten Zeit. Die Problematik lag darin, dass kleine Drehzahlen nicht exakt geregelt werden konnten, was aber bei einem omnidirektionalen Fahrwerk von entscheidender Bedeutung ist, damit der Roboter auch in die gewünschte Richtung fährt (siehe auch Kapitel 3).

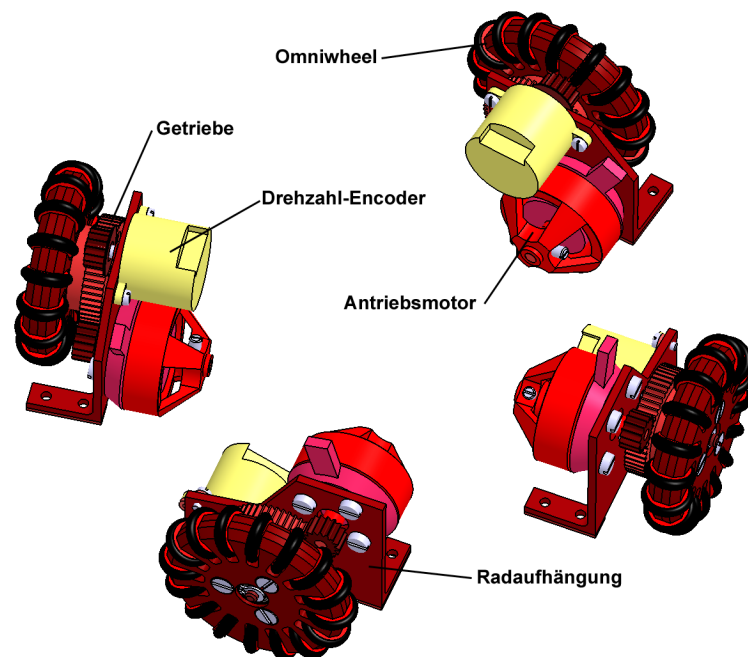


Abbildung 2.17: CAD Modell des Fahrwerks des Roboter-Prototypen

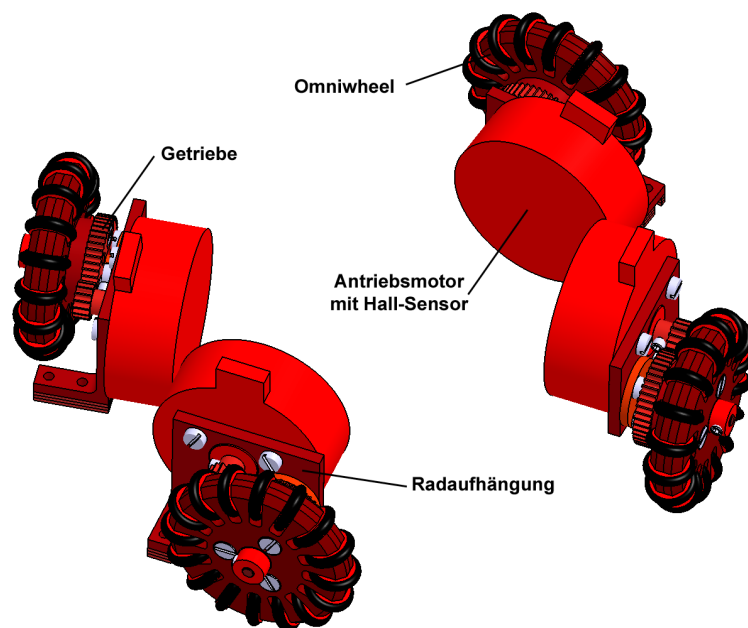


Abbildung 2.18: CAD Modell des Fahrwerks des Serien-Roboters

2.4.2 Der Kicker

Als Basis für die Geometrie und Kinematik der Kicker wurden die Versuche aus Kapitel 4 genommen. Die Entwicklung konzentrierte sich vor allem auf die Bereiche mit dem größten Verbesserungspotential. Da seine Leistung ausreichend ist, wurde in dieser Saison der Elektromagnet selbst nicht optimiert, sondern vom alten Roboter der Vienna Cubes übernommen. Somit war der Elektromagnet in Form und Gewicht vorgegeben.

2.4.2.1 Die Kickereinheit im Prototyp

In Verbindung mit der Wahl des Hacker-Motors für den Roboter-Prototypen war es dann auch möglich, die Elektromagnete für beide Kicker nebeneinander und ganz unten im Roboter unterzubringen. Da die Spulen die schwersten Elemente am Roboter sind, ist diese Lage hinsichtlich des Schwerpunktes ideal. Dadurch ergibt sich eine exzentrische Kräfteinleitung (siehe Abb. 2.20). Die Führung und Rückstellung erfolgt hingegen mittig (siehe Abb. 2.21).

Da bei einer derartige Lagerung und Kräfteinleitung ein Klemmen auftreten kann, wurde die Geometrie und die Lagerung so gewählt, dass kein Klemmen auftritt (siehe Abb. 2.19).

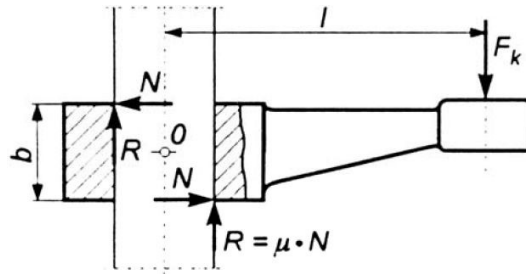


Abbildung 2.19: Skizze Klemmsitz [Jürgens 2010, S.27]

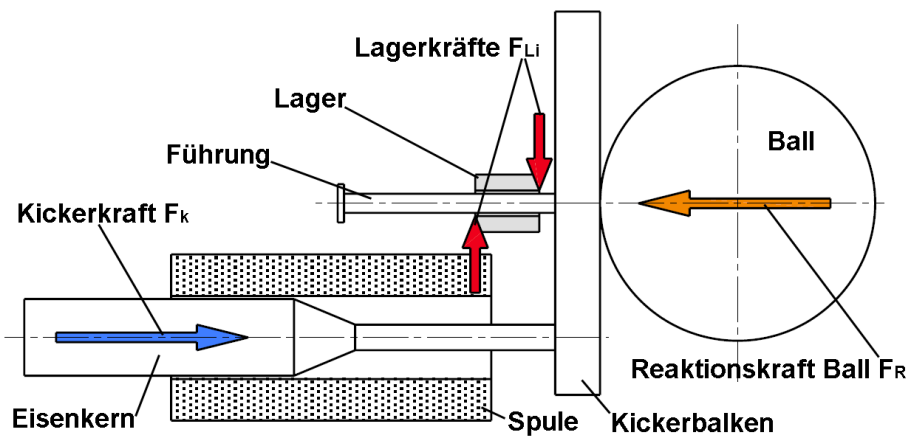


Abbildung 2.20: Funktionsprinzip Kicker des Roboter-Prototypen

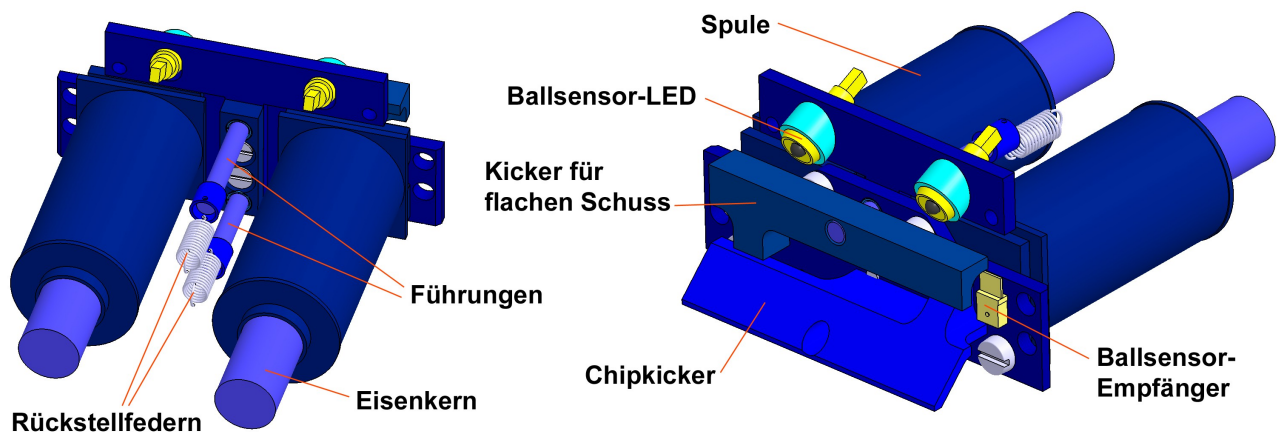


Abbildung 2.21: CAD-Modell der Kickereinheit im Roboter-Prototyp

Bei den Versuchen mit dem Prototyp stellte sich heraus, dass die exzentrische Kräfteinleitung zwar prinzipiell funktioniert, allerdings zwei Probleme auftreten: Zum einen wurde die Lagerung der Führung in der Mitte schon nach wenigen Versuchen durch die lokal enorme Belastung stark deformiert. Das hätte ein ständiges Wechseln der Linearführung zur Folge und wäre in der Praxis damit untauglich. Zum anderen war durch die steigende Deformierung schon nach wenigen Versuchen die Schussgenauigkeit viel zu gering. Daher wurde diese Variante für die Serie verworfen. Sie wäre aber ohnedies nicht machbar gewesen, da in der Serie die Maxon-Motoren verbaut wurden, die allein aufgrund ihrer Größe diese Konstruktionweise unmöglich gemacht hätten.

2.4.2.2 Die Kickereinheit in der Serie

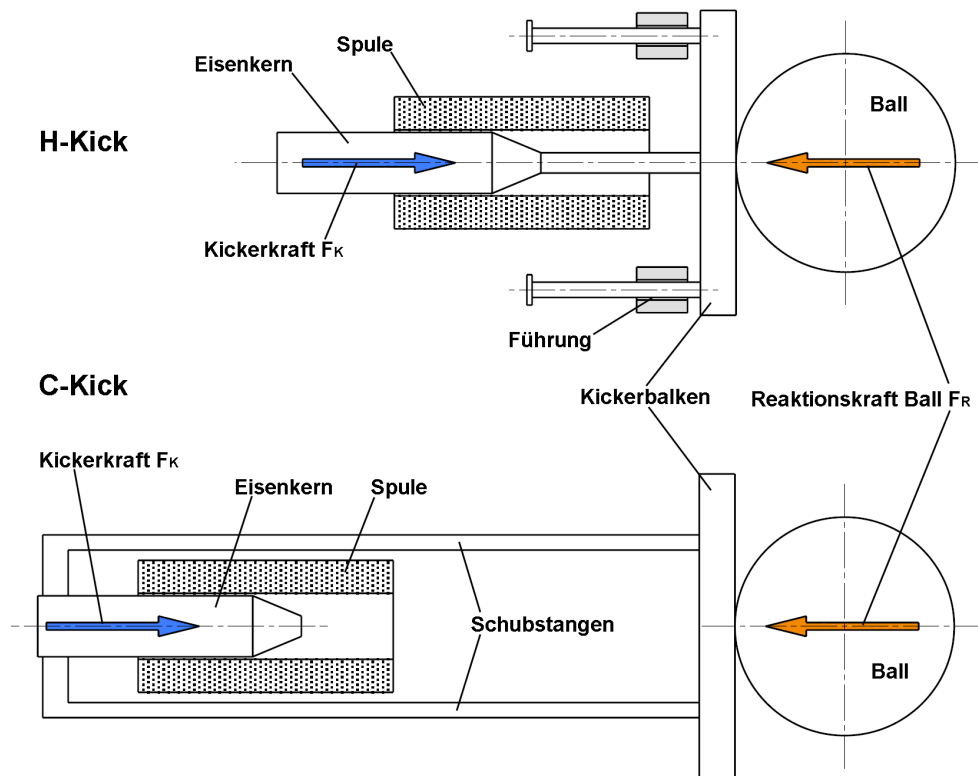


Abbildung 2.22: Funktionsprinzip der Kicker im Serienroboter

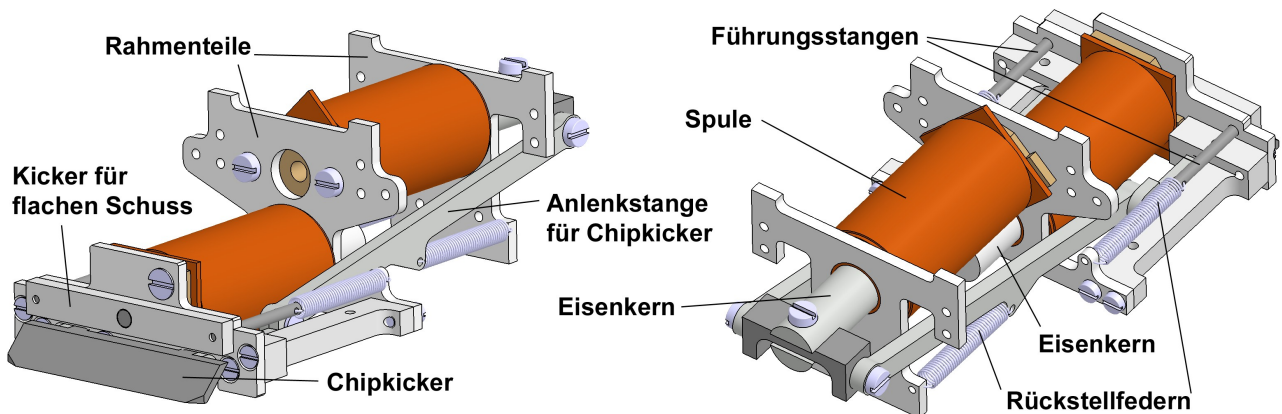


Abbildung 2.23: CAD-Modell der Kickereinheit des Serien-Roboters

Aufgrund die Erkenntnisse aus dem Prototyp wurde für die Serie das Konzept geändert. Hier werden beide Kicker, also der für den flachen und der für den hohen Schuss, zentrisch bedient (siehe Abb. 2.22). Eine Möglichkeit wäre beide Spulen direkt übereinander anzubringen. Da die Spulen in der Form vorgegeben waren, hätte das den Nachteil, dass der Schwerpunkt stark ansteigt und auch nach oben hin zu wenig Platz für den Akku und die Elektronikteile bleibt, da die Höhe des Roboters 150 mm nicht überschreiten darf [Reglement 2009, S.7]. Somit blieb nur die Möglichkeit die Spulen etwas höhenversetzt und hintereinander anzubringen. Dadurch ergibt sich eine lange Anlenkung des C-Kickers und die Gefahr des Knickens. Die Anlenkungsstange wurde dann so dimensioniert, dass die Knicksicherheit ausreichend ist. Die Berechnung dazu befindet sich im Anhang S.A18 [Dubbel 2005, S.C43f].

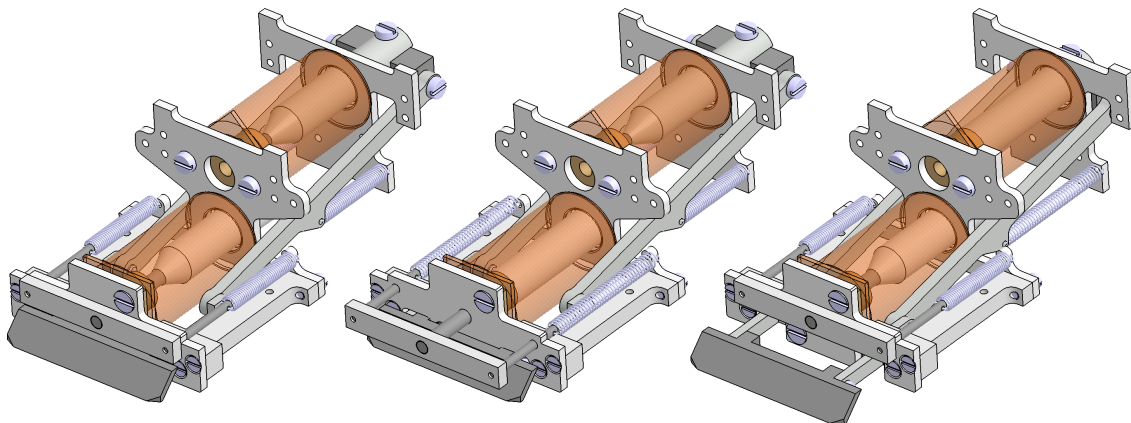


Abbildung 2.24: (1) Kicker eingefahren (2) H-Kicker ausgefahren (3) C-Kicker ausgefahren

2.4.3 Die Dribblereinheit

Die Dribblereinheit ist vor allem durch das Reglement stark eingeschränkt (siehe Kapitel 2.1.3). Weiters soll sie möglichst wenig Platz verbrauchen, da sonst das Fahrwerk weiter hinten platziert werden muss, was zu einer schlechteren Fahrleistung führt (siehe dazu Einfluss des Öffnungswinkels, Kapitel 3.4.6). Damit bleibt wenig Spielraum für Varianten. Was hingegen leicht variiert werden kann, ist das Material der Dribblerwalze, deren Aufgabe es ist, den Ball in eine Rotation zu versetzen.

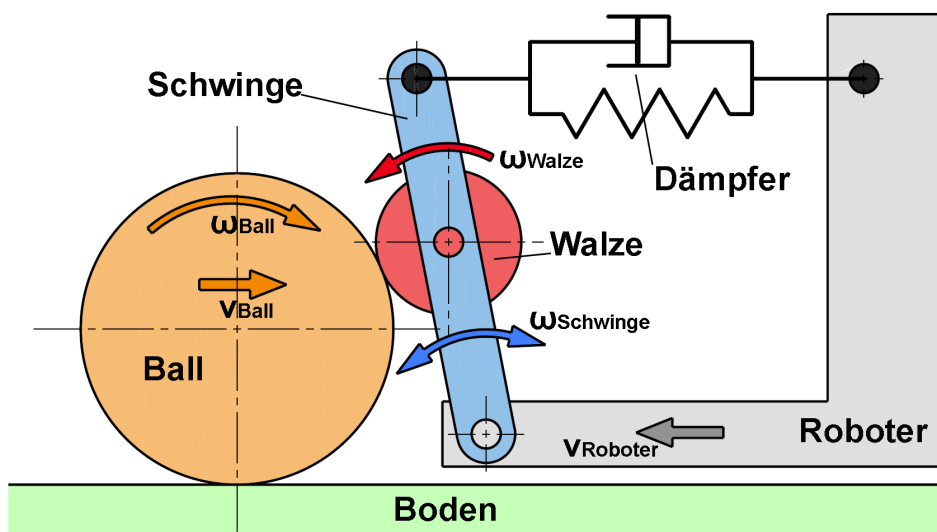


Abbildung 2.25: Funktionsprinzip der Dribblereinheit. Grau: Roboter, Orange: Ball, Blau: Schwinge, Rot: Walze, Schwarz: Dämpfungselement.

Die Anforderungen sind in Tabelle 2.3 zusammengefasst. Beim Prototypen wurde als erste Variante auf eine Stahlwelle Moosgummi aufvulkanisiert, da mit dieser Variante beim Vorgänger dieses Roboters schon gute Erfahrungen gemacht wurden. Aufgrund der viel niedrigeren Kosten wurde ein Silikonschlauch als zweite Variante getestet.

Eigenschaft	gewünschter Wert
Reibung	hoch
E-Modul	klein
Dämpfung	hoch

Tabelle 2.3: Anforderungen an die Dribblerwalze

Eigenschaft	Moosgummi	Silikon
Reibung, E-Modul und Dämpfung	+	+
Kosten	-	+
Verschleiß (durch Versuch ermittelt)	-	+
Bewertung	2.	1.

Tabelle 2.4: Bewertung der getesteten Materialien für die Dribblerwalze

Versuche, bei denen der Roboter mittels Joystick bewegt wurde, haben gezeigt, dass beide Walzen dem Ball einen guten Drall geben können, sodass der Ball beim Dribbling immer fest am Roboter anliegt. Weiters wurde entdeckt, dass Silikon als zusätzlichen Vorteil weniger Verschleiß aufweist. Daher fiel die Entscheidung in der Serie auf die Silikon-Variante (Tab. 2.4).

Die Form des Dämpfungselements kann beliebig gestaltet werden bzw. kann es auch jederzeit einfach getauscht werden. Beim Prototyp wie bei der Serie wurde ein sehr weicher Schaumstoff angebracht, der vom Dämpferbügel zusammengedrückt wird. Dadurch wird der Stoß bei einer Ballannahme gedämpft und der Ball springt nicht wieder vom Roboter weg (Tab. 2.5).

Eigenschaft	gewünschter Wert
E-Modul	klein
Dämpfung	hoch
einfache Anpassung	notwendig

Tabelle 2.5: Anforderungen an das Dämpfermaterial

Abbildung 2.27 zeigt die prinzipielle Funktion der Schwinge: Sie soll eine Passannahme ermöglichen sowie während des Dribblings Stöße abfangen. Sollte der Federweg der Schwinge voll ausgeschöpft werden, liegt der Ball nicht mehr an der Dribblerwalze an, sondern an den beiden Kickern. Da der Elektromagnet des Kickers eine maximale Auslenkung von 16 mm ermöglicht, und der Ball auch noch voll getroffen werden soll, wurden 10 mm für den Federweg fixiert. Mit dem Ball wird auch die 80-20-Regel dargestellt (siehe Kapitel 2.1.3), das heißt, der rote Teil des Balles darf laut Reglement verdeckt werden, der orange markierte Teil nicht.

2 Die Konstruktion

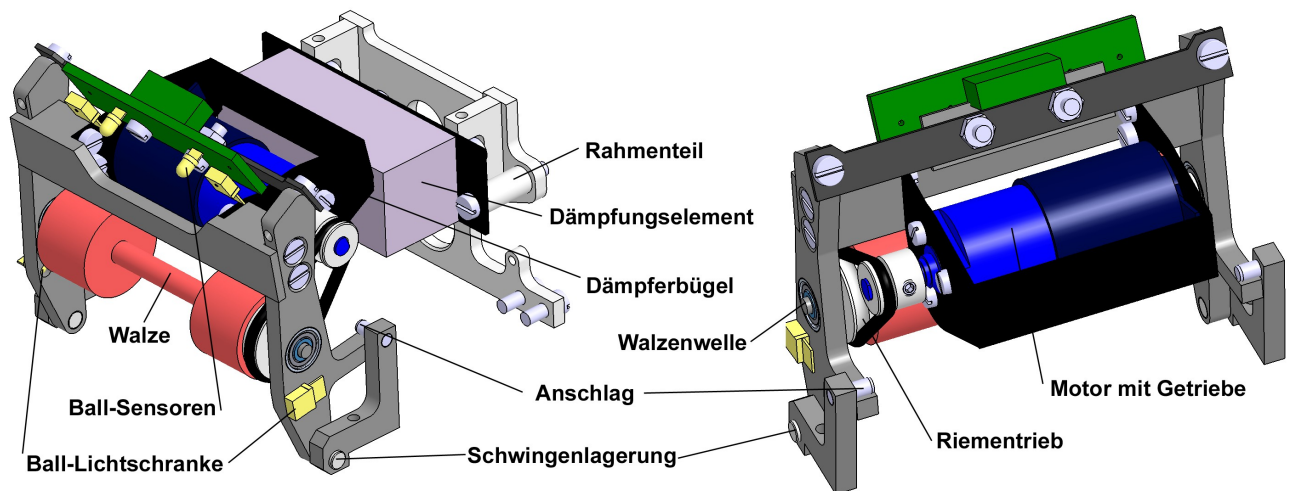


Abbildung 2.26: CAD-Modell der Dribblereinheit beim Serienroboter

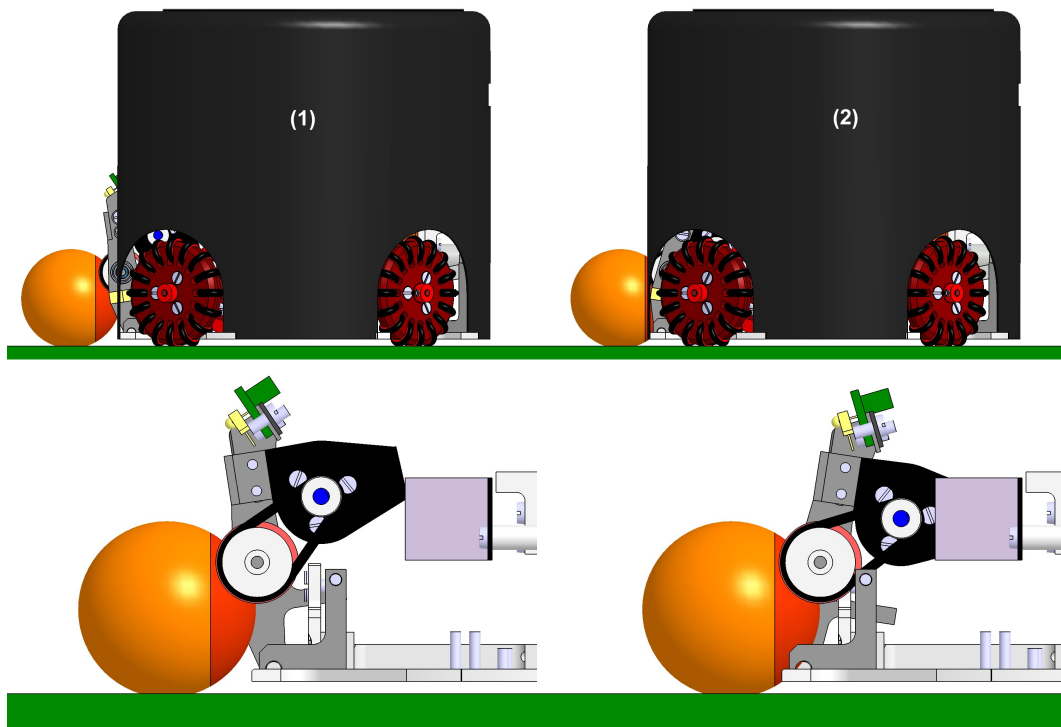


Abbildung 2.27: Die Dämpfungsfunktion der Dribblereinheit: (1) Neutralstellung (2) Eingefedert

Für Kraftübertragung vom Dribblermotor auf die Walze kann ein Zahnradpaar oder ein Riementrieb verwendet werden. Da die exakte Drehzahl der Walze nicht bekannt sein muss, und ein Riementrieb wesentlich kostengünstiger zu realisieren ist, fiel die Wahl auf den Riementrieb. Als Riemen wird ein leicht vorgespannter O-Ring verwendet. Die Verifikation dieser Entscheidung findet sich in Kapitel 2.6.3.

Eigenschaft	Gewichtung	Zahnradgetriebe	Riementrieb
exakte Drehzahlübertragung	1	100 %	0 %
Kosten	5	25 %	100 %
Stoßdämpfung	1	0 %	100 %
Masse	3	50 %	100 %
Bewertung (Erfüllungsgrad)	10	38 %	90 %

Tabelle 2.6: Bewertung der Getriebealternativen für den Dribblerantrieb

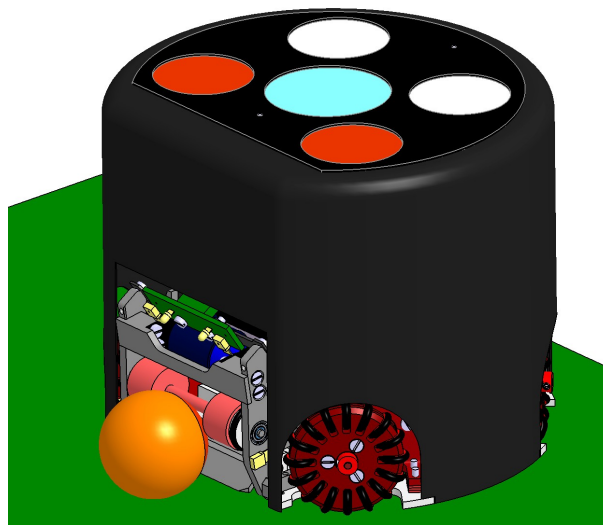


Abbildung 2.28: Roboter mit Ball an der Dribblerwalze anliegend

2.4.4 Weitere Komponenten im Überblick

Zu den bisher genannten Komponenten kommen nun noch folgende hinzu, die durch die Elektronik vorgegeben waren. Es handelt sich um die Elektronik selbst und die Energiespeicher.

Während beim Prototypen durch die Wahl des Hacker-Motors und die Anordnung der Kickerspulen die Energiespeicher gut integriert werden konnten (siehe Abb. 2.29), mussten diese hingegen bei der Serie einen Stock höher angebracht werden.

Die Kondensatoren dienen als Energiespeicher für die Kicker, die beim Prototypen eingezeichnete Spule dem Laden dieser Kondensatoren. Der Akku ist ein dreizelliger Lithium-Polymer-Akku, der die gesamte Versorgung des Roboters übernimmt.

Bei der Serie wurde – statt eine Platine zu fertigen – die Elektronik in Funktionsgruppen aufgeteilt, damit diese Komponenten unabhängig voneinander getauscht und gewartet werden können, da besonders die Leistungselektronik einem Verschleiß unterliegen kann (z.B. Durchbrennen von Transistoren bei einer Blockade des Motors im Zuge eines Spiels).

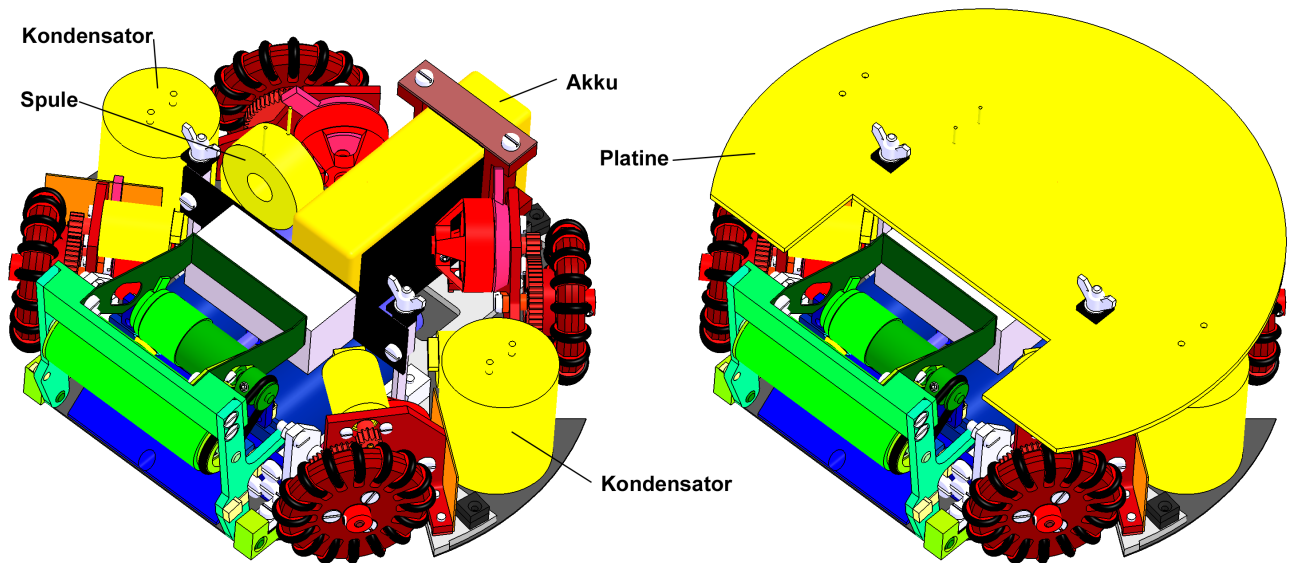


Abbildung 2.29: CAD Modell des Prototypen mit Elektronikbeschreibung

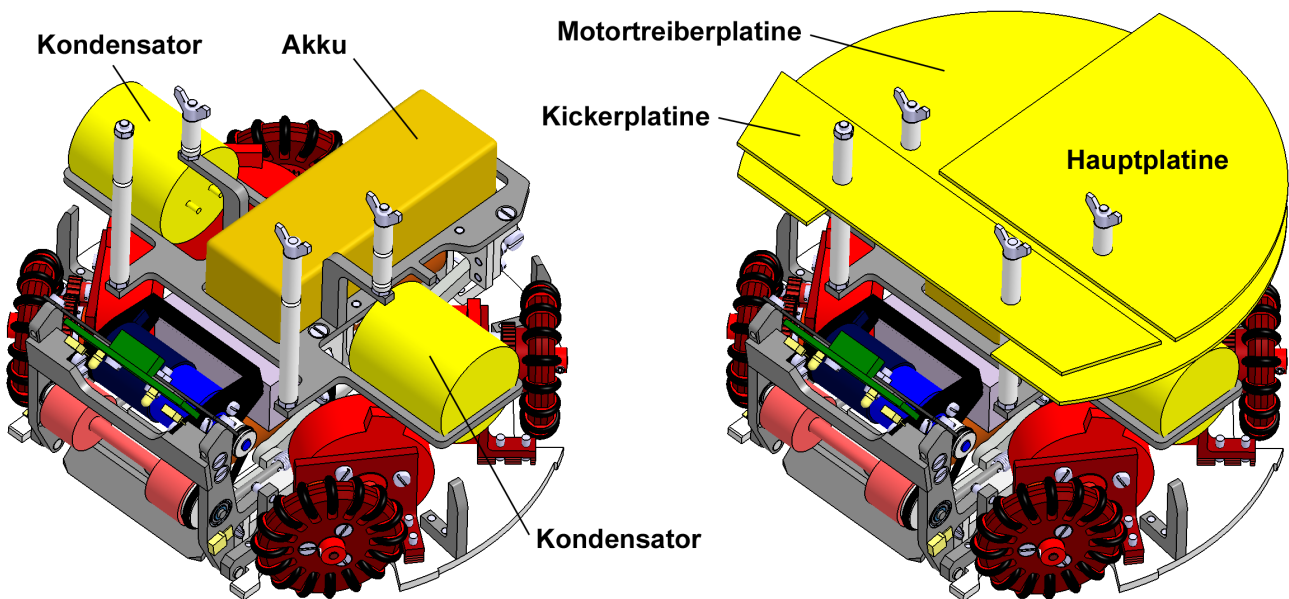


Abbildung 2.30: CAD Modell des Serien-Roboters mit Elektronikbeschreibung

2.4.5 Werkstoffwahl

Bei der Werkstoffwahl wurde bei allen Komponenten generell nach folgendem Schema vorgegangen:

Die Kosten mussten im Rahmen bleiben, Verfügbarkeit und Fertigungsmöglichkeiten gegeben sein (siehe auch Erfüllung der Checkliste in Kapitel 2.2.1). Die Werkstoffe, die diese Bedingungen nicht erfüllen konnten, sind in der Tabelle 2.7 grau dargestellt. Danach wurde je nach Problemstellung der ideale Werkstoff als Verhältnis von geforderter Leistung zu spezifischem Gewicht ausgewählt.

In der Tabelle 2.7 sind die Werkstoffe nach ihrem Leistungspotential sortiert angeführt [Schumacher 2005, S.10f]. " γ " bezeichnet dabei das spezifische Gewicht. Die gewählten Werkstoffe für das jeweilige Problem sind mit einem Stern (*) gekennzeichnet.

Wertung	Festigkeitsproblem Kriterium: σ_B/γ		Steifigkeitsproblem Kriterium: E/γ		Knickproblem Kriterium: $E^{1/2}/\gamma$	
1	CFK*	92,94	CFK*	7495	CFK	21,20
2	GFK	81,55	Stahl*	2710	GFK	10,57
3	Titan	18,12	Aluminium*	2621	Aluminium*	9,77
4	Al EN AW 6082*	11,14	Titan	2492	Titan	7,51
5	Stahl 115CrV3*	9,55	GFK	2192	Stahl	5,91

Tabelle 2.7: Problemabhängige Werkstoffwahl nach Schumacher 2005 S.11

War das Hauptkriterium eines Teils die Festigkeit, wurde GFK hier nicht gewählt, da – wenn die Voraussetzungen für die Fertigung eines Verbundwerkstoffes gegeben waren – gleich das höherwertige CFK verwendet wurde. Für die anderen Teile, bei denen die Fertigung zu aufwendig gewesen wäre, wurde Aluminium und Stahl verwendet.

Weiters ist anzumerken, dass die Krafterleitung bei Aluminium oder Stahl wesentlich einfacher zu realisieren ist als bei Verbundwerkstoffen, was bei der Wahl des Werkstoffes somit zusätzlich berücksichtigt werden muss.

2.5 Konstruktive Ausführung

In diesem Unterkapitel wird die konstruktive Ausführung des Serienroboters beschrieben.

2.5.1 Das Fahrwerk

Das Rad ist durch die Ergebnisse aus Kapitel 3 und der Motor durch die Komponentenwahl gegeben. Um die Konstruktion kompakt zu halten, wurde die Lagerung in die Räder selbst integriert. Da das Rad sehr exponiert ist, sollte es im Schadensfall leicht ersetzbar sein. Daher ist das Rad durch das Abnehmen des Klemmrings ohne weiteres Zerlegen des Roboters austauschbar.

Damit die Querräder des Omniwheels möglichst spiel- und reibungsarm laufen, wurde die Größe und Form der Nut (siehe Abb. 2.31) bei der Fertigung des Prototypen experimentiell ermittelt und dann für die Serie übernommen.

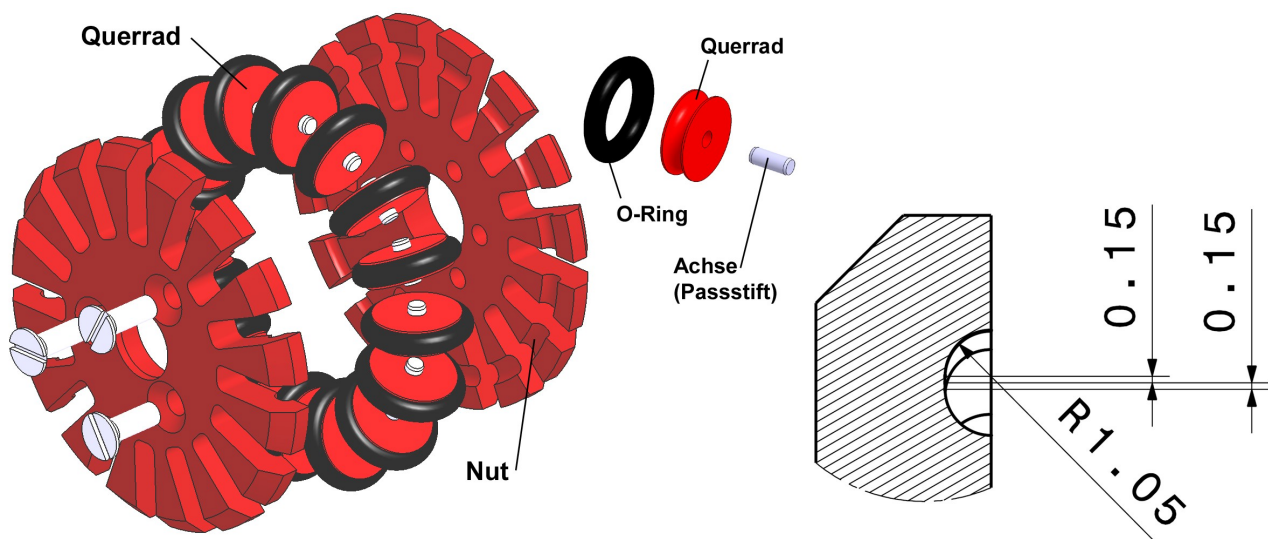


Abbildung 2.31: Explosionsmodell des Omniwheels

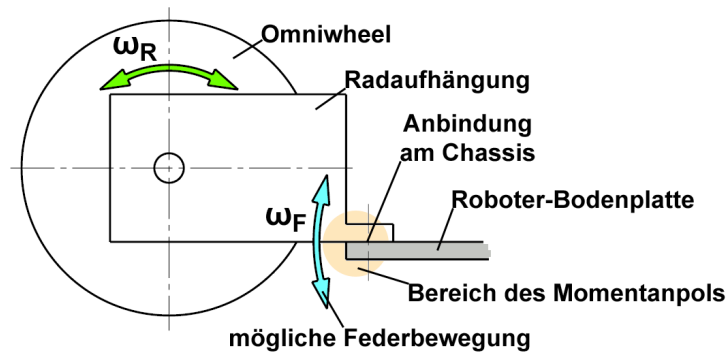


Abbildung 2.32: Prinzipskizze der Radaufhängung

Durch zwei Schrauben, mit denen die Radaufhängung mit dem Rahmen verbunden wird, kann die gesamte Radeinheit entfernt werden, was ebenfalls der leichten Wartbarkeit dient und im Falle eines Motor- oder Getriebschadens einen einfachen Austausch ermöglicht. Da die Radaufhängung im Bereich der Befestigung am Chassis sehr dünn und schmal ausgeführt ist, ergibt sich eine gewisse Federwirkung (siehe Abb. 2.32 und Abb. 2.34). Der Untergrund ist zwar eben, wodurch keine Federung nötig wäre, allerdings ergeben sich durch Fertigungsungenauigkeiten unter Umständen kleine Höhendifferenzen zwischen den Radeinheiten, weshalb diese Federwirkung sinnvoll sein kann.

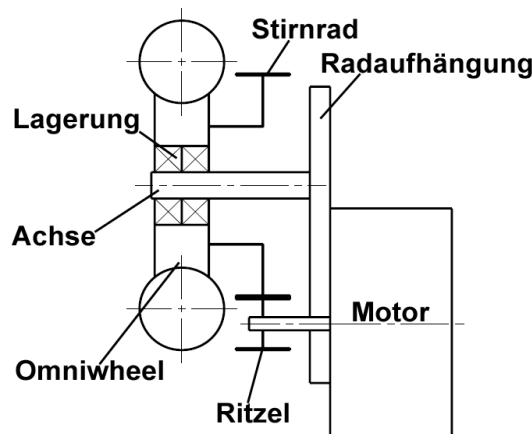


Abbildung 2.33: Prinzipskizze des Fahrwerks mit Getriebe, Motor und Omniwheel

Um die Höhe des Fahrwerks an verschiedene Untergründe anpassen zu können, werden Kohlefaserplättchen zwischen Radaufhängung und Bodenplatte eingeschoben.

Die Zahnräder sind Zukaufteile, die dann nachbearbeitet werden.

Die Teile sämtlicher vier Räder sind gleich, mit Ausnahme der Radaufhängung. Diese ist jeweils an den verfügbaren Bauraum angepasst.

Die Räder haben vorne einen Öffnungswinkel von 108° (siehe Abb. 2.35). Obwohl 90° das Optimum wären (siehe Kapitel 3), lässt sich dieser Winkel nicht realisieren, da vorne im Roboter die Kickereinheit und die Dribblereinheit Platz haben müssen. Daher wurde der Winkel so klein wie möglich gehalten, und mit 108° liegt er bei diesem Roboter noch unter den in der SSL verbreiteten 110° .

2 Die Konstruktion

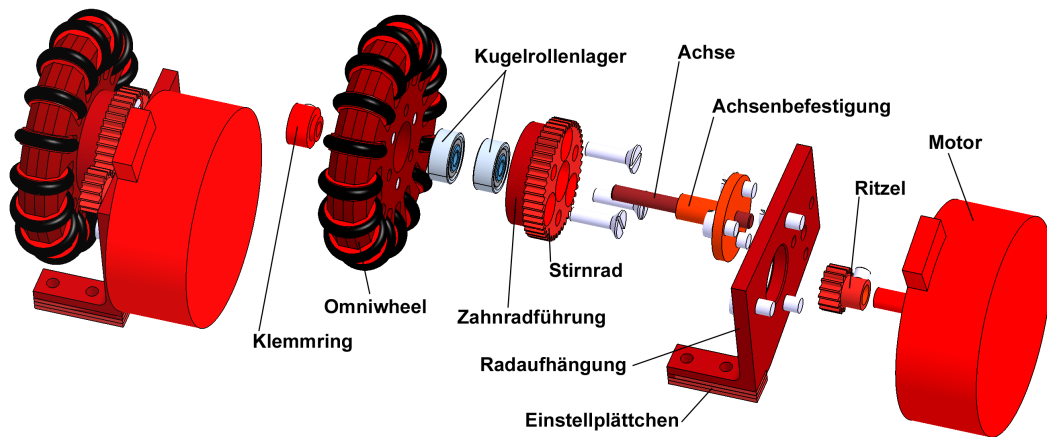


Abbildung 2.34: Explosionsmodell der Radeinheit

Als Material wird generell Aluminium verwendet (EN AW 6082 und 2007), lediglich die hochbelasteten Teile wie die Zahnräder oder die Achsen sind aus Stahl (2C45 bzw. 115CrV3). Die Einstellplättchen des Fahrwerks sind aus 0,5 und 1 mm dicken Kohlefaser-Platten ausgeschnitten.

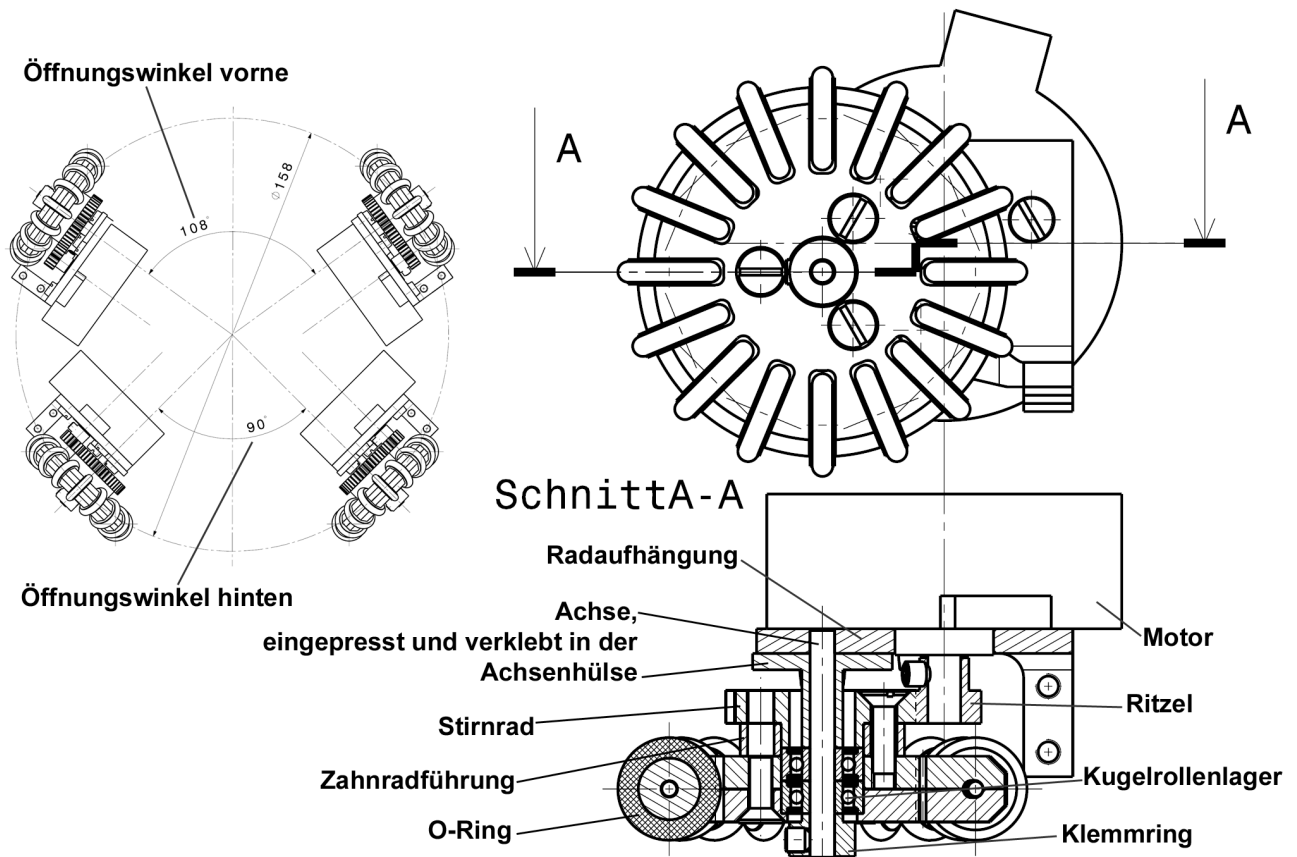


Abbildung 2.35: Zeichnungen zum Fahrwerk

Die Hauptproblematik in der Konstruktion lag in der Geometrie der Einzelteile. Wie die Fertigung des Prototypen gezeigt hat, sind einerseits bei manchen Teilen sehr enge Toleranzen nötig, um die Funktion zu gewährleisten. Andererseits ist die spanende Bearbeitung derart kleiner Teile in einer typischen Schlosserei grundsätzlich sehr schwierig, insbesondere wenn kleine Toleranzen notwendig sind. Dadurch empfiehlt sich die Verwendung von Fertigteilen bzw. Halbzeugen mit

definierter Toleranz. Beispielsweise wird für die Stahlachse des Rades ein polierter Blankstahl verwendet, somit muss dieser in der Fertigung nur abgelängt und gar nicht bearbeitet werden, was den Aufwand erheblich reduziert. Bei den beiden Omniwheelhälften ließ sich die Komplexität nicht reduzieren, was diese Teile zu den kompliziertesten und teuersten innerhalb der Fahrwerkskomponente macht. Weiters wurde in vielen Fällen einer einfachen Fertigung gegenüber einer idealen geometrischen Form der Vorzug gegeben.

2.5.2 Der Kicker

Die Konstruktion des Kickers wird von drei wesentlichen Elementen bestimmt:

- Die Geometrie der Kickerbalken, damit der Ball so getroffen wird, dass die Flugbahn stimmt.
- Die Elektromagnete, die in Form und Größe vorgegeben waren.
- Die auftretenden Kräfte, die mit Hilfe von Versuchen (siehe Kapitel 4) bestimmt wurden und die Dimensionierung bestimmen.

Als Werkstoff kommt wie schon beim Fahrwerk hauptsächlich Aluminium zum Einsatz. Lediglich die Federn und die Führungsstangen des horizontalen Kickers (H-Kicker) sind aus Stahl.

Da die Masse des C-Kickers höher ist als im Versuch, wird bei der Wahl der Fertigungstoleranzen besonders auf die Leichtgängigkeit des Kickers bei gleichzeitig geringem Spiel geachtet.

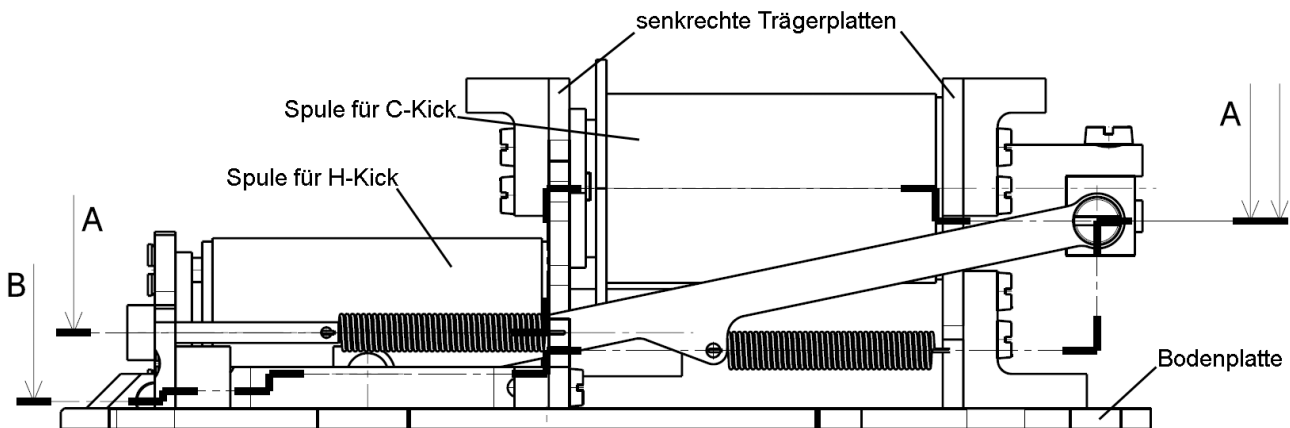


Abbildung 2.36: Zeichnung der Kickereinheit, Aufriss

Anhand der Kickereinheit lässt sich sehr gut ein weiteres Konstruktionsprinzip erklären. Um ein gutes Packaging und geringes Gewicht zu erzielen, sollte jedes Teil nach Möglichkeit mindestens zwei Funktionen erfüllen [Schumacher 2005, S.8].

Einige Beispiele:

- Die senkrechten Aluplatten (siehe Abb. 2.36), die die hintere Spule halten, sind gleichzeitig auch die Anbindung für das "Energiedeck" (die obere Trägerplatte), welches die Energiespeicher und die Elektronik enthält.
- Die hintere Schubstange überträgt einerseits die Kraft des Elektromagneten und ist andererseits Anbindung der Rückstellfeder (siehe Abb. 2.36).
- Die Rahmenseitenteile sind sowohl für die Stabilität des Rahmens und die Anbindung der senkrechten Platten zuständig, als auch gleichzeitig für die Führung des C-Kickers (siehe Abb. 2.38).

Dieses Konstruktionsprinzip findet sich auch in den anderen Komponenten wieder.

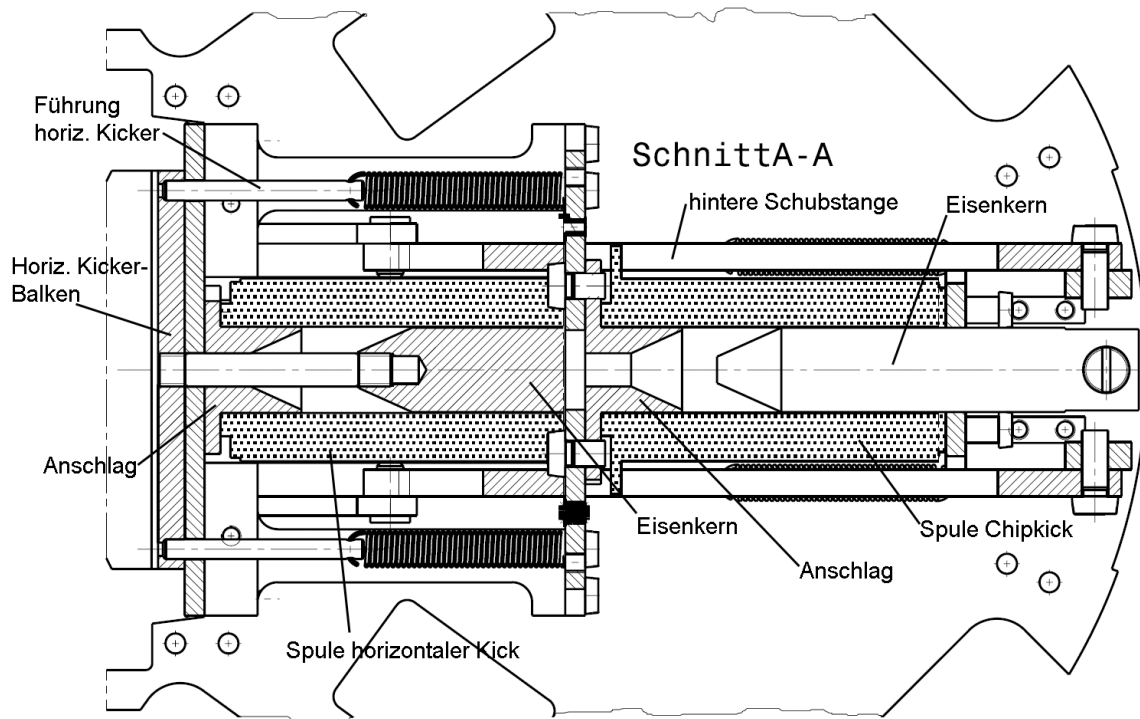


Abbildung 2.37: Zeichnung der Kickereinheit, Schnitt A-A

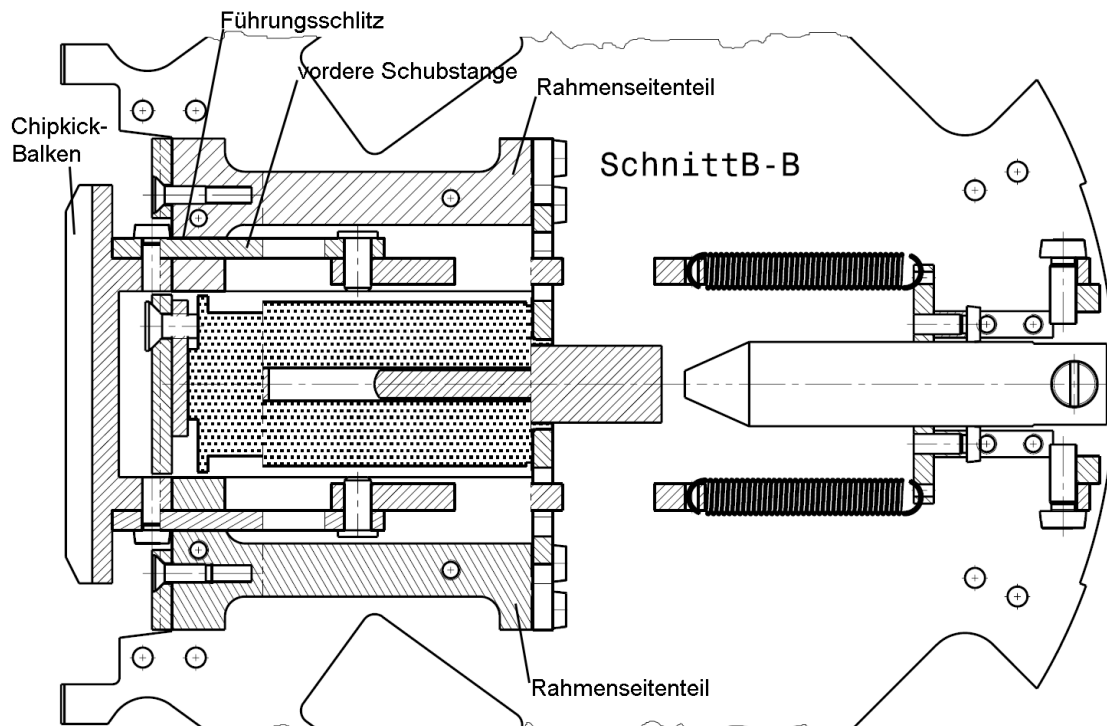


Abbildung 2.38: Zeichnung der Kickereinheit, Schnitt B-B

2.5.3 Die Dribblereinheit

Bei der Konstruktion der Dribblereinheit mussten mehrere Funktionen vereint werden. Die Walze, die den Ball in Rotation versetzen soll, die Schwinde, die bei der Passannahme die Energie

absorbieren sowie während des Dribblings Stöße abfangen soll, und die Anbringung diverser Sensoren. Gleichzeitig muss sie möglichst kompakt sein, um die beiden vorderen Räder nicht allzu weit nach hinten verschieben zu müssen.

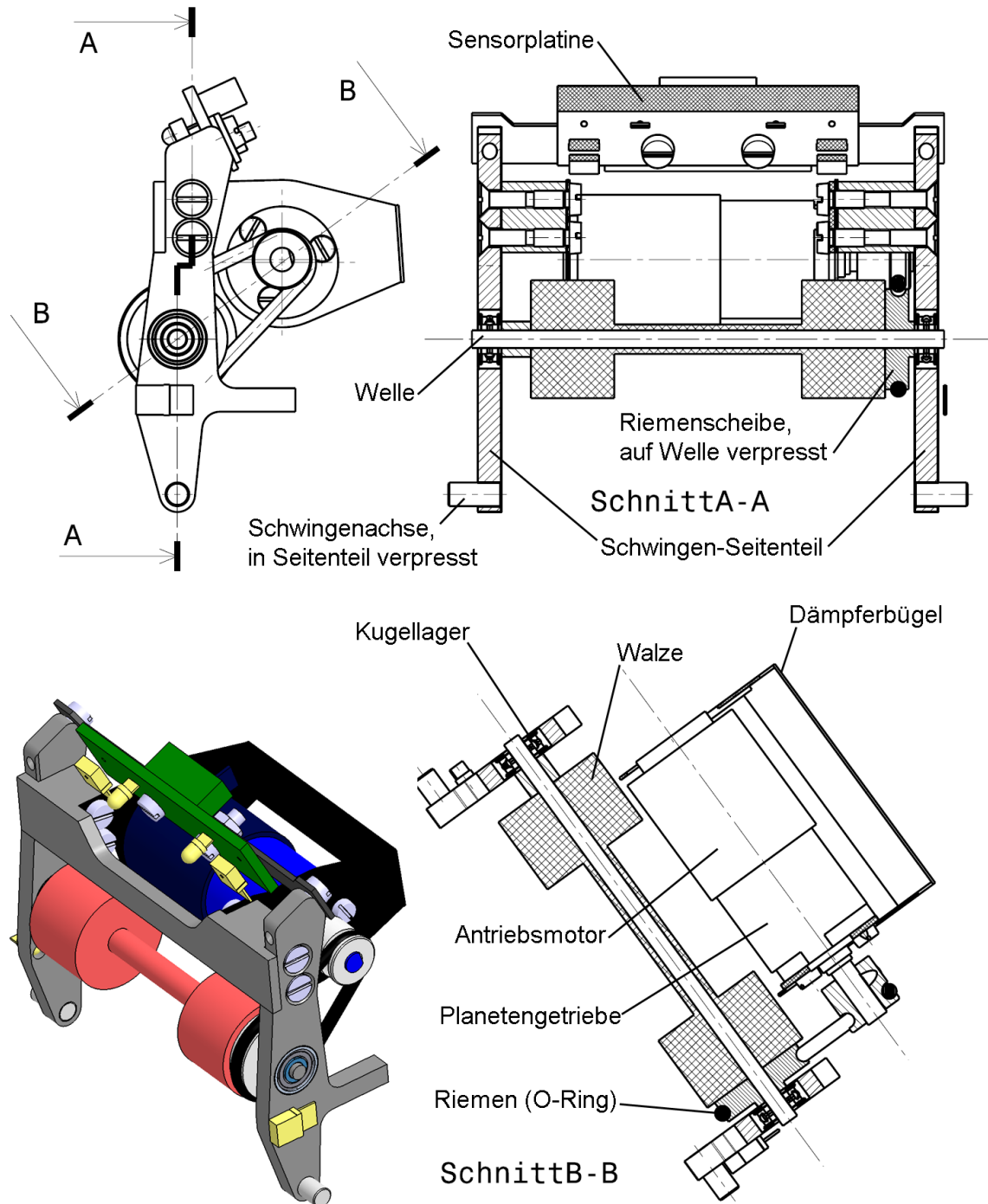


Abbildung 2.39: Zeichnung der Dribblereinheit

Für den Antriebsmotor des Dribblers wird ein Gleichstrommotor mit einem Planetengetriebe (Übersetzung 3,71) verwendet. Mittels eines Riementriebes (Übersetzung $\sim 1,9$) wird das Drehmoment auf die Walze übertragen. Die Gesamtübersetzung beträgt dann ca. 7, was in Kombination mit dem verwendeten Motor ein ausreichendes Drehmoment an der Walze liefert.

Der Durchmesser der Walze wurde mit 20 mm festgelegt. Je größer die Walze, desto weniger ändert sich der Berührungspunkt des Balles an der Walze, da sich die Höhe des Balles in Relation zum Roboter durch die äußeren Bedingungen leicht ändern kann. Ändert sich dieser Punkt zu stark, so kann nicht mehr garantiert werden, dass die 80-20-Regel (siehe Kapitel 2.1.3) eingehalten wird, was einen Reglementverstoß bedeuten würde. Umgekehrt lässt sich eine größere Walze als 20 mm Durchmesser durch den begrenzten Bauraum kaum realisieren.

Als Material wird auch hier hauptsächlich Aluminium verwendet, die Walzenachse ist aus Stahl und der Dämpferbügel aus Kohlefaser.

2.5.4 Der Rahmen

Der Rahmen wurde zum Schluss konstruiert und verbindet sämtliche Komponenten. Es wurde versucht, möglichst einfach zu fertigende Teile zu konstruieren, leicht zu bauen und kraftflussgerecht zu konstruieren.

Aus Kostengründen wurde in einigen Fällen das Ziel der einfachen Wartung und Montage zu Gunsten einfacherer Fertigung fallen gelassen. Das trifft im Besonderen für den vorderen Teil zu, der die Kicker trägt und gleichzeitig auch führt.

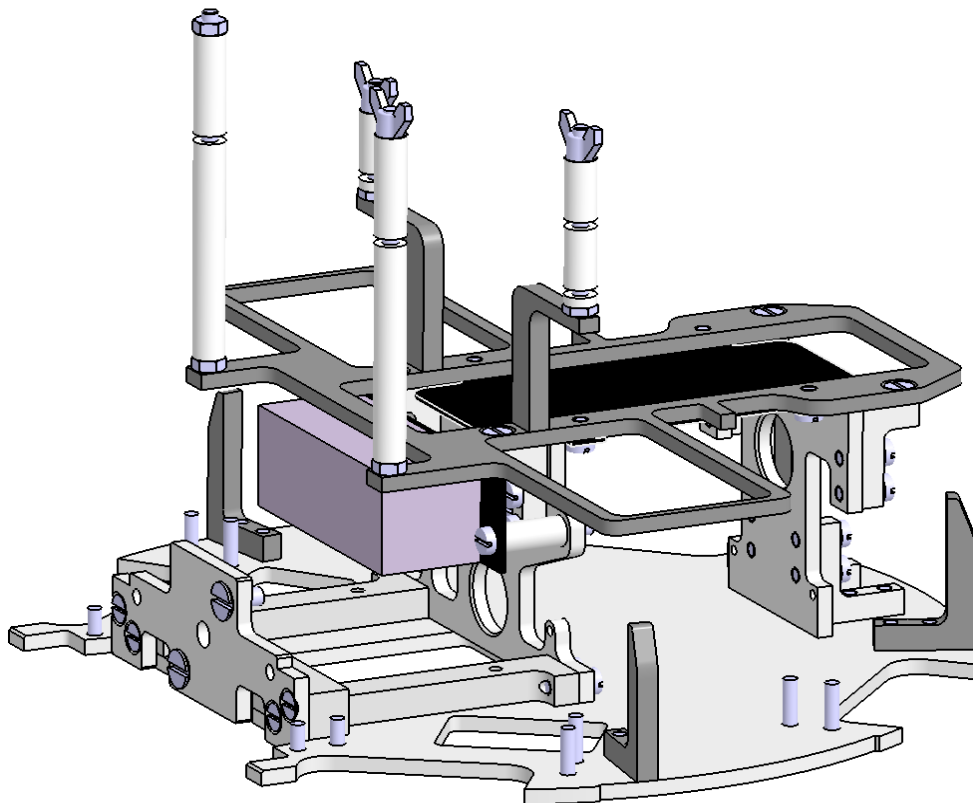


Abbildung 2.40: CAD Modell des gesamten Rahmens

Weiters wurden die mittlere und die hintere Rahmenplatte an Stelle eines Frästeils als Schnittteil mit angeschraubten Laschen ausgeführt, da in der Fertigung keine ausreichende Kapazität für Frästeile vorhanden war.

Die Befestigungen des Dämpfungselements sowie des Akkus wurden aus Kohlefaserplatten gefertigt, die Platinenanbindungen sind Gewindestangen. Der Rest des Rahmens besteht aus Aluminiumschnitt- bzw. -frästeilen. Sämtliche Teile wurden dann miteinander verschraubt.

2 Die Konstruktion

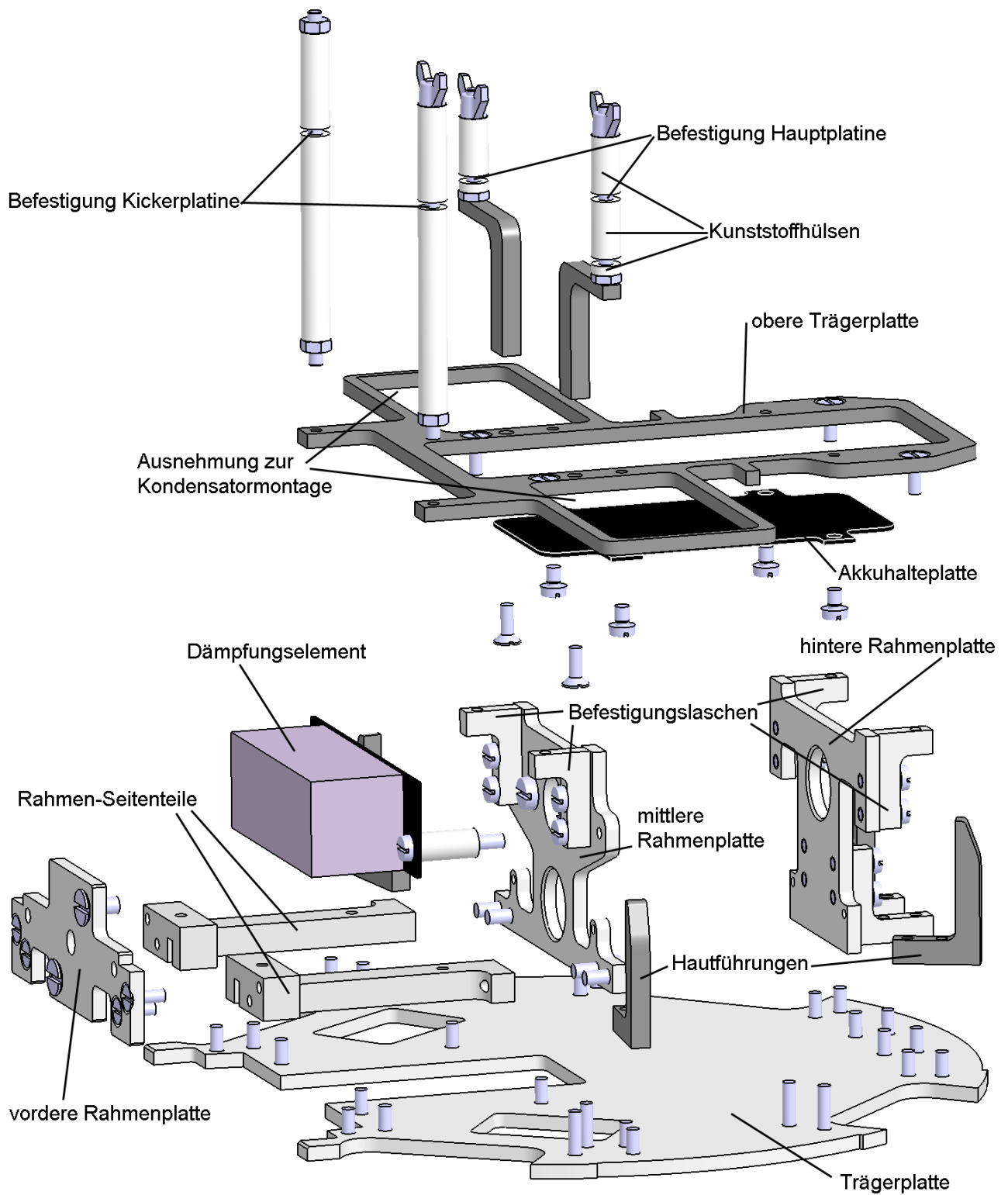


Abbildung 2.41: Explosionsdarstellung des Rahmens

2.5.5 Die Außenhaut



Abbildung 2.42: CAD Modell der Außenhaut des Roboters

Die Außenhaut ist ein zylinderförmiges, vorne abgeflachtes Kohlefaserteil. Der Deckel wird herausgeschnitten, da aufgrund der Leitfähigkeit von Kohle der Roboter abgeschirmt und somit keine Funkverbindung möglich wäre. Der Deckel ist daher eine GFK Platte, die oben eingeklebt wird. An dieser GFK Platte werden dann die Farbcodes (aus buntem Karton) für die Vision (engl.) angebracht und eine schwarz lackierte Kulissee (ebenfalls aus GFK), die dafür sorgt, dass die Farbpunkte – exakt zum Roboter positioniert – von oben für die Kameras sichtbar sind.

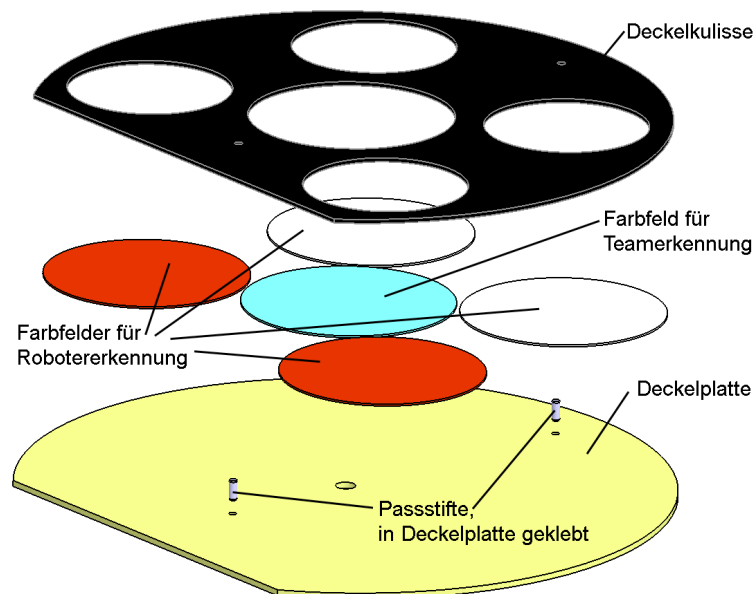


Abbildung 2.43: Explosionsdarstellung des Deckels

Bei der Außenhaut sind zwei Dinge wesentlich: Zum einen darf sie keine Farbe enthalten, die die Bilderkennung irritiert und zum anderen soll sie möglichst robust sein. Weiters sollte sie auch leicht sein, da sie aufgrund ihres Schwerpunktabstandes zum Boden den Gesamtschwerpunkt des Roboters stark beeinflusst. Aus diesen Gründen wurde trotz des aufwändigen Herstellungsprozesses CFK als Material gewählt, da es leicht und schwarz ist sowie eine hohe Festigkeit besitzt.

Die Beschreibung des Herstellungsprozesses der Außenhaut befindet sich im Anhang S.A48ff [nach Schürmann 2007, S. 147f].

2.6 Erkenntnisse aus dem Betrieb

Im Folgenden werden die Erfahrungen beschrieben, die mit dem Serienroboter bei der Weltmeisterschaft 2009 in Graz gemacht wurden.



Abbildung 2.44: Spielsituation bei der Weltmeisterschaft 2009 in Graz

Merkmal	Wert
Abmessungen	148 mm hoch, 178 mm im Durchmesser
Masse	2,1 kg
Schwerpunktshöhe	40 mm bei 5 mm Bodenfreiheit
max. Beschleunigung	8 m/s ²
Höchstgeschwindigkeit	2,7 m/s
Federweg der Schwinge	bis zu 10 mm
Bodenfreiheit	einstellbar von 3 bis 8 mm
H-Kick Geschwindigkeit	7 m/s
C-Kick Reichweite	1,7 m
Radöffnungswinkel	vorne: 108° hinten 90°
Durchmesser der Radmittelpunkte	158 mm
Omniwheel	Durchmesser 50 mm, 16 Querräder
Omniwheel - Querräder	Durchmesser 12,5 mm, 2,5 mm dick
Teile	500 pro Roboter / knapp 7000 insgesamt
Teilebezug pro Roboter	320 Zukaufteile, 180 hergestellte Teile

Tabelle 2.8: Technische Daten des Roboters

2.6.1 Die Fertigung

Aufgrund der Erfahrungen beim Prototyp gestaltet sich die Fertigung der Roboter-Serie im Wesentlichen problemlos. Lediglich das Omniwheel benötigt Anpassungsarbeiten. Dadurch wird gewährleistet, dass sich die Querräder einerseits leicht drehen können, aber andererseits nicht zuviel Spiel haben. Abbildung 2.45 zeigt die einzelnen (Spalt-)Maße sowie die Form der Nut, deren genaue Einhaltung für ein gut funktionierendes Omniwheel nötig sind. Die große Toleranz der Achsen der Querräder, welche zugekauft werden, erschwerte die Problematik zusätzlich.

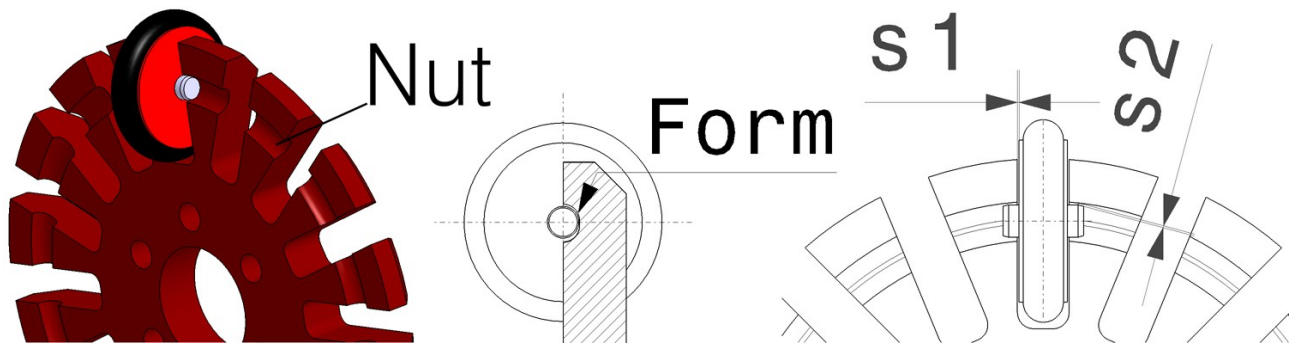


Abbildung 2.45: Entscheidende Toleranzen für die Funktion des Omniwheels

Da die meisten Teile Laser- bzw. Wasserstrahl-Schnitteile sind, war die Fertigung einfach und kostengünstig. Damit wurde das in Kapitel 1.2 vorgegebene Ziel der einfachen Fertigung und dadurch niedriger Kosten eingehalten.

Bei einigen Presssitten wurden die Toleranzen in der Fertigung nicht eingehalten, was sich aber durch zusätzliches Verkleben dieser Verbindungen beheben ließ.

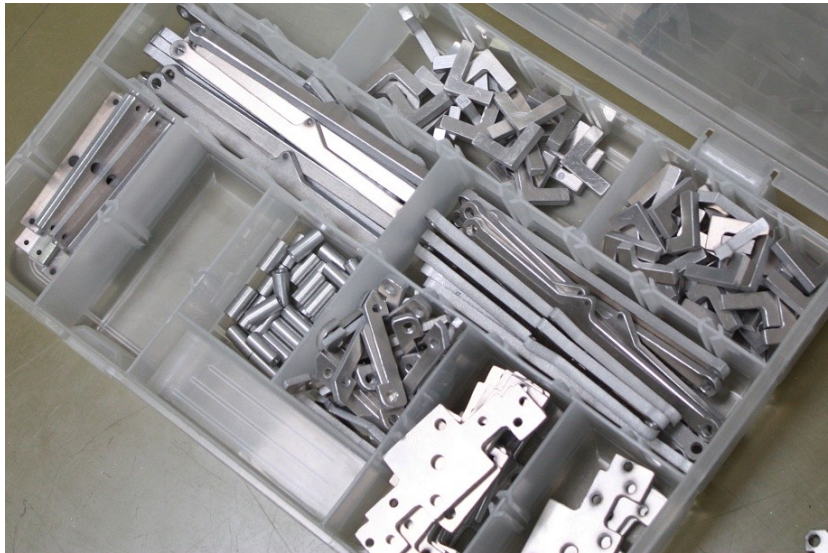


Abbildung 2.46: Einige Aluminium Schnittteile des Roboters

2.6.2 Die Montage

Bei der Montage des Rahmens samt der Kickereinheit muss die Montagereihenfolge genau eingehalten werden, weshalb die Montage in diesem Bereich fehleranfällig ist. Dieses Problem wurde bewusst in Kauf genommen, siehe Kapitel 2.5.4. Die Montage der restlichen Komponenten gestaltet sich einfach, wodurch sowohl die Montage als auch die Wartung von Teammitgliedern durchgeführt werden können, die nicht vom Fach sind, was der Forderung im Lastenheft entspricht.

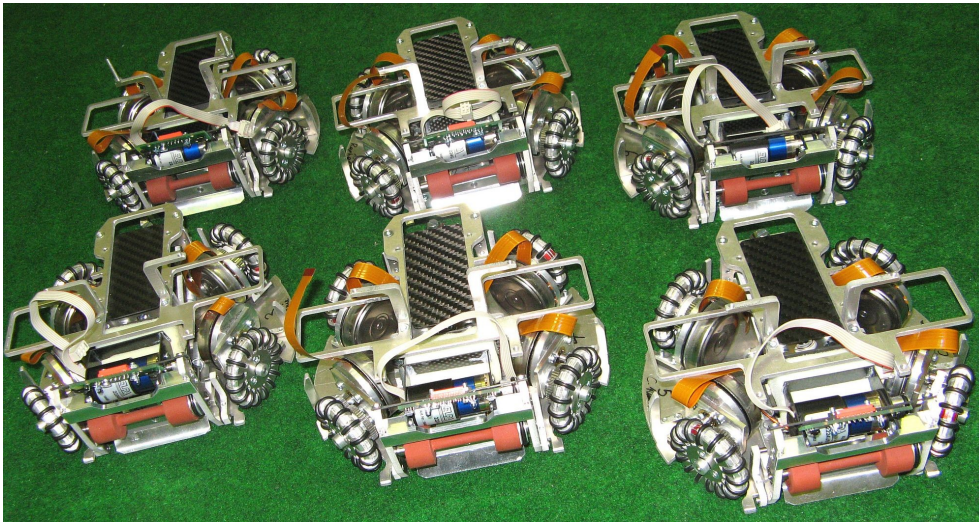


Abbildung 2.47: Die ersten sechs Roboter nach der Montage

2.6.3 Der Betrieb

Da die Belastung durch das Spiel (z.B. Fouls) nicht bekannt war und vor allem die Dynamik der Kräfte unterschätzt wurde, kamen einige Mängel zu Tage:

So war die Außenhaut nicht ausreichend am Roboter befestigt, denn sie wurde bei harten Berührungen gegenüber dem Roboter verdreht. Dadurch wird die Bilderkennung verfälscht, da sich der Computer an den Farbpunkten am Deckel orientiert. Weiters kann die Außenhaut mit den Rädern kollidieren, wodurch diese blockieren und dadurch in weiterer Folge Schäden in der Elektronik auftreten können.

Ein weiterer Schwachpunkt im Wettbewerbseinsatz war die Fahrwerksbefestigung. So hat sich zwar die gewählte Anbindung als leicht federnd erwiesen, was sicher Vorteile mit sich bringt. Bei harten Fouls wurde aber das gesamte Fahrwerk verdreht und die Durchgangsbohrungen der Fahrwerksbefestigung wurden ausgeschlagen.

Obwohl dieselbe Geometrie wie in den Versuchen verwendet wurde und auch die Bodenfreiheit passend gewählt wurde, verhielt sich der C-Kicker im Roboter anders als bei den Versuchen (siehe Kapitel 4). Daher erreicht der C-Kicker nicht die Reichweite von etwa zwei Metern wie im Versuch, sondern nur etwa einen Meter.

Als mögliche Ursache wurde das höhere Gewicht des Kickers im Roboter eruiert, das aus konstruktiven Gründen nötig war. Daher erreicht der Kicker bis zum Ballkontakt nicht die gleiche Geschwindigkeit wie beim Versuch. Eine weitere Ursache könnte die bessere Führung im Roboter sein. Während bei den Versuchen die Genauigkeit keine Rolle spielte und die Kickerführung ein großes Spiel aufwies, musste dieses im Roboter gering gehalten werden, um eine hohe Schussgenauigkeit zu erzielen. Da der Kicker am Roboter weniger nachgibt, könnte sich ein anderes Verhalten beim Ballkontakt einstellen. Umgekehrt war die Führung im Roboter leichtgängiger und auch die Kraft der Rückstellfeder geringer. Dieser Effekt ist aber zu gering, um ausgleichend wirken zu können. Eine detailliertere Analyse war aus Zeitgründen nicht möglich.

Die Form der Dribblerwalze erwies sich als gut, was das Dribbling selbst betrifft. So kann der Ball durch den Rückwärtsdrall am Dribbler so stark an den Roboter gedrückt werden, dass er sich mit der Hand kaum mehr entfernen lässt. Allerdings erschwert diese Form eine Passannahme, da der

Ball unkontrolliert zurückspringt, wenn er die Kante der Nut trifft, weshalb sich die Dribblerwalze in dieser Ausführung als ungeeignet erwies.

In anderen Bereichen wurden die Ziele erfüllt bzw. sogar übertroffen. So hat sich das einfache Tauschen des gesamten Fahrwerkes als sehr nützlich bei Defekten am Antrieb erwiesen. Der Riementrieb zur Kraftübertragung vom Dribblermotor zur Dribblerwalze hat sich als einfache und praktikable Lösung erwiesen. Der H-Kicker erreichte die Leistung aus dem Versuch und auch die Schussgenauigkeit ist zufriedenstellend. Die erreichbaren Fahrleistungen, die aus einem guten Grip und der gewählten Übersetzung resultieren, haben sich als mehr als ausreichend erwiesen, da der Roboter im Vergleich mit dem anderer Teams schneller beschleunigen kann. Mit dem geringen Gesamtgewicht und dem neuartigen Design der Außenhaut konnten in der Liga neue Maßstäbe gesetzt werden.

Außenhautbefestigung nicht ausreichend
Fahrwerksanbindung zu schwach
Chipkicker Leistung nicht ausreichend
Form der Dribblerwalze für Passannahme nicht geeignet

Tabelle 2.9: Probleme des Serien-Roboters

2.7 Ergebnis und weiterführende Ideen

Nach einer Behebung der Fehler aus Tabelle 2.9 erhält man einen zuverlässigen Roboter, der über ausreichendes Leistungspotential verfügt, um in der SSL bestehen zu können. Mit Ausnahme der Chipkicker-Leistung konnten alle Fehler durch kleine Umbauten (Änderung in der Ausführung) behoben werden. Die Dribblerwalze ist nun zylindrisch ausgeführt. Eine zusätzliche Führung aus einem Aluminiumblock am Roboterrand zwischen Vorder- und Hinterrad besorgt nun einerseits die Verdrehsicherung der Radaufhängung und verstärkt gleichzeitig die Führung der Außenhaut. Zusätzlich wird nun die Außenhaut auch vorne geführt, wodurch sie nun fest am Roboter montiert werden kann. Der C-Kicker selbst muss aber neu ausgelegt werden, um eine bessere Wirkung zu erreichen. Möglichkeiten dazu werden im Kapitel 4 aufgezeigt.

Da sich die Form der Spule für das Packaging als sehr ungünstig erwiesen hat und für die bessere Regelung der Motoren zusätzlich Encoder verbaut werden sollten, gibt es auch bei den elektronischen Komponenten Entwicklungsmöglichkeiten.

Folgende Maßnahmen könnten die nächste Robotergeneration weiter verbessern:

- flache, rechteckige Spulenform für die Kicker
- neue Chipkickergeometrie
- Antriebsmotoren mit kleinerer Bauform
- massivere Auslegung der exponierten Roboterteile

2 Die Konstruktion

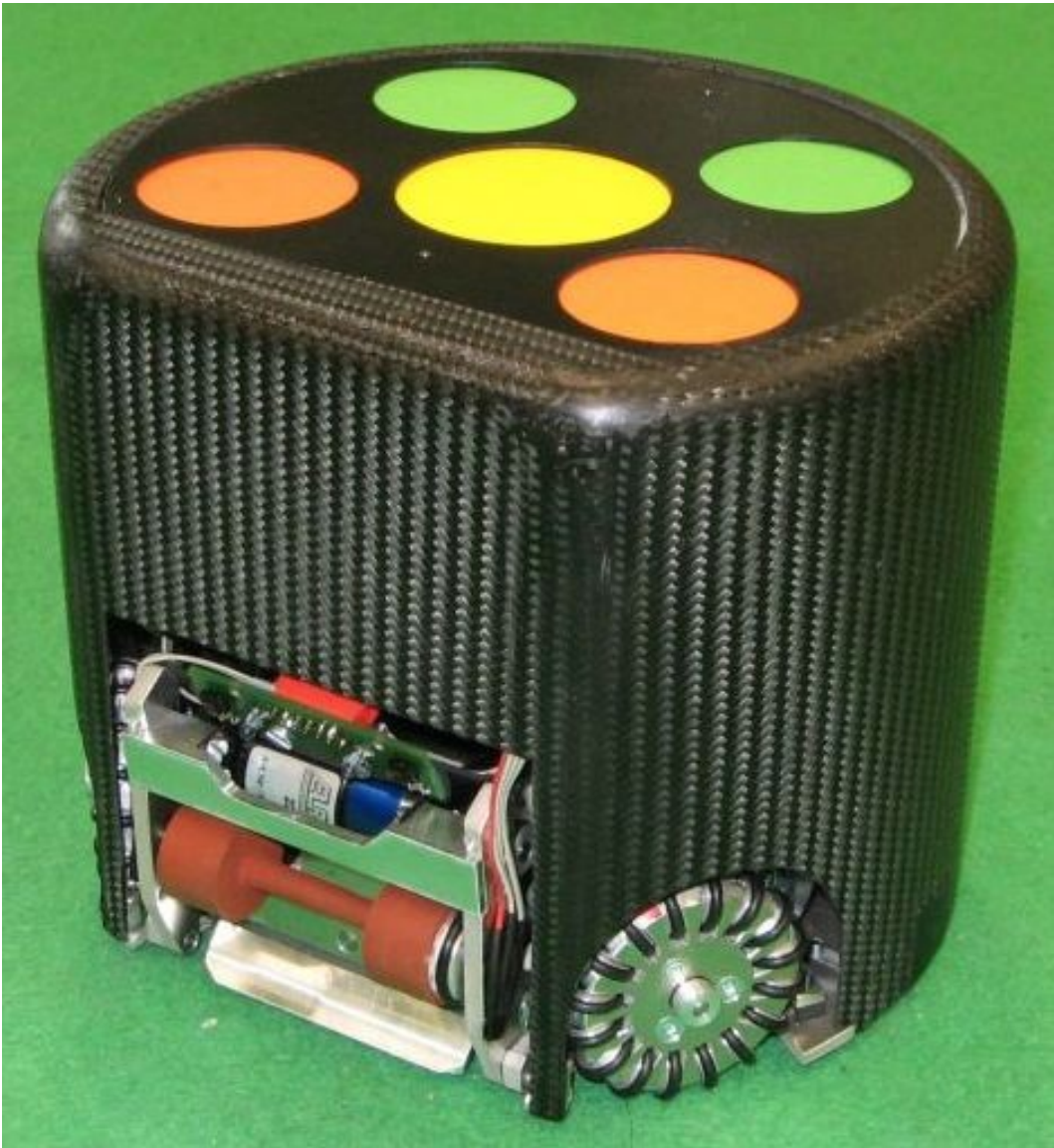


Abbildung 2.48: Foto des Roboters

3 Das Fahrwerk

Dieses Kapitel behandelt das omnidirektionale Rad (engl. Omniwheel), wie es in der SSL üblich ist. Der Schwerpunkt der Betrachtungen liegt auf der Geometrie. Mit Hilfe von Versuchen werden aber auch verschiedene Materialien getestet. Das Ziel ist die Erforschung des Omniwheels als solches und das Verhalten im Roboter. Generell kann man sagen, dass härtere, dünnere und scharfkantige Querräder mehr Reibung erzeugen können, da dann mehr Formschluss mit dem Untergrund entsteht [Cornell 2003 S.34ff]. Umgekehrt darf dabei der Untergrund, i.A. ein Teppich, nicht zerstört werden [Reglement 2009 S.7], wodurch selbige nicht verwendet werden können. Daher verwenden alle SSL-Teams O-Ringe als Querradmaterial.

Da bis jetzt von den Teams in der SSL nur Prinzipversuche durchgeführt worden sind, gilt es nun von einem typischen, gut funktionierenden Rad in der Liga auszugehen und dieses zu optimieren (ein typisches Rad hat einen Außendurchmesser von 50 – 60 mm und einen Querraddurchmesser zwischen 10 und 15 mm). Zusätzlich zum Verhalten des einzelnen Omniwheels soll auch bestimmt werden, wie das Verhalten des Roboters als Ganzes von diversen Parametern beeinflusst wird, um während der Konstruktionsphase eine Vorhersage darüber treffen zu können.

3.1 Lastenheft

Das Lastenheft beinhaltet zwei wesentliche Ziele. Zum einen soll der Grip des Roboters maximiert werden, um eine möglichst hohe Fahrleistung des Roboters zu ermöglichen. Zum anderen soll der Einfluss diverser Parameter erforscht werden. Diese Parameter sind:

- Raddurchmesser (D , siehe Abb. 3.1)
- Querraddurchmesser (D_q)
- Querraddicke (d_q)
- Querradmaterial
- Querradanzahl / Polygoneffekt (p)
- Gesamtmasse des Roboters (m)
- Schwerpunkthöhe (h)
- Schwerpunkt in x-Richtung (x_s , siehe Abb. 3.4 auf S.47)
- Öffnungswinkel der Räder vorne (α , siehe Abb. 3.3 auf S.46)
- Abhängigkeit von der Beschleunigungsrichtung (φ , siehe Abb. 3.3)

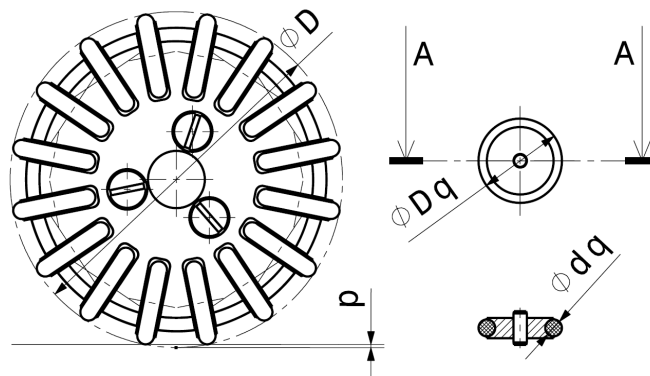


Abbildung 3.1: Radparameter

3.2 Theoretische Basis

Zuerst werden Überlegungen über das Verhalten des Rades und des Roboters angestellt.

3.2.1 Die Reibung

Für die Reibung wird zunächst folgender Zusammenhang angesetzt.

$$F_R = \mu * F_N$$

mit

F_R ... Reibkraft (F3.1)

μ ... Reibungskoeffizient

F_N ... Normalkraft

Dieser bedeutet, dass die Roboter­masse keinen Einfluss auf die Reibung hat. Dieser Zusammenhang gilt aber nur in einzelnen Fällen (z.B. Stahl-Aluminium) über einen großen Kraftbereich, während der Reibungskoeffizient für beliebige Normalkräfte bei weichen Stoffen im Allgemeinen nicht konstant bleibt [Popov 2009, S.136f].

Wenn ein Autoreifen zum Vergleich herangezogen wird, kann davon ausgegangen werden, dass der Reibungskoeffizient mit steigender Normalkraft sinkt, und somit eine leichtere Gesamtmasse von Vorteil ist [Leister 2009, S.128, Bild 8-31].

Der degressive Zusammenhang zwischen Radlast und Reibkraft könnte analog zum Pressverband erklärt werden. Beim Pressverband nimmt der Reibungskoeffizient durch das Fügen ab, da die Rauigkeitsspitzen abgetragen und plastisch verformt werden [Köhler Rög­nitz 1 2007, S.237]. Auch bei der Reibung könnten durch höhere Lasten die Rauigkeiten elastisch und plastisch verringert werden und damit auch der Reibungskoeffizient.

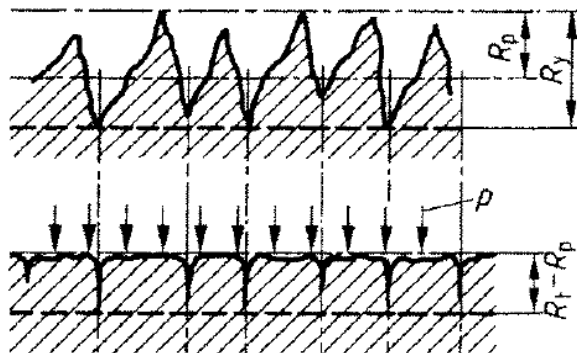


Abbildung 3.2: Verringerung der Rauigkeit durch Druckkraft [Köhler Rög­nitz 1 2007, S.237]

Daraus lässt sich außerdem ableiten: Wenn sich durch einen Beschleunigungsvorgang die Radlastverteilung ändert, werden die stärker belasteten Räder zwar einen kleineren Reibungskoeffizienten haben, aber durch die größere Normalkraft absolut gesehen trotzdem mehr Kraft übertragen können als die weniger belasteten Räder. Daraus folgt weiter, dass sich beim Beschleunigen die Radlaständerung nicht so stark auswirkt wie bei reiner Coulombscher Reibung, und somit die Schwerpunkthöhe unter Umständen nicht so stark einfließt wie man es zunächst erwarten könnte. Das Auftreten – auch von geringem Schlupf – ist (im Gegensatz zum PKW) deshalb besonders problematisch, da durch das omnidirektionale Fahrwerk der Roboter dann schlagartig seine Fahrtrichtung ändert.

3.2.2 Der Schwerpunkt

Um alle vier Räder gleich zu belasten, muss der Schwerpunkt in x- und in y-Richtung entsprechend gewählt werden. Aufgrund des größeren Öffnungswinkels der Räder vorne bedeutet das, dass der Schwerpunkt in x-Richtung etwas hinter dem Mittelpunkt liegen sollte. Durch einen symmetrischen Aufbau des Roboters um die Längsachse ergibt sich automatisch die richtige Lage des Schwerpunkts in y-Richtung.

Die Schwerpunkthöhe (z-Richtung) sollte möglichst gering sein, um beim Beschleunigen die Änderungen der Radlasten möglichst gering zu halten. Da die Beschleunigung durch die maximale Motorleistung begrenzt ist, ergibt sich daraus und aus der Geometrie des Roboters eine sogenannte Grenz-Schwerpunkthöhe. Liegt der Schwerpunkt darunter, hat er keine Auswirkung auf die Fahrleistung. Liegt er darüber, sind die Radlaständerungen so groß, sodass die maximal mögliche Beschleunigung abnimmt.

3.2.3 Das Omniwheel

Beim Omniwheel ist der einzige Parameter der Durchmesser. In Verbindung mit der Anzahl der Querräder ergibt sich daraus ein bestimmter Polygoneffekt. Neben den offensichtlichen Nachteilen eines größeren Polygoneffekts, nämlich höheren Vibrationen und größeren Kräfte, lässt sich die Auswirkung auf den Grip nicht direkt ableiten und soll durch Versuche bestimmt werden (siehe Kapitel 3.5).

Der Raddurchmesser hat aber noch eine zweite, indirekte Auswirkung. Da der Bauraum des Roboters durch das Reglement begrenzt ist, müssen die Räder bei einem größeren Durchmesser weiter innen angebracht werden. Daraus folgen zwei Nachteile: Zum einen in konstruktiver Hinsicht (es steht dadurch weniger Bauraum für die übrigen Teile zur Verfügung) und zum anderen werden die Radlaständerung beim Beschleunigen erhöht, was die Fahrleistung reduziert. Das bedeutet, dass die Räder möglichst weit außen angebracht werden sollten, und das funktioniert nur, wenn der Raddurchmesser minimiert wird.

3.2.4 Das Querrad des Omniwheels

Der entscheidende Faktor für den Grip ist immer die Paarung Untergrund – Rad, und somit hier die Paarung Teppich – Querrad des Omniwheels.

Als Querrad wird in der SSL typischerweise ein O-Ring verwendet. Das hat mehrere Gründe:

- O-Ringe sind in vielen verschiedenen Größen und auch Materialien erhältlich
- O-Ringe entsprechen dem Reglement
- O-Ringe sind billig im Vergleich zu selbst hergestellten Ringen

In Anlehnung an die Ergebnisse von Cornell [Cornell 2003 S.34ff], dass harte, scharfkantige Querräder mehr Grip erzeugen, lässt sich folgendes ableiten: Je dünner und größer der O-Ring des Querrades, desto mehr Grip wird erzeugt. Da aber Cornell nur Prinzipversuche durchgeführt hat, soll diese These zuerst durch Versuche bestätigt werden (siehe Kapitel 3.5).

Ein weiterer Parameter ist das Material des O-Rings. Während auf einem harten Untergrund ein weiches Material im Allgemeinen mehr Grip erzeugt (z.B. Autoreifen), kommt hier eine ähnlich gelagerte These zum Tragen: Härtere Querräder erzeugen mehr Grip, da der Untergrund in der SSL weich ist (Teppich). Also ebenfalls eine Paarung hart – weich. Diese These soll durch die Versuche geprüft werden.

3.3 Das Modell des Fahrwerks

Nun wird ein Modell des Roboters erstellt, welches für die nachfolgende Simulation geeignet ist. Der Roboter wird auf eine punktförmige Masse im Schwerpunkt reduziert und somit verbleiben für die Betrachtung die Masse und die vier Räder. Die Verbindung der vier Räder und der Masse wird als unendlich steif angesehen. Die geometrischen Zusammenhänge sowie die verwendeten Parameter sind in den Abbildungen 3.3 und 3.4 dargestellt. Die Radaufstandspunkte werden idealisiert in der Mitte des Rades angenommen.

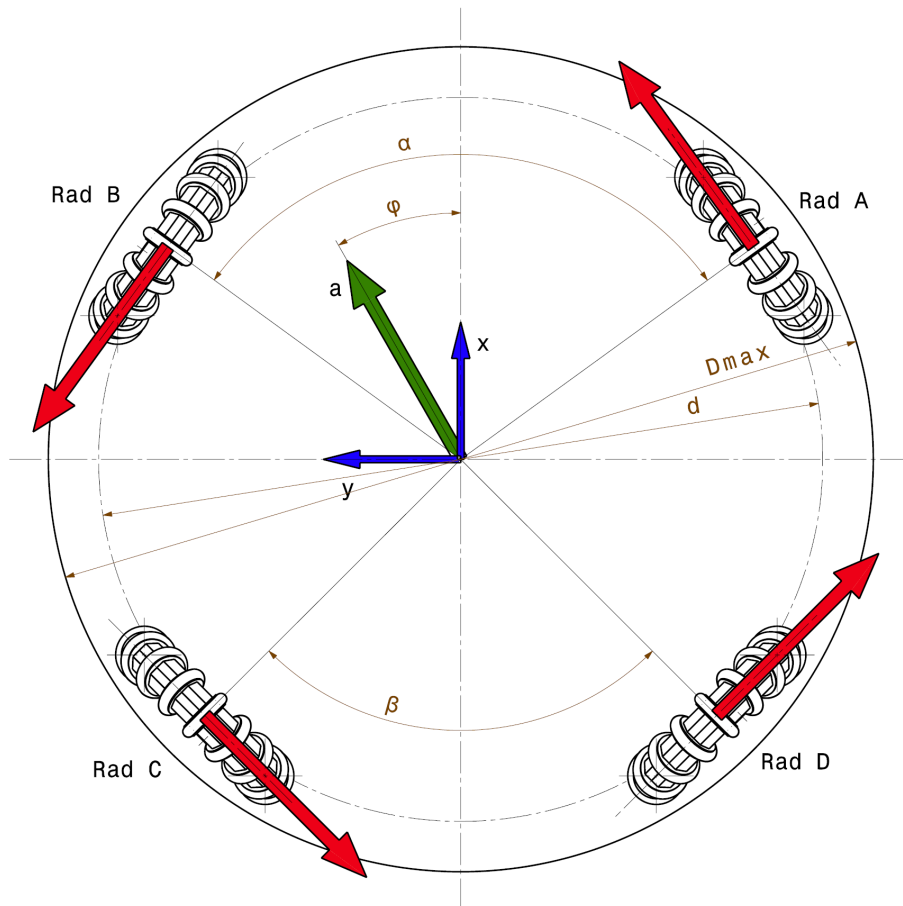


Abbildung 3.3: Definition Koordinatensystem, Kräfte und Geometrie

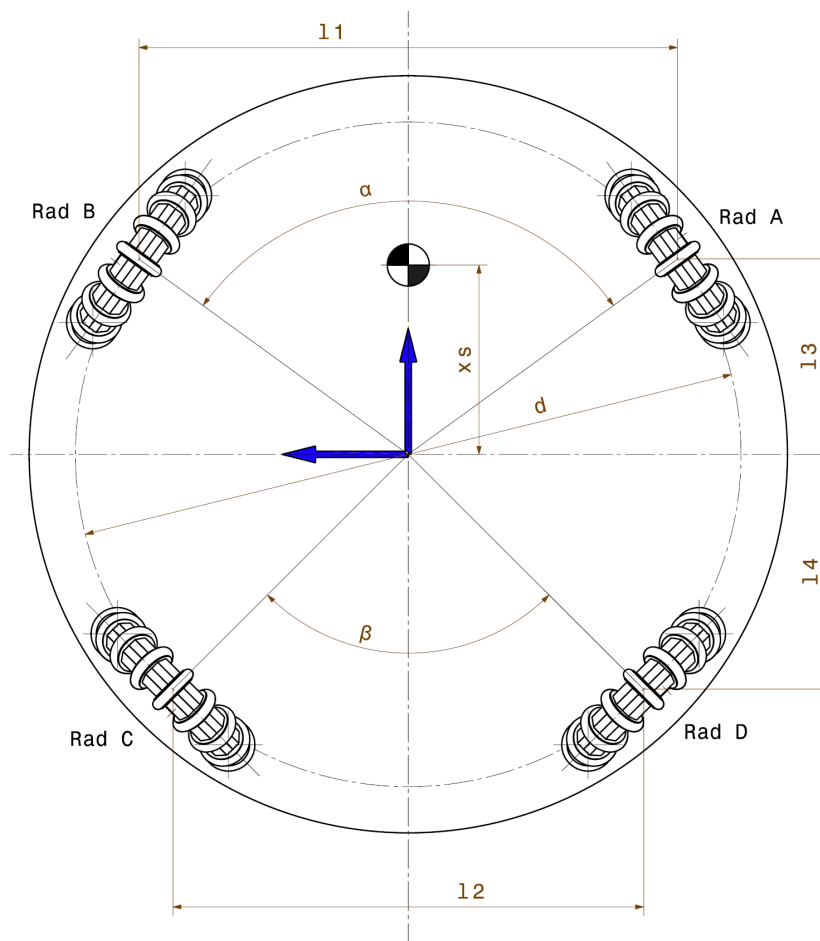


Abbildung 3.4: Geometrie des Modells

3.3.1 Betrachtung der Modellannahmen

Im folgenden werden sämtliche Annahmen für das in der Simulation verwendete Modell angeführt und betrachtet.

- ebener Untergrund: Da dieser Zustand auch bei den Tests sowie bei einer Weltmeisterschaft gegeben ist [Reglement 2009, S.2], entspricht diese Annahme im Prinzip der Realität.
- exakte Geometrie: Durch Fertigungstoleranzen sind die Räder natürlich nicht exakt auf dem Punkt und in die Richtung ausgerichtet, wie es im Modell angenommen wird. Da aber das Rad aufgrund seiner Geometrie und Auslegung ohnehin einen wechselnden Durchmesser aufweist (Polygoneffekt), sind die Fertigungstoleranzen im Vergleich dazu gering.
- ideales Omniwheel: Das heißt, dass das Rad zu keinem Zeitpunkt Querkräfte aufnehmen kann. In der Realität kommt es allerdings vor, dass bei einem kleinen Winkel zwischen der Rad-Längsachse und der Bewegungsrichtung des Roboters die Querräder blockieren [Cornell 2003, S.30], da die Lagerung der Querräder im Omniwheel nicht reibungsfrei ist. Da dadurch der Roboter in eine unerwünschte Richtung fährt, nicht aber der Grip (in der Rad-Längsrichtung) verändert wird, ist diese Annahme für die Untersuchung der Radreibung zulässig.
- Richtungsabhängigkeit der Reibung: Teppiche, die üblicherweise in der Liga als Spielfeld verwendet werden, haben Fasern, die leicht geneigt angeordnet sind (siehe Abb. 3.5). Dadurch ist bei kleinen Radaufstandskräften der erreichbare Grip in eine Richtung deutlich höher als in die gegenüberliegende. Um eine allgemeine Aussage über das Verhalten des Roboters treffen

zu können, wird für diese Simulation der Reibwert gemittelt, was eine starke Vereinfachung darstellt und eine Abweichung von bis zu 30 % bedeuten kann. Da aber immer zwei Räder des Roboters in eine gegenteilige Richtung orientiert sind, sollte sich dieser Fehler hinsichtlich der Fahrleistung herauskürzen.

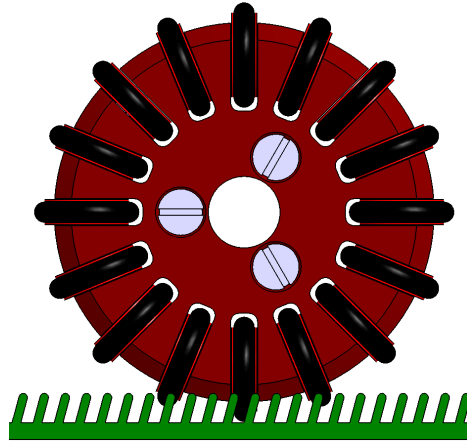


Abbildung 3.5: Darstellung der Richtungsabhängigkeit der Teppichfasern

- Der Reibungskoeffizient: Das Verhältnis von Reibkraft zur Radaufstandskraft ist nicht konstant und wird aus den Versuchen in Kapitel 3.5 in die Simulation übernommen. Diese Werte gelten somit nur für den verwendeten Teppich in den Versuchen sowie das verwendete Rad. Der Roboter wird sich auf einem anderen Teppichtyp zwar ähnlich verhalten, der absolute Wert der Ergebnisse kann für diesen Fall aber nicht vorhergesagt oder aus den dargestellten Ergebnissen abgeleitet werden.
- Sämtliche darüber hinausgehende Reibung, wie z.B. die Rollreibung, die Lagerreibung usw. wird vernachlässigt. Das beeinflusst oder verfälscht die Simulation nicht, da diese Verluste durch den Elektromotor ausgeglichen werden müssen, welche in dieser Arbeit aber nicht betrachtet werden. (Will man dann das notwendige Drehmoment für den Elektromotor berechnen, muss das im Folgenden berechnete Moment um diese Verluste erhöht werden.)

3.4 Berechnung und Simulation

Um das Fahrwerk simulieren zu können, wird ein Matlab-Programm erstellt. Dieses Programm berechnet einerseits die Eigenschaften einer bestimmten Roboter- und Radgeometrie und erlaubt andererseits eine Parametervariation der wichtigsten Faktoren.

Gesucht und berechnet wird im Allgemeinen immer der Punkt, bei dem das Rad gerade noch nicht durchdreht. Der Übergang von Haft- zu Gleitreibung wurde als der Punkt bestimmt, ab dem das Rad eine messbare Drehzahl aufweist. Das heißt es wird nicht untersucht, wie sich der Roboter in einem bestimmten Zustand verhält, sondern wie groß die Beschleunigung unter bestimmten Bedingungen werden kann, damit sich der Roboter noch "ideal" verhält (keine Räder durchdrehen).

Dies ist zentral, da durchdrehende Räder dazu führen, dass der Roboter in eine unerwünschte Richtung fährt. Weiters muss die künstliche Intelligenz diesen maximalen Wert kennen, damit sie die richtigen Entscheidungen treffen kann (zum Beispiel, ob der Roboter die gewünschte Position überhaupt erreichen kann oder nicht).

Daher wird in der Simulation auch nur der Bereich der Haftreibung betrachtet, da Schlupf auch in der Praxis nicht zugelassen wird.

3.4.1 Das Simulationsprogramm

Im Folgenden wird das Simulationsprogramm von den Anforderungen über die Ausführung bis hin zur Verifikation beschrieben.

3.4.1.1 Anforderungen an das Programm

- Das Ziel ist die Bestimmung des Beschleunigungspotentials des Roboters
- beliebige Robotergeometrie wählbar
- beliebige Radgeometrie wählbar
- Vergleich verschiedener Varianten
- Parametervariation von Schwerpunktlage, Schwerpunkthöhe und Roboter Masse
- Ausgabe der Ergebnisse in übersichtlichen Grafiken
- Kontroll- und Testfunktionen um die Plausibilität der Ergebnisse prüfen zu können

3.4.1.2 Die Rückwärtskinematik

Zunächst muss ein Verfahren bestimmt werden, mit dessen Hilfe die erforderlichen Radkräfte aus der gewünschten Beschleunigungsrichtung abgeleitet werden können: Die Rückwärtskinematik.

Eingangsgrößen für eine allgemeine Bewegung des Roboters sind ein Geschwindigkeitsvektor in der Ebene (x, y) und die gewünschte Winkelgeschwindigkeit des Roboters um seine Hochachse (r) . Daraus müssen dann die vier Radgeschwindigkeiten berechnet werden (siehe Abb. 3.6).

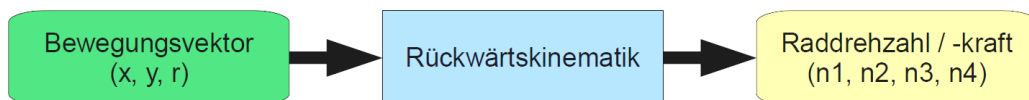


Abbildung 3.6: Schema Rückwärtskinematik

Die Bestimmung der Raddrehzahlen für eine reine Rotation ist ein einfach zu lösendes Problem, da alle vier Räder auf einem Kreis angeordnet sind (siehe Abb. 3.4). Für eine Rotation um die Roboterachse müssen sich alle Räder mit derselben Geschwindigkeit in dieselbe Richtung drehen und zur Berechnung müssen lediglich der Durchmesser des Rades und deren Abstand zum Mittelpunkt berücksichtigt werden. Will man Translation und Rotation überlagern, werden die berechneten Raddrehzahlen aus Translation und Rotation aufaddiert.

Die Berechnung der Raddrehzahlen für die Translation hingegen bedarf besonderer Aufmerksamkeit, insbesondere aufgrund der Tatsache, dass der Roboter vier Räder hat. Die Lösung dafür wurde aus Rojas 2005, S.13ff entnommen, wobei von Geschwindigkeiten auf Beschleunigungen umgerechnet wird, da für die Untersuchung der Reibung die Kraft und nicht die aktuelle Geschwindigkeit relevant ist.

Zur Rotation ist anzumerken, dass diese bei den folgenden Simulationen aus drei Gründen immer Null sein wird. Erstens lässt sie sich leicht überlagern, möchte man eine zusammengesetzte Bewegung aus Translation und Rotation berechnen. Zweitens spielen die Geometrie des Roboters und dessen Parameter hier nur eine untergeordnete Rolle, da z.B. während einer reinen Rotation keine Radlaständerungen auftreten, die die Haftung des Roboters beeinflussen könnten. Drittens ist in einem Spiel in der SSL eine überlagerte Rotation in Relation zur Translation relativ klein. Trotz allem darf natürlich bei der Übertragung der Ergebnisse auf den Roboter nicht vergessen werden, die "erlaubte" oder erreichbare translatorische Beschleunigung um den Wert zu reduzieren, den die Rotation im Falle einer überlagerten Bewegung benötigt, damit auch bei einer überlagerten Bewegung die Räder des Roboters nicht durchdrehen.

3.4.1.3 Ausführung

Das Simulationsprogramm wurde von "innen nach außen" entwickelt, programmiert und getestet.

In der innersten Schleife wird für eine bestimmte Beschleunigungsrichtung φ und einen bestimmten Beschleunigungswert a berechnet, ob der Roboter aufgrund des limitierenden Faktors Reibung durchdrehende Räder hätte oder nicht. Diese Schleife wird so lange durchlaufen, bis der Grenzwert, bei dem die Räder gerade nicht durchdrehen, bestimmt ist (siehe Abb. 3.7).

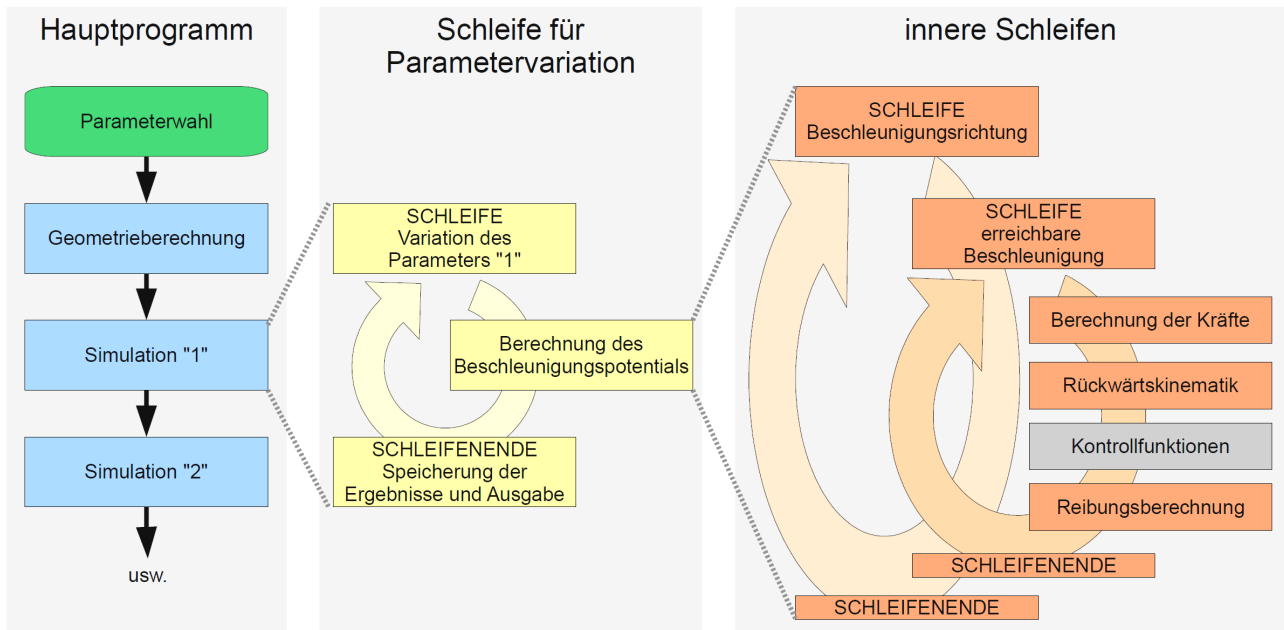


Abbildung 3.7: Programmschema des Fahrwerksimulationsprogramms

Eine Ebene darüber liegt die Beschleunigungsrichtung, das heißt, die innerste Schleife wird einmal für jede Beschleunigungsrichtung durchlaufen. Diese Schleife ist gleichzeitig auch ein Unterprogramm, da sie für jede Parametervariation identisch ist und von sämtlichen Simulationen aufgerufen wird.

Die Schleife für die Parametervariation durchläuft dann den zu untersuchenden Parameter in einem bestimmten Bereich, zum Beispiel die Schwerpunkthöhe, und ruft für jede Schwerpunkthöhe die untergeordnete Berechnung auf.

Im Hauptprogramm werden zunächst die gewünschten Parameter für die Simulation gesetzt. Im nächsten Schritt werden allgemeine Geometrieberechnungen durchgeführt, wie zum Beispiel die statischen Radaufstandskräfte oder die Matrix für die Rückwärtskinematik. Danach wird eine Simulation nach der anderen aufgerufen, zum Beispiel die Variation der Schwerpunkthöhe oder die Variation der Roboter Masse.

Der Quellcode befindet sich im Anhang S.A24ff.

3.4.1.4 Die Tests

In der innersten Schleife befinden sich auch Kontrollfunktionen (in Abb. 3.7 grau dargestellt). Diese berechnen im Wesentlichen aus den Ergebnissen der Simulation mit Hilfe der Vorwärtskinematik die Startwerte. Sind die Ergebnisse aus dem Test gleich der im Programm vorgegebenen Startwerte, hat das Programm richtig gerechnet. Diese Funktionen werden nach ausgiebigen Programmtests für die folgenden Simulationen abgeschaltet, um die Rechenzeit zu verkürzen.

3 Das Fahrwerk

Weiters wurde auch die notwendige Schrittweite für die einzelnen Simulationen bestimmt. Eine zu große Schrittweite liefert ungenaue Ergebnisse, während eine zu kleine die Simulationsdauer stark verlängert. In den Grafiken 3.8 und 3.9 lässt sich beispielhaft ablesen, ab welcher Schrittweite das Ergebnis ungenau wird. Es ist jeweils die erreichbare Beschleunigung des Roboters über dem Winkel (siehe Abb. 3.8) bzw. über der Schwerpunktlage (siehe Abb. 3.9) aufgetragen. Für die Versuche wird dann die größtmögliche Schrittweite, bei der die Genauigkeit gerade noch ausreicht, gewählt. Das sind beispielsweise im Falle des Beschleunigungsprofils 5° .

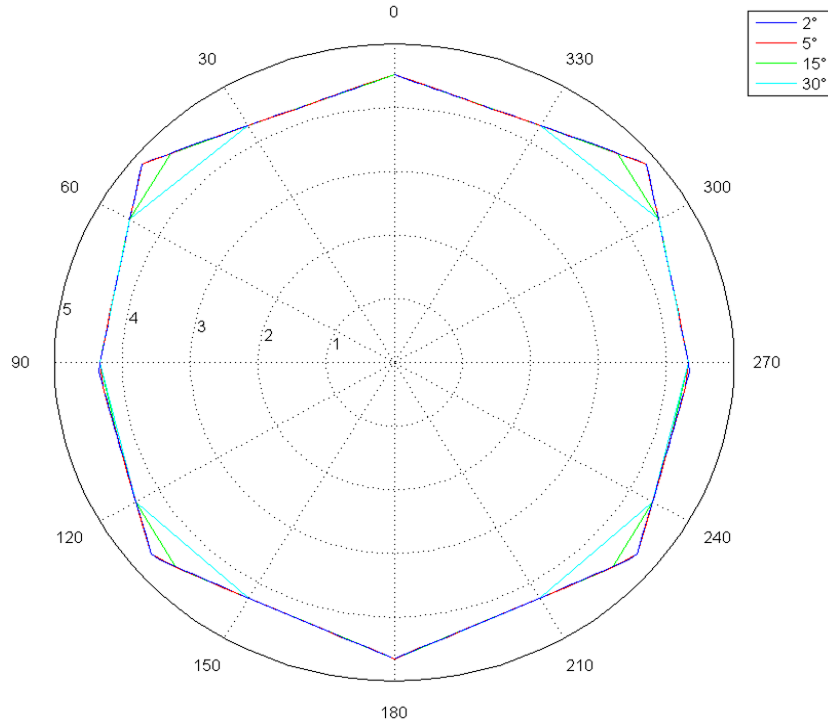


Abbildung 3.8: Auswirkung der Schrittweite auf das Beschleunigungsprofil, $a=f(\varphi)$

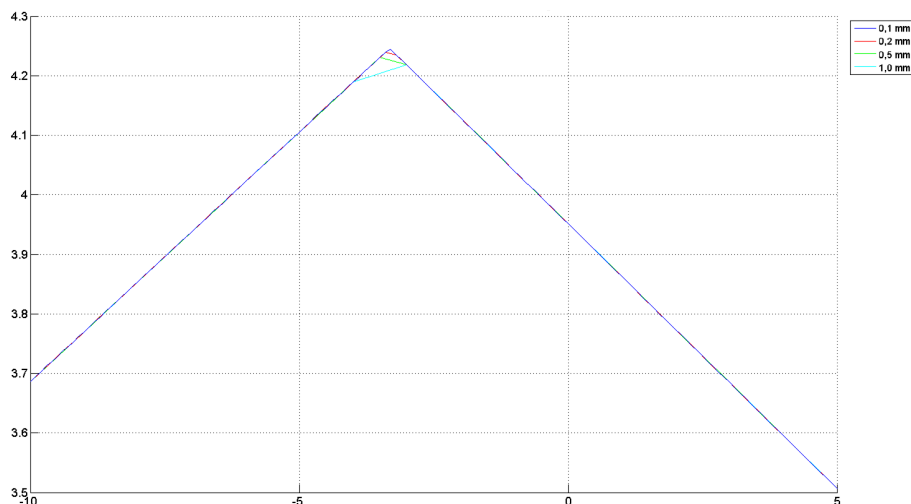


Abbildung 3.9: Auswirkung der Parameterschrittweite bei der Schwerpunktlage, $a=f(xs)$

3.4.1.5 Die Reibungskoeffizienten

An dieser Stelle wird auf das Kapitel 3.5 vorgegriffen und die Ergebnisse aus den Reibungsversuchen kurz zusammengefasst. Zwar wird ein Großteil der Simulationen vor den

Versuchen durchgeführt und es können auch ohne empirische Daten aus der Reibung viele Erkenntnisse gewonnen werden, jedoch werden im Folgenden der Übersichtlichkeit halber diese gleich mit den realen Daten verglichen.

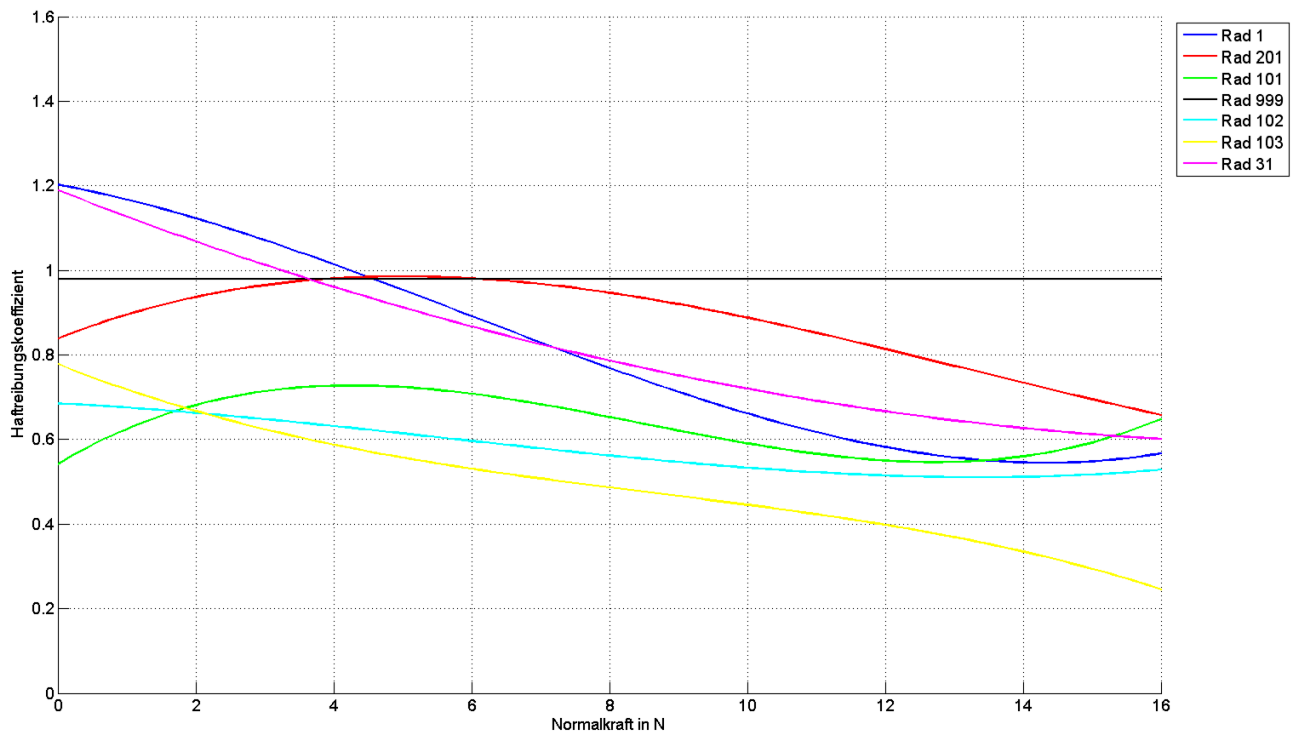


Abbildung 3.10: Haftreibungskoeffizienten verschiedener Omniwheels, Versuchsergebnisse.

Rad Nr.	D mm	Dq mm	dq mm	O-Ring Norm	Querräder #	p mm	Anmerkungen Zweck der Untersuchung
1	50	12,5	2,5	7,5x2,5 NBR 70	16	0,48	im Roboter verwendet
31	50	12,5	2,5	7,5x2,5 NBR 70	13	0,73	wie 1 mit mehr Polygoneffekt
101	50	10	2	6x2 NBR 70	16	0,48	kleinerer O-Ring
102	50	10	2	6x2 NBR 80	16	0,48	dient dem Materialvergleich
103	50	10	2	6x2 VMQ	16	0,48	dient dem Materialvergleich
201	50	13,5	3	7,5x3 NBR 70	16	0,48	breiterer O-Ring
999							Mittelwert von Rad 1, virtuell

Tabelle 3.1: Liste der untersuchten Omniwheels

In der Abbildung 3.10 sind die Versuchsergebnisse aller untersuchten Räder eingezeichnet sowie das Rad mit der Nummer "999". Dieses Rad stellt den Mittelwert des Haftreibungskoeffizienten von Rad "1" in dem Bereich dar, in dem es typischerweise betrieben wird (Normalkraft von 2,5 bis 7,5 N). Da das Rad "1" das im Roboter verbaute ist, dient in diesem Fall das Rad "999" dazu, den Unterschied zwischen einem idealisierten und dem realen Haftreibungskoeffizienten zu betrachten.

3.4.2 Simulation über den Einfluss der Roboter Masse

Als Robotergeometrie wird für alle Simulationen jene aus dem Serienroboter verwendet (siehe Tab. 3.2). Als Vergleich dient das Rad "999" mit dem konstanten Haftreibungskoeffizienten. Bei diesem Rad ist der Einfluss der absoluten Roboter Masse logischerweise Null (Coulombsche Reibung). Die

3 Das Fahrwerk

realen Räder zeigen hingegen eine abfallende Tendenz mit steigender Radaufstandskraft (siehe Abb. 3.10), somit besteht zwischen der Roboter­masse und der erzielbaren Beschleunigung ein Zusammenhang.

Randbedingung	Wert
Öffnungswinkel der Vorderräder	108 °
Schwerpunkthöhe	40 mm
Durchmesser der Radmittelpunkte	ideal gewählt für jedes Rad
Schwerpunkt in x-Richtung	ideal gewählt für jedes Rad

Tabelle 3.2: Die wichtigsten Randbedingungen der Roboter­masse-Simulation

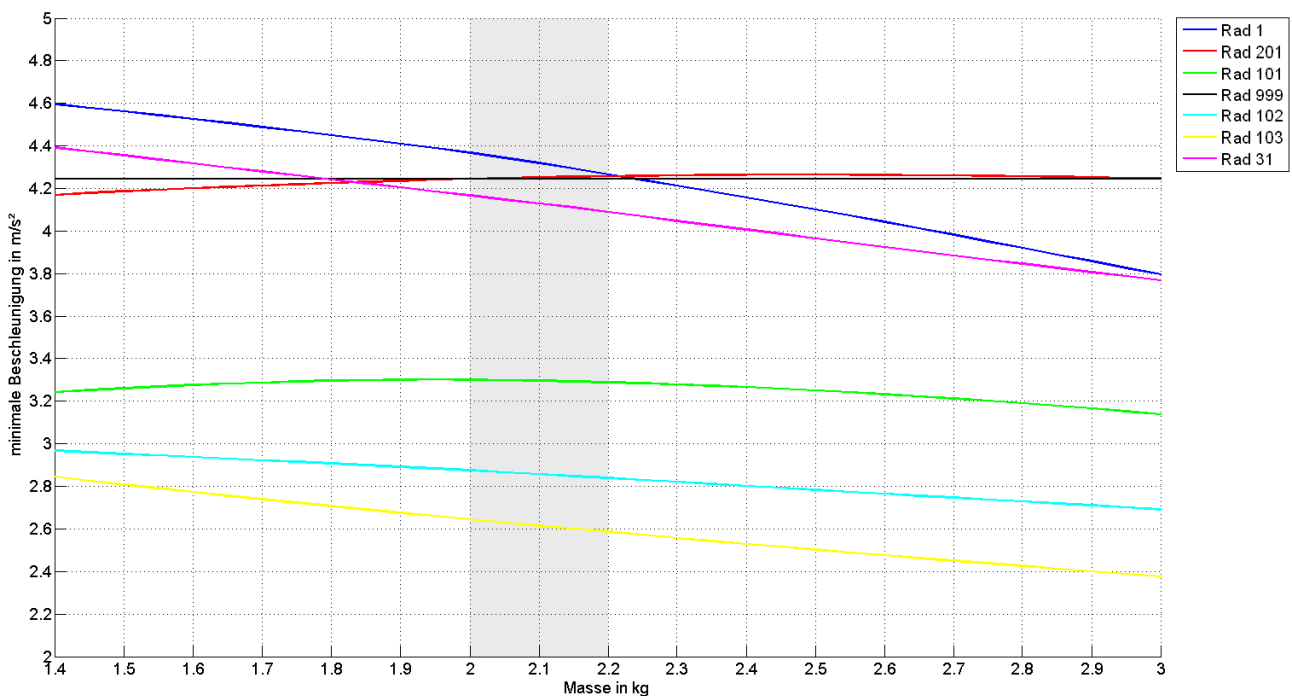


Abbildung 3.11: Simulation $a_{min}(m)$ min. Beschleunigung in Abhängigkeit der Roboter­masse

In der Abbildung 3.11 sind die Ergebnisse des Einflusses der Roboter­masse zusammengefasst. Der aufgetragene Wert ist die minimale Beschleunigung, also das Minimum aus allen Beschleunigungsrichtungen. Es gibt daher Richtungen, die eine höhere Beschleunigung erlauben. Da aber der Roboter in alle Richtungen gleich gut funktionieren soll und vor allem in der künstlichen Intelligenz nicht auf einzelne Fälle, die vielleicht besser funktionieren, eingegangen werden kann, ist das der Wert, der nicht nur in der Simulation sondern auch im realen Roboter als Parameter verwendet wird.

Als erstes wird der Punkt bei einer Masse von etwa 2,25 kg betrachtet. Ist der Roboter schwerer, erreicht das Rad "201" bessere Beschleunigungswerte, darunter das Rad "1". Da als Zielgewicht 2 kg geplant sind und schließlich 2,1 kg erreicht werden ist das Rad "1" das beste, und dieses wird auch für den Roboter gewählt.

Weiters erkennt man, dass bei der Verwendung von Rad "1" jegliche Gewichtsersparnis eine Leistungssteigerung bewirkt, weshalb konsequenter Leichtbau sinnvoll ist. Weist der Roboter ein Gesamtgewicht zwischen 2 und 2,2 kg auf (siehe Abb. 3.11, grauer Bereich), kann die erreichbare Beschleunigung pro gesparten 100 Gramm um 1,2 % gesteigert werden. Das scheint zunächst nicht

3 Das Fahrwerk

besonders viel, aber in der Summe der möglichen Maßnahmen, die sich aus den folgenden Simulationen ergeben werden, wird das Verbesserungspotential recht beachtlich. Eine geringere Masse bedeutet außerdem einen geringeren Energieverbrauch, was in dieser Simulation zwar unberücksichtigt bleibt, jedoch insgesamt einen entscheidenden Effekt auf die Roboterleistung hat, da weniger Akkukapazität verbaut werden kann, wodurch die Kosten sinken und auch die Robotermaße weiter reduziert wird.

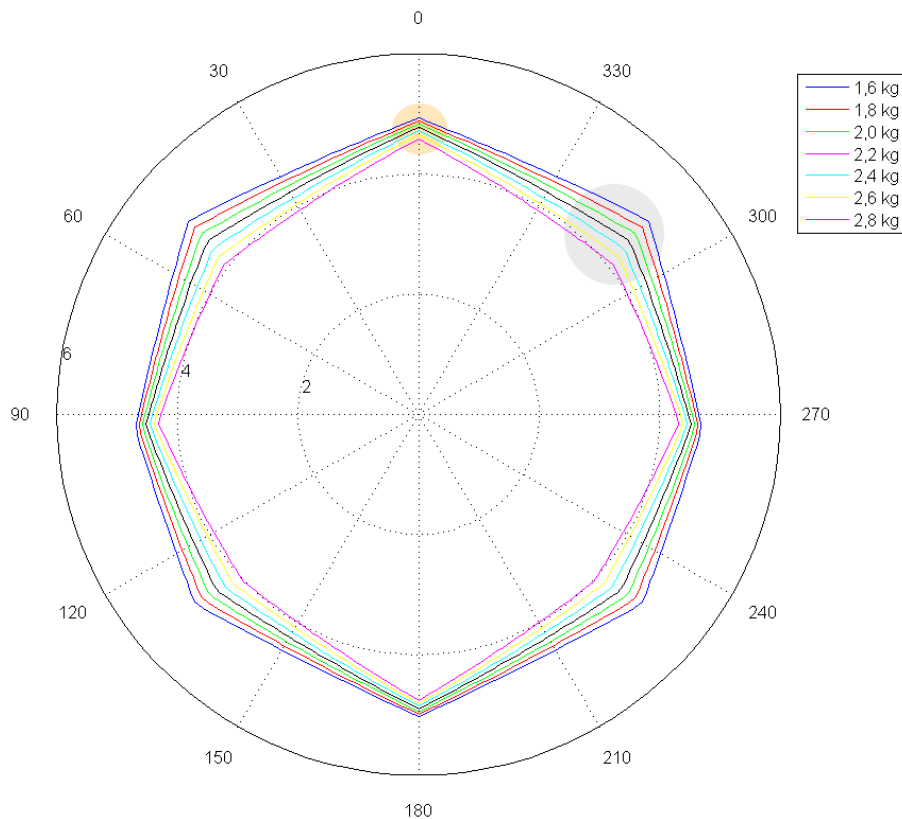


Abbildung 3.12: Beschleunigungsprofil von Rad "1" bei verschiedenen Roboter Massen

Aufgrund der annähernden Symmetrie des Roboters und dessen Fahrwerkseigenschaften werden zur Vereinfachung folgende Begriffe definiert:

- Der Begriff *90°-Richtungen* umfasst die Beschleunigungsrichtungen 0°, 90°, 180° und 270°.
- Der Begriff *45°-Richtungen* umfasst die Beschleunigungsrichtungen 45°, 135°, 225° und 315°.

Abbildung 3.12 zeigt das Beschleunigungsprofil für das Rad "1" bei verschiedenen Massen. Daraus lässt sich ableiten, dass der Einfluss der Robotermaße nicht auf jede Beschleunigungsrichtung gleich ist. Vielmehr ist er in Richtungen, in die alle vier Räder antreiben (90°-Richtungen, gelb markiert), geringer. In die 45°-Richtungen (grau markiert) hingegen wirkt sich die Masse stärker auf das Beschleunigungspotential aus (siehe auch Abb. 2.16 auf S.19).

Das wird folgendermaßen interpretiert: Während in die 45°-Richtungen zwei Räder antreiben und diese mit steigender Normalkraft in Relation immer weniger Reibung erzeugen, tritt in die 90°-Richtungen folgender Effekt ein:

- Durch die Radlaständerung beim Beschleunigen werden die vorderen Räder entlastet.
- Das sind somit die ersten Räder, die durchdrehen würden, und definieren daher das Beschleunigungslimit.

- Genau diese Vorderräder können nun in Relation wieder etwas mehr Kraft übertragen, da der Reibwert mit sinkender Normalkraft steigt.

Daher wirkt sich die Änderung der Gesamtmasse in diese Beschleunigungsrichtungen nicht so stark aus. Dieses Ergebnis gilt aber, wie eingangs erwähnt, nur für die Geometrie des Serienroboters. Deshalb wird an dieser Stelle auch der Zusammenhang mit der Schwerpunkthöhe erwähnt. Gelingt es diesen von den 40 mm im aktuellen Roboter beispielsweise auf 20 mm abzusenken, so ändert sich auch der Bereich, in dem das Rad "1" ein besseres Beschleunigungspotential hat als das Rad "201" (siehe Abb. 3.13).

Wird der Schwerpunkt gesenkt, die Masse aber beibehalten, wäre nun das Rad "201" besser (grauer Bereich), liegt die Masse unter 1,9 kg bleibt das Rad "1" die bessere Wahl.

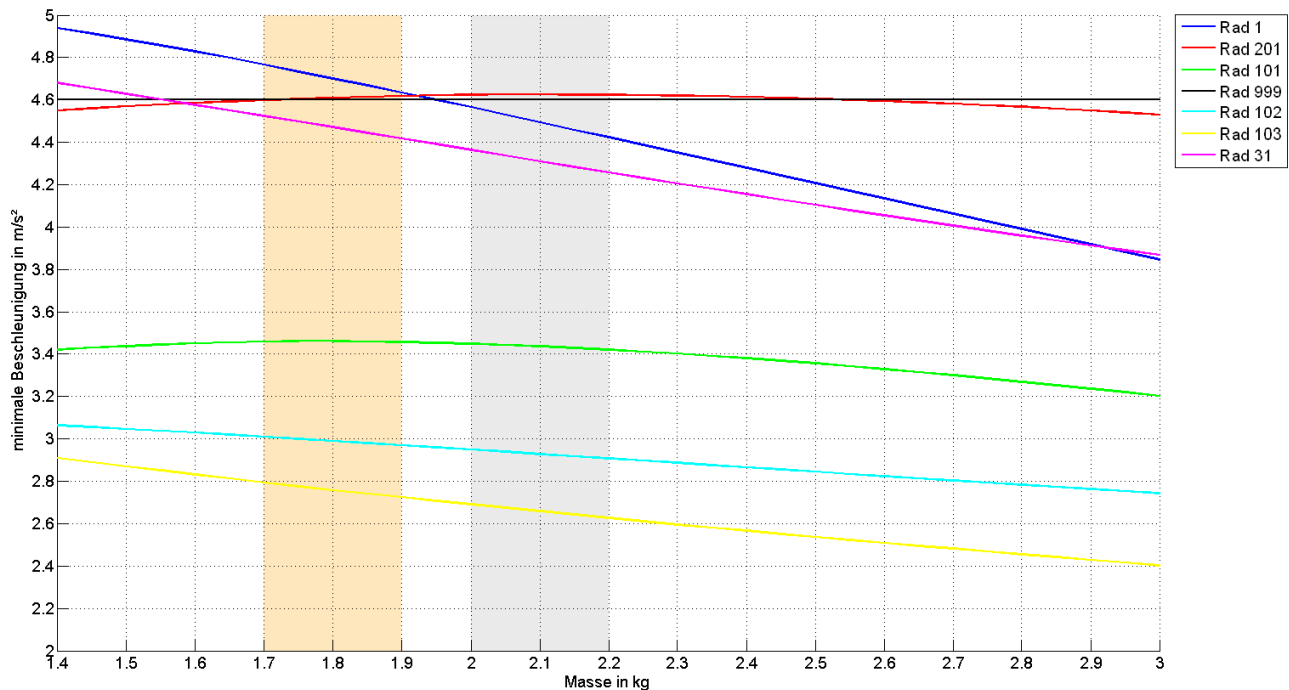


Abbildung 3.13: Simulation $a_{min}(m)$ mit Schwerpunkthöhe 20 mm

3.4.3 Simulationen über den Einfluss der Schwerpunkthöhe

Im nächsten Schritt wird der Einfluss der Schwerpunkthöhe unter den verschiedensten Gesichtspunkten simuliert und erörtert.

Randbedingung	Wert
Öffnungswinkel der Vorderräder	108 °
Roboter masse	2 kg
Durchmesser der Radmittelpunkte	ideal gewählt für jedes Rad
Schwerpunkt in x-Richtung	ideal gewählt für jedes Rad

Tabelle 3.3: Die wichtigsten Randbedingungen der Schwerpunkthöhen-Simulation

Als erstes werden mit den Randbedingungen des Serienroboters sämtliche Räder unter dem Einfluss einer variierenden Roboter masse betrachtet. Generell lässt sich sagen, dass bis zu einer Schwerpunkthöhe von 16 bis 20 mm (siehe Abb. 3.14, grauer Bereich) selbige keinen großen Einfluss besitzt, wobei dies von den Eigenschaften des Rades unabhängig ist. Gleichzeitig spielt bei

den Rädern, die an sich eher wenig Grip erzeugen (Räder "101", "102" und "103"), auch die Schwerpunkthöhe eine geringere Rolle.

Für die Auslegung des Roboters ist nun der Punkt bei einer Schwerpunkthöhe von etwa 26 mm (gelber Bereich) interessant. Es ist zu erkennen, dass bei einem niedrigeren Schwerpunkt das Rad "201" mehr Grip erzeugen kann, bei einem höheren Schwerpunkt das Rad "1".

Dass das Rad "1" trotz eines hohen Schwerpunkts immer noch einen guten Grip liefern kann, liegt an der bereits mehrfach erwähnten Tatsache, dass es gerade bei geringen Radlasten einen hohen Reibungskoeffizienten aufweist. Diese wiederum treten insbesondere beim Beschleunigen mit einem hohen Schwerpunkt auf.

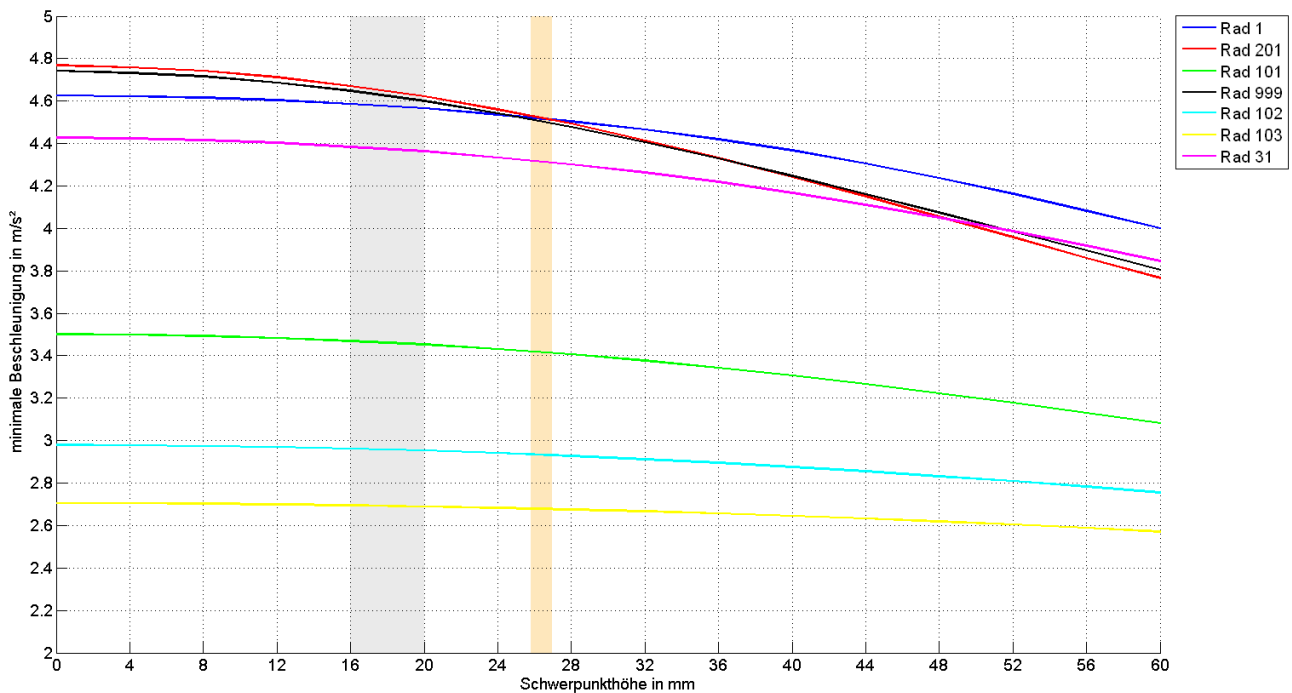


Abbildung 3.14: Simulation $a_{min}(h)$ min. Beschleunigung in Abhängigkeit der Schwerpunkthöhe

Insgesamt ist auch aus dieser Simulation abzuleiten, dass trotz unterschiedlicher Eigenschaften der Räder ein niedrigerer Schwerpunkt in jedem Fall besser ist, was sich auch mit den Annahmen aus Kapitel 3.2.2 deckt. Die dort angesprochene "Grenz-Schwerpunkthöhe", das heißt eine Höhe unter der der Schwerpunkt fast irrelevant wird, kann hieraus nicht abgeleitet werden, da zu keinem Zeitpunkt eine Beschleunigung erreicht werden könnte (8 m/s^2), die durch die Leistung des Roboters möglich wäre.

In der Abbildung 3.15 wird das Beschleunigungspotential in alle Richtungen von Rad "1" dargestellt. Hier ist zu erkennen, dass die Schwerpunkthöhe in die 45° -Richtungen (gelber Bereich) annähernd keine Auswirkungen hat. Wäre der Öffnungswinkel der vorderen Räder genau 90° (und nicht 108°) wäre sie sogar exakt Null, da dann die zwei Räder, die für die Beschleunigung in diese Richtung verantwortlich sind, exakt in der Querachse dieser liegen und somit keine Radlaständerung beim Beschleunigen entsteht. Die in diese Richtungen erreichbare Beschleunigung begrenzt demnach die insgesamt erreichbare minimale Beschleunigung.

Bei Betrachtung der 90° -Richtungen ist zu erkennen, dass unter einer Schwerpunkthöhe von etwa 45 mm diese Beschleunigung ebenfalls erreicht werden kann (grauer Bereich in Abb. 3.15). Zunächst kann argumentiert werden, dass der Schwerpunkt keine Rolle mehr spielt, sobald in die 90° -Richtungen die gleiche Beschleunigung erreicht werden kann, wie in die 45° -Richtungen. Das

3 Das Fahrwerk

Problem ist jedoch der Bereich zwischen den 45°- und 90°-Richtungen, da das Beschleunigungsprofil kein Kreis ist, sondern annähernd aus Kreisbögen zusammengesetzt ist, die diese Punkte verbinden. Dadurch ist die erzielbare Beschleunigung z.B in die 30°-Richtung deutlich geringer und damit bleibt die Schwerpunkthöhe in jedem Fall relevant.

Dass das Profil zwischen den 45°- und 90°- Richtungen annähernd eine Gerade ist, hat nichts mit Rechenungenauigkeiten zu tun. Vielmehr kommen in diesem Bereich zwei negative Effekte gleichzeitig zum Tragen (siehe Tab. 3.4) und drücken somit den Wert hinunter bzw. umgekehrt formuliert: Keiner der positiven Effekte in den speziellen Richtungen kommt hier zum Tragen.

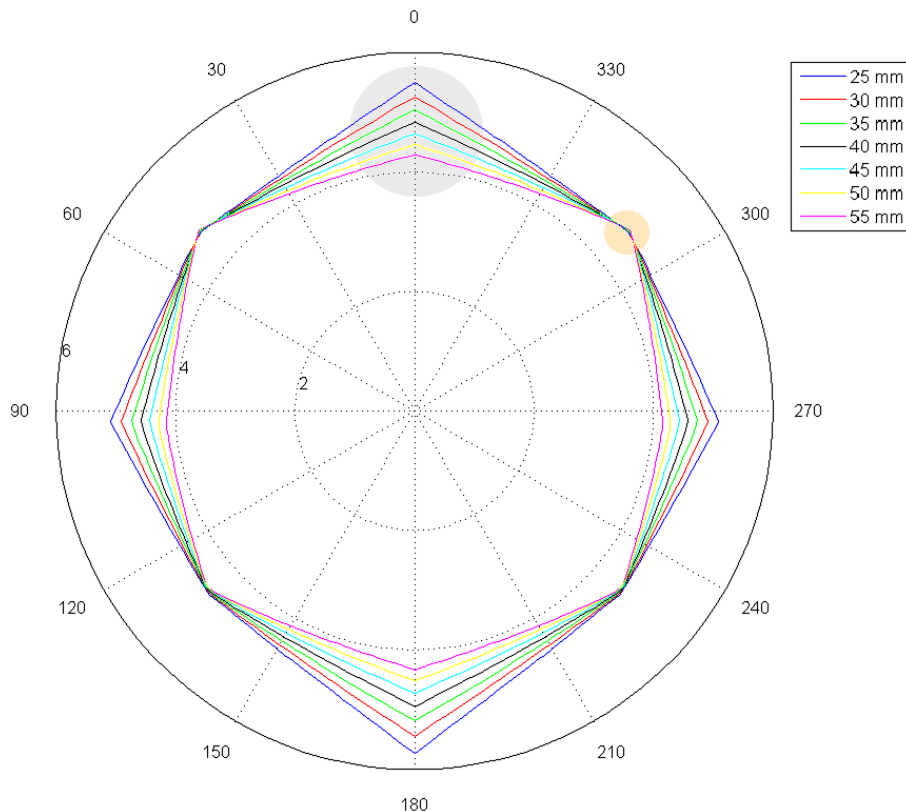


Abbildung 3.15: Beschleunigungsprofil Rad "1" bei verschiedenen Schwerpunkthöhen

Beschleunigungsrichtung	Räder im Eingriff	Schwerpunkthöhe
0°, 90°, 180°, 270°	+ (alle 4)	- (großer Einfluss)
dazwischen	- (zwischen 2 und 4)	- (mittlerer Einfluss)
45°, 135°, 225°, 315°	- (nur 2)	+ (kein Einfluss)

Tabelle 3.4: Bewertung der Einflüsse auf verschiedene Beschleunigungsrichtungen

Im nächsten Schritt wird das Rad "1" mit dem virtuellen, idealisierten Rad "999" verglichen (siehe Abb. 3.16). Es zeigt sich, dass der qualitative Verlauf des Beschleunigungsprofils gleich bleibt. Daraus kann abgeleitet werden, dass der Verlauf des Haftreibungskoeffizienten und im weiteren Sinne die Radeigenschaften hier kaum eine Rolle spielen, sondern der Verlauf des Beschleunigungsprofils hauptsächlich von der Robotergeometrie abhängt.

3 Das Fahrwerk

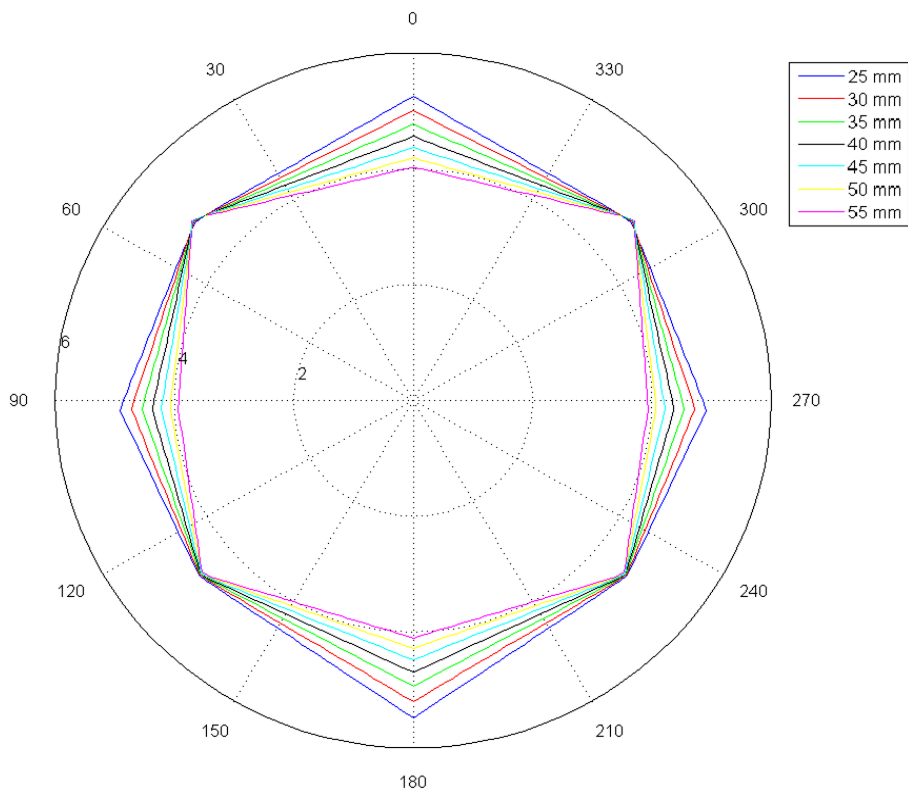


Abbildung 3.16: Beschleunigungsprofil Rad "999" bei verschiedenen Schwerpunkthöhen

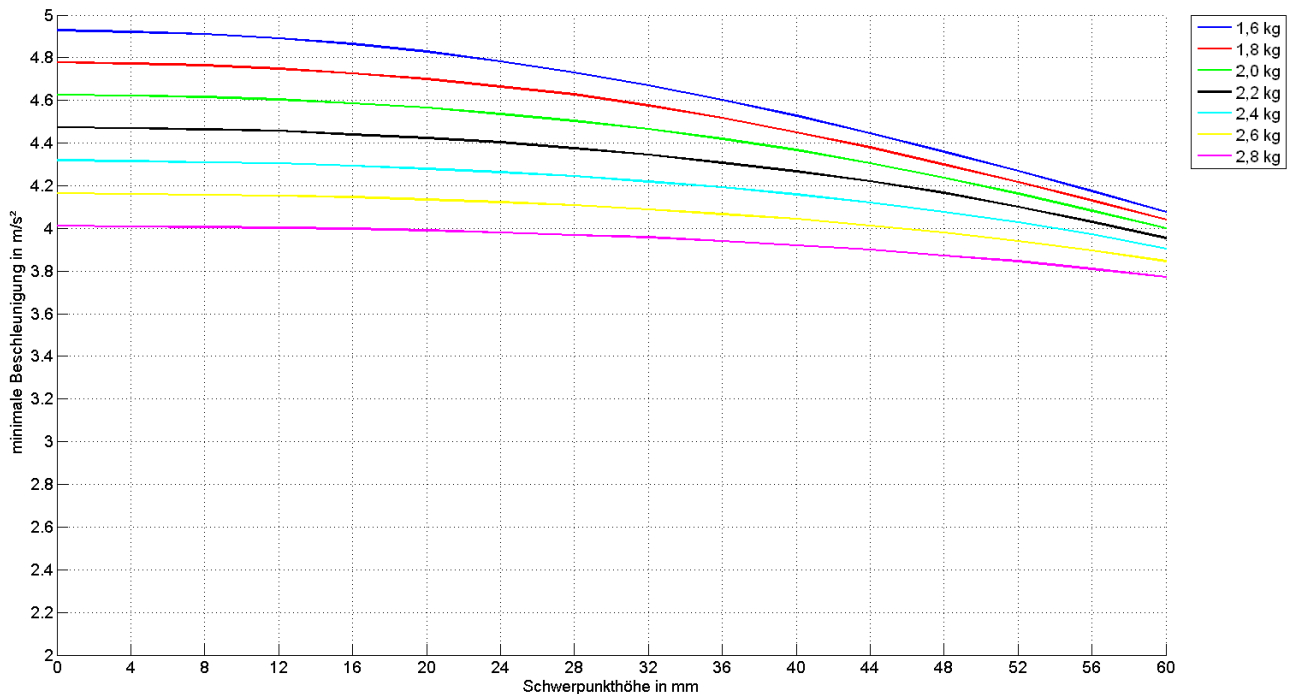


Abbildung 3.17: $a_{min}(h)$ für verschiedene Roboter Massen auf Basis des Rades "1"

Zuletzt wird der Einfluss der Roboter Masse im Zusammenhang mit der Schwerpunkthöhe analysiert (siehe Abb. 3.17). Es zeigt sich, dass der Einfluss der Schwerpunkthöhe mit zunehmender Roboter Masse sinkt (z.B. die Kurve für 2,8 kg ist annähernd eine Konstante). Das lässt sich damit

erklären, dass der Reibungskoeffizient mit steigender Masse geringer wird und damit das Beschleunigungspotential einen so geringen Wert erreicht, dass der Einfluss der Schwerpunkthöhe ebenfalls annähernd vernachlässigbar wird. Das ist auch an der Annäherung der Kurven bei hohen Schwerpunkten zu erkennen, da entweder durch die hohe Masse und / oder durch einen hohen Schwerpunkt einzelne Räder eine derart hohe Radlast erreichen, sodass der erreichbare Grip abnimmt und folglich die erreichbare Beschleunigung.

3.4.4 Simulation über den Einfluss der Schwerpunktlage

Die erste Grafik (siehe Abb. 3.18) zeigt, dass die statischen Radlasten bei einer Schwerpunktlage in x-Richtung von minus 4,7 mm gleich sind. Diese Lage hinter dem Mittelpunkt entsteht durch den Öffnungswinkel der Vorderräder von 108 °.

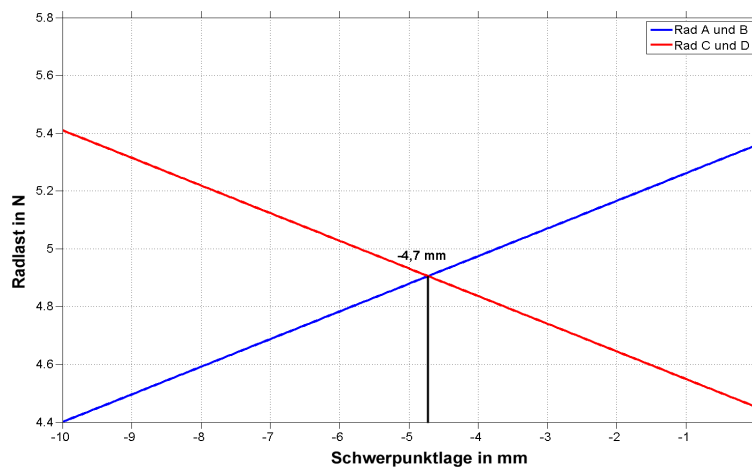


Abbildung 3.18: statische Radlasten in Abhängigkeit der Schwerpunktlage

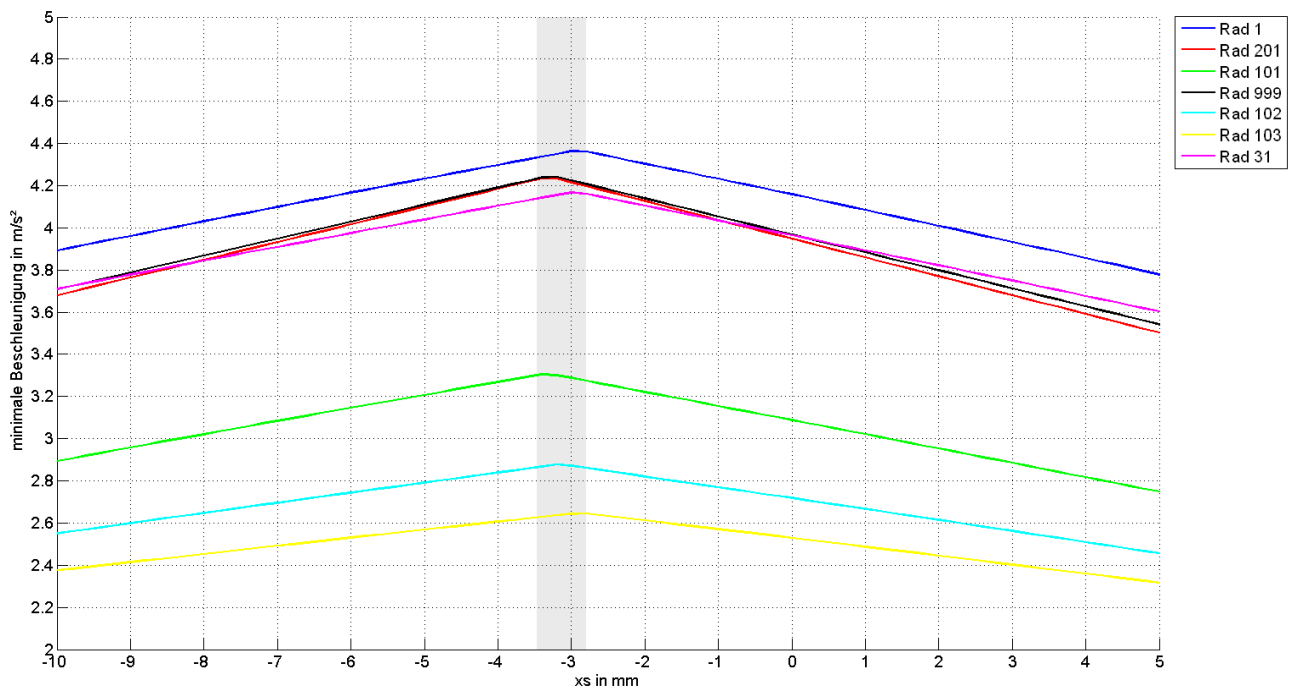


Abbildung 3.19: minimale Beschleunigung in Abhängigkeit der Schwerpunktlage für alle Räder

3 Das Fahrwerk

Im nächsten Schritt wird die Simulation durchlaufen. Nun zeigt sich ein überraschendes Ergebnis, nämlich dass die Lage bei minus 4,7 mm, bei denen die Radlasten statisch gleich sind, in Bezug auf die Beschleunigung nicht ideal ist. Sie ist sogar für jedes Rad unterschiedlich, obwohl die Robotergeometrie für jedes Rad gleich ist. Je nach Rad liegt der ideale Schwerpunkt in x-Richtung zwischen - 2,8 und - 3,3 mm. Es bedeutet auch, dass die in Kapitel 3.2.2 aufgestellte These alle Räder gleich zu belasten ideal wäre, falsch ist. Um diesen Effekt näher zu beleuchten wird in der nächsten Simulation das Beschleunigungsprofil des Rades "1" bei verschiedenen Schwerpunktlagen ermittelt (siehe Abb. 3.20).

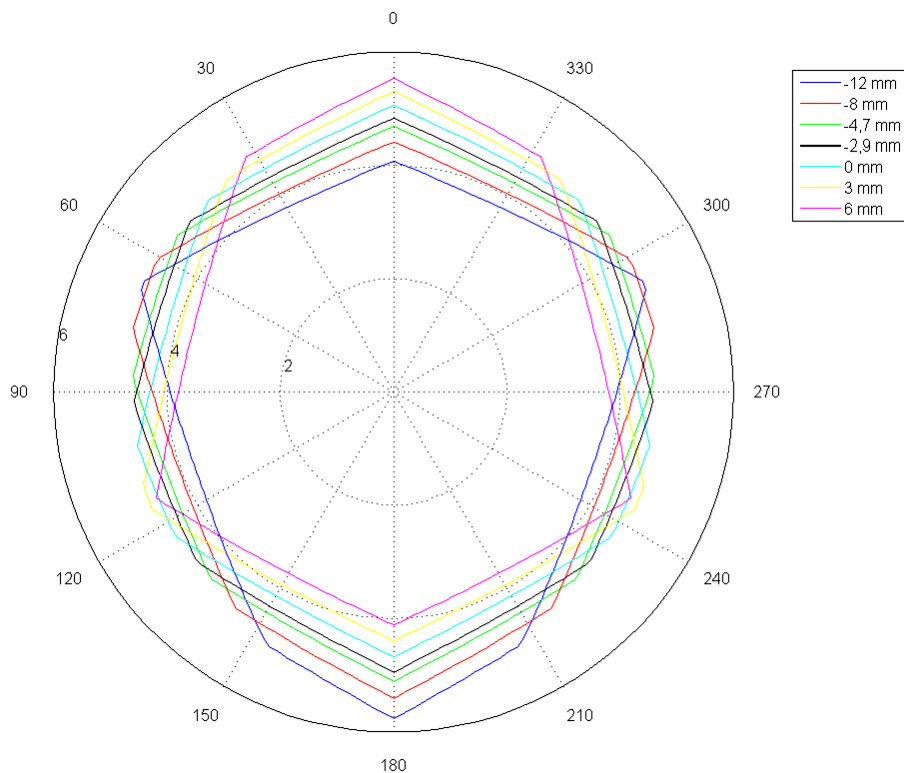


Abbildung 3.20: Beschleunigungsprofil des Rades "1" für verschiedene Schwerpunktlagen

Zunächst wird, wie erwartet, bei einer Verlagerung des Schwerpunktes nach hinten auch die Beschleunigung in diese Richtung verbessert und gleichzeitig nach vorne verschlechtert (blaue Linie für $x_s = -12$ mm) – und umgekehrt. Es zeigt sich auch ein ganz anderer Effekt: Auch die Form des Beschleunigungsprofils wird aufgrund des omnidirektionalen Antriebs verändert. Dadurch ergibt sich, dass die Schwerpunktlage bei minus 4,7 mm nicht die ideale ist. Denn die Veränderung des Profils führt dazu, dass das Beschleunigungsminimum durch die Schwerpunktverschiebung nicht etwa in der 0° - oder 180° -Richtung liegt, sondern je nach Lage bei einem anderen Winkel – zumeist in einer Richtung von etwa 30° bzw. 70° .

Aus der Simulation für Rad "1" geht hervor, dass der Schwerpunkt bei minus 2,9 mm mittig in diesen Profilen liegt und ein gleichmäßiges Profil erzeugt wird. Daher ist diese Schwerpunktlage der beste Kompromiss.

Zusammenfassend ist zu sagen, dass eine genaue Einstellung des Schwerpunktes in x-Richtung für die Roboterleistung zentral ist, da jede Abweichung vom Idealpunkt zu einer deutlichen Verschlechterung führt (siehe Abb. 3.19). Die ideale Schwerpunktlage kann aber nicht einfach über die Radlasten bestimmt werden, sondern hängt von den Eigenschaften des Rades ab und liegt zwischen dem statischen Gleichgewicht und dem Nullpunkt.

3.4.5 Das Beschleunigungsprofil diverser Räder

Als Zusammenfassung dieser ersten Betrachtung zu den Parametern werden nun die Beschleunigungsprofile der Räder verglichen.

Randbedingung	Wert
Öffnungswinkel der Vorderräder	108 °
Schwerpunkthöhe	40 mm
Roboter­masse	2 kg
Durchmesser der Radmittelpunkte	ideal gewählt für jedes Rad
Schwerpunkt in x-Richtung	ideal gewählt für jedes Rad

Tabelle 3.5: Die wichtigsten Randbedingungen für den Vergleich sämtlicher Räder

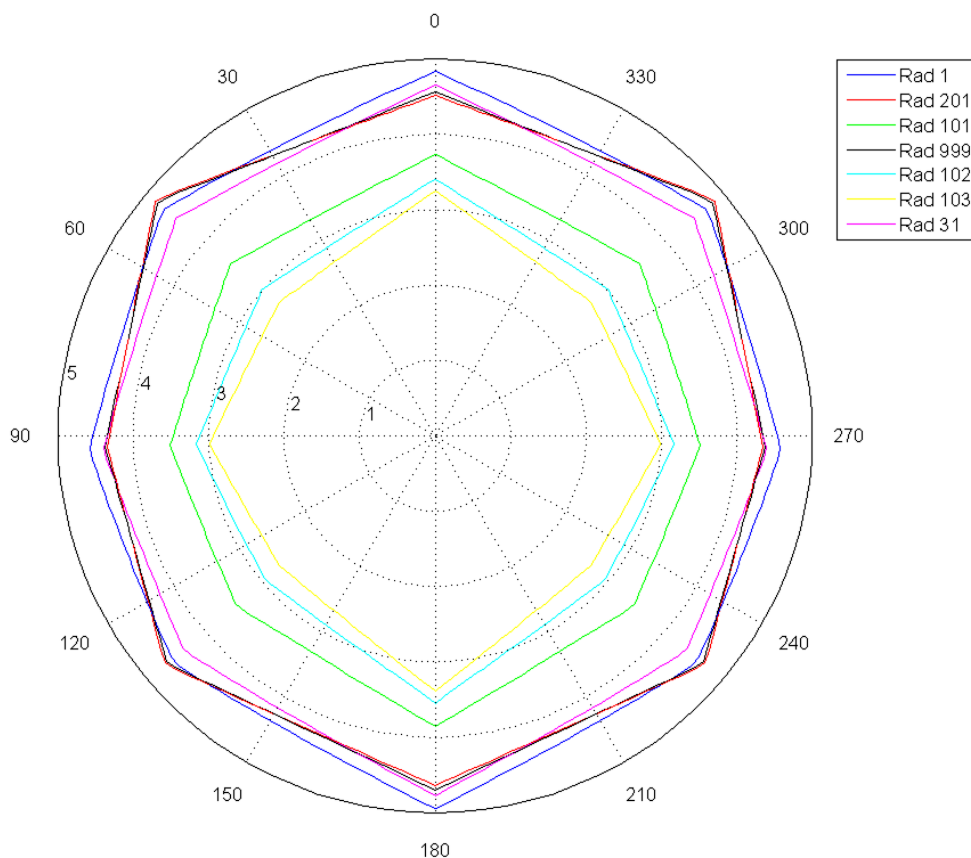


Abbildung 3.21: Beschleunigungsprofile sämtlicher Räder

Die Abbildung 3.21 zeigt die maximal mögliche Beschleunigung sämtlicher Räder in jede Richtung. Darin zeigt sich zum einen, dass das Potential des Rades "1" gegenüber den übrigen am größten ist (die Gründe dafür wurden in den vorigen Kapiteln beim jeweiligen Parameter erklärt), zum anderen erkennt man die spezifischen Eigenheiten der einzelnen Räder bezüglich der Form des Beschleunigungsprofils. Da bei dieser Simulation die Randbedingungen so gewählt wurden, wie sie real am Roboter vorhanden sind, und auch die Haftreibungskoeffizienten aus realen Versuchen stammen, zeigt diese Grafik das Verhalten des Fahrwerks sehr realitätsnah. Aber auch ein idealisiertes Rad ("999") stellt schon eine gute Näherung für das Verhalten dar und ist für einen ersten Berechnungsschritt völlig ausreichend.

3.4.6 Simulationen zum Öffnungswinkel

Obwohl dieser konstruktiv kaum anders gewählt werden kann, soll an dieser Stelle trotzdem der Einfluss des Öffnungswinkels berechnet werden. Dies dient auch dazu, die Betrachtung zu einem omnidirektionalen Fahrwerk zu vervollständigen.

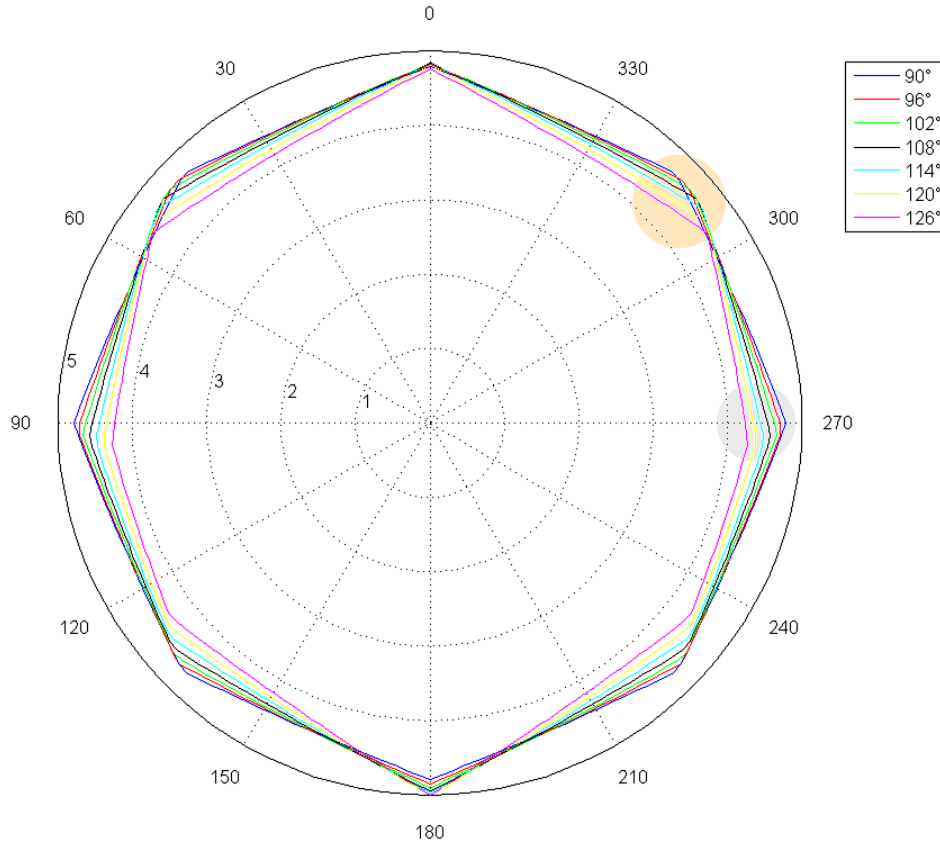


Abbildung 3.22: Beschleunigungsprofile für Rad "1" bei verschiedenen Öffnungswinkeln

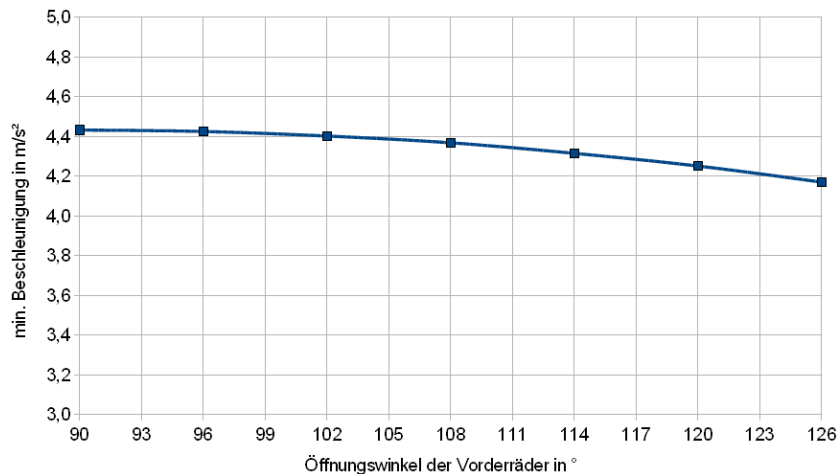


Abbildung 3.23: Erreichbare Beschleunigung in Abhängigkeit des Öffnungswinkels für Rad "1"

Die Beschleunigungsprofile verdeutlichen zwei wesentliche Eigenschaften: Zum einen verschiebt sich der Knick im Profil in den 45°-Richtungen in Richtung 90° bzw. 270° (siehe Abb. 3.22 gelber Bereich). Zum anderen erreicht der Roboter in der 90°- bzw. 270°-Richtung mit zunehmendem

Öffnungswinkel eine kleinere Beschleunigung (grauer Bereich). Das kann damit erklärt werden, dass die Vorderräder aufgrund ihrer Lage weniger Kraft in diese Richtungen erzeugen können. Würde man als Extremfall die Räder auf 180° verdrehen, würden sie gar keine Kraft mehr in diese Richtungen aufbringen können.

Damit zeigt auch diese Simulation, dass ein Öffnungswinkel von 90° in mehrfacher Hinsicht ideal wäre (siehe auch Abb. 3.23).

3.4.7 Simulationen zum Grip

Diese und die folgenden Simulationen sollen nun das Rad bzw. das Fahrwerk etwas allgemeiner behandeln um das Verhalten besser verstehen zu können und mögliche Entwicklungspotentiale zu erkennen. Im ersten Schritt wird untersucht, ob das Gripniveau linear in die erreichbare Beschleunigung eingeht. Dazu wird das idealisierte Rad "999" verwendet und der Reibungskoeffizient variiert.

Randbedingung	Wert
Öffnungswinkel der Vorderräder	108 °
Schwerpunkthöhe	40 mm
Roboter Masse	2 kg
Schwerpunkt in x-Richtung	- 3,3 mm

Tabelle 3.6: Die wichtigsten Randbedingungen für die Gripsimulation

Zunächst soll festgehalten werden, dass die Schwerpunktlage in x-Richtung zwar je nach Rad eine andere Idealposition hat, diese aber vom Gripniveau selbst nicht abhängt. Daher liegt der ideale Schwerpunkt in x-Richtung für alle Reibungskoeffizienten bei - 3,3 mm.

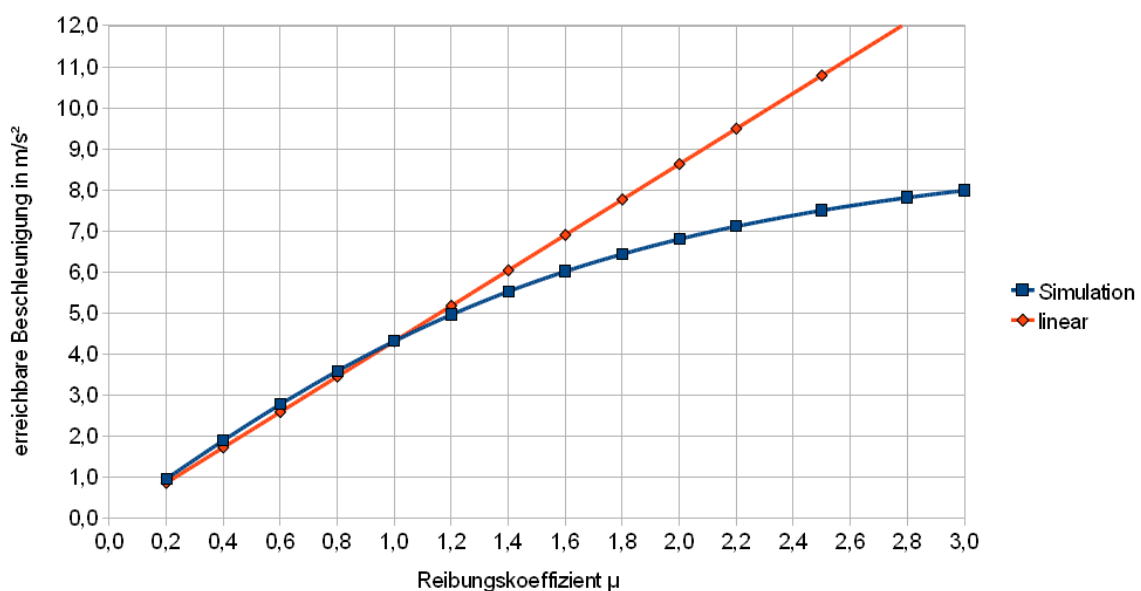


Abbildung 3.24: Beschleunigung in m/s^2 in Abhängigkeit des Reibungskoeffizienten

Der Zusammenhang zwischen Reibungskoeffizient und erreichbarer Beschleunigung ist nicht linear (siehe Abb. 3.24). Allerdings ist er in dem Bereich, in dem er sich mit den untersuchten Rädern bewegt (grauer Bereich in Abb. 3.24), annähernd linear. Betrachtet man die Beschleunigungsprofile (siehe Abb. 3.25), folgt als Grund für die Nichtlinearität der Zusammenhang mit der Schwerpunkthöhe, da sich die Profilform von einer Kreisform hin zu einem Quadrat bewegt. Das

3 Das Fahrwerk

bedeutet das Fehlen eines gleichmäßigen Beschleunigungspotentials in alle Richtungen. In die 45°-Richtungen folgt das Beschleunigungspotential dem Gripniveau, nicht aber in den den 90°-Richtungen, in denen die Schwerpunkthöhe einen entscheidenden Einfluss ausübt.

Dadurch ergibt sich bei einer Verdopplung der Reibung lediglich eine Steigerung um knapp 60 % und weiters, dass für eine Verdopplung der Beschleunigung (von 4 auf 8 m/s²) eine Verdreifung des Grips auf einen Reibwert von 3 notwendig wäre.

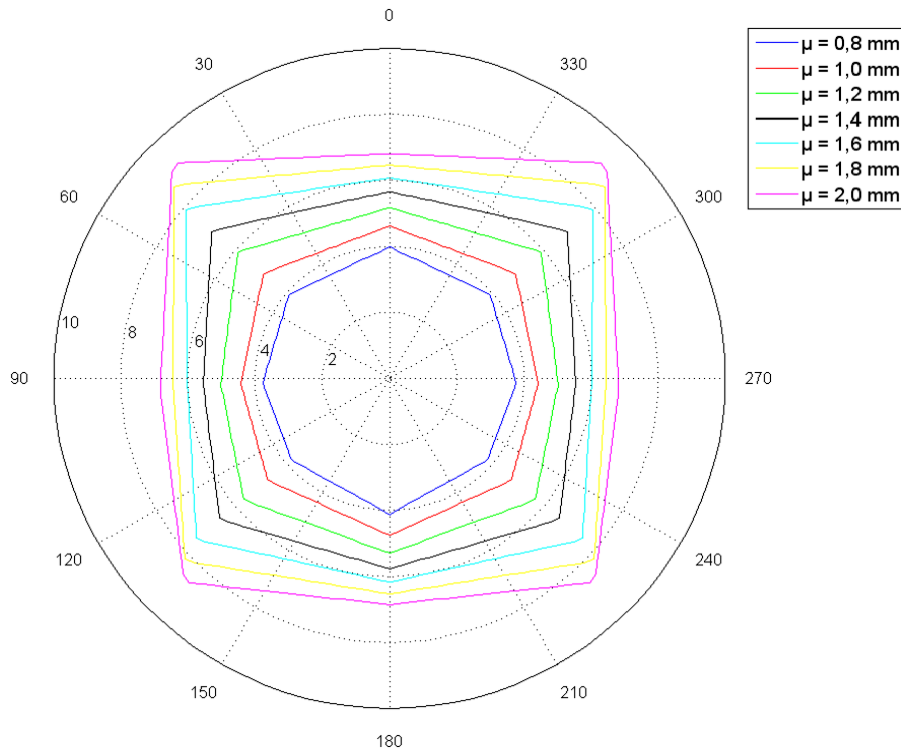


Abbildung 3.25: Beschleunigungsprofile für verschiedene Reibungskoeffizienten

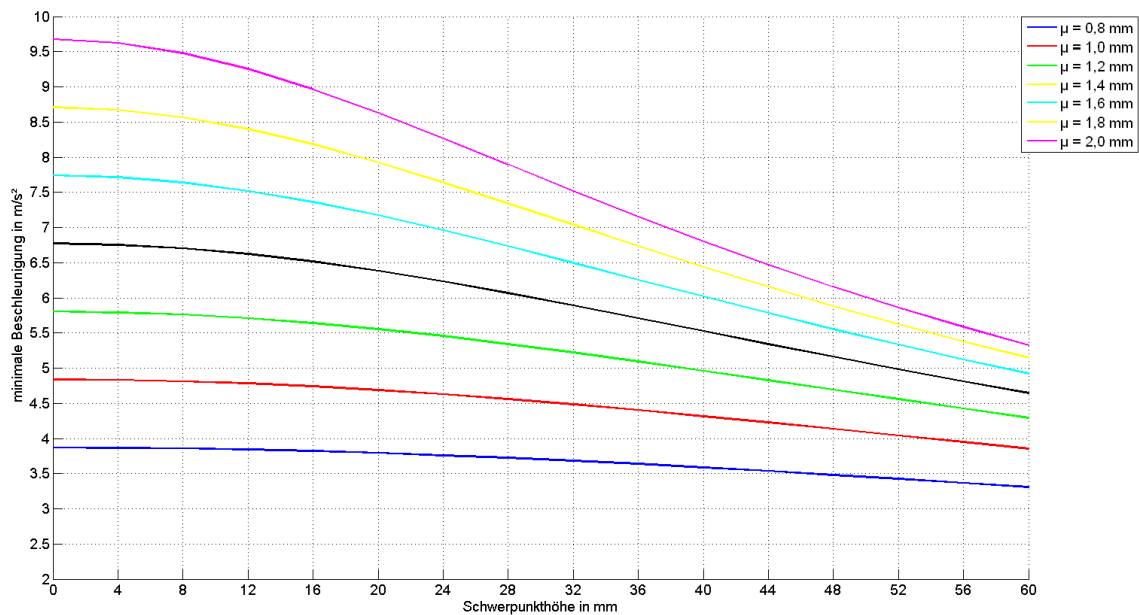


Abbildung 3.26: $a(h)$ für verschiedene Reibungskoeffizienten

3 Das Fahrwerk

Wenn es etwa gelingt, den Radgrip zu verbessern, folgt aus diesem Simulationsergebnis, dass der Schwerpunkt gesenkt werden sollte, um das Potential ausschöpfen zu können. Das zeigt auch die Abbildung 3.26: Man erkennt, dass bei einer Schwerpunkthöhe von 0 mm der Zusammenhang zwischen Reibwert und Beschleunigung linear ist (äquidistante Schnittpunkte mit der y-Achse im Diagramm), durch einen steigenden Schwerpunkt der Vorteil eines höheren Grips aber immer mehr zunichte gemacht wird.

Weiters ist zu erkennen das gemäß der Definition im Lastenheft für die Erreichung einer Beschleunigung von 8 m/s^2 ein Reibwert von mindestens 1,8 und einer Lage des Schwerpunktes von unter 27 mm (für $\mu=2$) erforderlich wären. Ersteres ist wohl nur mit einer anderen Rad-Teppich Kombination möglich, da die mittleren Werte der getesteten Räder meist weit darunter liegen. Den Schwerpunkt derart abzusenken könnte hingegen ein realistisches Konstruktionsziel sein.

Zuletzt wird der Einfluss der Schwerpunkthöhe auf das Beschleunigungsprofil bei einem höheren Reibwert betrachtet.

Randbedingung	Wert
Öffnungswinkel der Vorderräder	108 °
Reibwert μ	2
Roboter Masse	2 kg
Schwerpunkt in x-Richtung	-3,3 mm

Tabelle 3.7: Die wichtigsten Randbedingungen der Simulation Schwerpunkthöhe bei höherem Grip

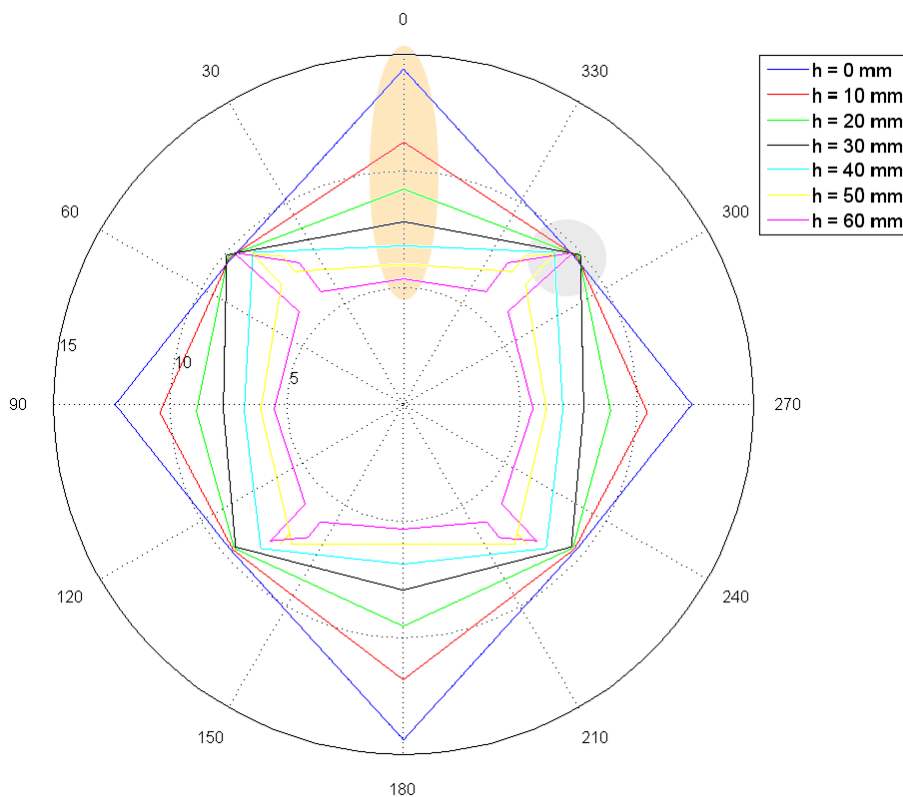


Abbildung 3.27: Beschleunigungsprofile für verschiedene Schwerpunkthöhen bei $\mu=2$

Aus der Abbildung 3.27 geht hervor, dass der Einfluss der Schwerpunkthöhe viel größer ist als bei einem niedrigeren Reibungskoeffizienten. In die 45°-Richtungen ist die Schwerpunkthöhe erneut

unerheblich (grauer Bereich), während in die anderen Richtungen der Einfluss des Schwerpunktes teils schlagartig zum Tragen kommt. In die 90°-Richtungen (gelber Bereich) erkennt man, wie die zunehmende Schwerpunkthöhe das Beschleunigungspotential immer stärker begrenzt. Vergleicht man das mit der Abbildung 3.16 (auf S.58) sieht man, was die Verdopplung des Reibwertes hinsichtlich des Beschleunigungspotentials bewirkt.

Anmerkung: Die Form des Profils für Schwerpunkthöhen über 50 mm rührt keinesfalls aus der Schrittweite der Simulation – diese wurde in diesem Fall sogar mit einer Auflösung von 0,1° durchgeführt – sondern hängt tatsächlich von der Geometrie und den Eigenheiten eines omnidirektionalen Fahrwerks ab und ist aufgrund des vorderen Öffnungswinkels von 108° asymmetrisch.

3.4.8 Zusammenfassung der Simulationsergebnisse

Die Abbildung 3.28 zeigt das Minimum der maximal möglichen Beschleunigung aller Beschleunigungsrichtungen. Es zeigt sich deutlich, dass Rad "1" aufgrund seines höheren Reibungskoeffizienten bei niedrigen Radlasten am besten abschneidet.

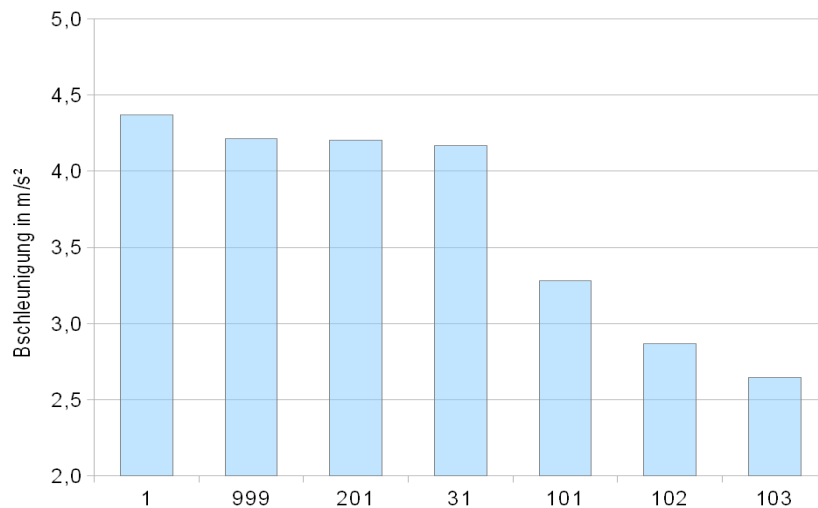


Abbildung 3.28: Vergleich des Beschleunigungspotentials der Omniwheels

Neben den vielen teilweise überraschenden Detailergebnissen, die in den vorangegangenen Kapiteln behandelt sind, können noch einige generelle Thesen abgeleitet werden: So hat etwa die Roboter Masse zweierlei Einfluss. Zum einen ist natürlich eine höhere Masse tendenziell schlechter, zum anderen führt eine hohe Masse zu einer geringeren Sensibilität sämtlicher anderer Parameter. Das heißt, ein leichterer Roboter besitzt zwar mehr Potential, die anderen Parameter bekommen aber dadurch erst einen großen Einfluss und müssen genauer betrachtet werden. Ist der Roboter hingegen (zu) schwer, so kann der Einfluss aller anderen Parameter bei der Entwicklung vernachlässigt werden.

Aufgrund des Verhaltens des realen Roboters, welches den Erwartungen aus der Simulation entsprach, scheint die Simulation ein geeignetes Werkzeug zu sein, um das Fahrwerk eines SSL-Roboters zu beschreiben und verschiedene Konfigurationen während der Entwicklungsphase eines solchen Roboters zu bewerten. Weiters zeigt die Simulation einerseits Entwicklungspotentiale auf, aber andererseits auch Bereiche, wo eine große Anstrengung nur eine geringe Verbesserung der Fahrleistung bringen würde. Sie ist auch gut geeignet, völlig andere Reibungskoeffizienten zu untersuchen: Möchte man andere Räder und / oder einen anderen Teppich untersuchen, so können diese Ergebnisse leicht integriert und mit den früheren verglichen werden.

Es zeigt sich klar, dass mit den realen Roboterdaten die gewünschte Beschleunigung von bis zu 8 m/s^2 nicht erreicht werden kann. Das liegt einerseits an der Geometrie (Schwerpunkthöhe), andererseits am Rad selbst, welches nicht mehr Reibung erzeugen kann. Daher wird an dieser Stelle auch in Erinnerung gerufen, dass es sich für den Reibwert hier um Mittelwerte aus Versuchen handelt. Dies bedeutet auch, dass in Einzelfällen sehr wohl viel höhere Beschleunigungen möglich sind, die dann auch die im Roboter verbaute Motorleistung rechtfertigen, welche diese Beschleunigung prinzipiell ermöglichen würde. Die Versuche sowie der Weg, wie es zu den in diesem Kapitel verwendeten Daten über die Reibwerte gekommen ist, wird im folgenden Kapitel beschrieben.

3.5 Versuche zur Radreibung

Dieses Kapitel beschreibt den Aufbau und die Ergebnisse der Versuche zur Reibung von Omniwheels. Das Austrian Cubes RoboCup Team hat dazu auch ein "Projekt konstruktiv" [Girstmair 2010] durchgeführt, welches im Folgenden als Hauptquelle dient.

3.5.1 Die Anforderungen an den Prüfstand

Zunächst wird ein Prüfstand entworfen, mit dem von unterschiedlichen Rädern der Haft- und Gleitreibungskoeffizient in Abhängigkeit der Radaufstandskraft gemessen werden kann. Als Basis wird das Omniwheel des Prototypen verwendet und dann einige Parameter (z.B. Omniwheeldurchmesser, O-Ring-Material, Polygoneffekt) variiert. Zusätzlich soll der Kraftverlauf gemessen werden, um die Auswirkungen der aufgrund des Polygoneffekts entstehenden Schläge und Vibrationen feststellen zu können.

Tabelle 3.8 zeigt eine Liste aller Prüflinge, die in einem SSL-Roboter funktionieren könnten. Die nicht getesteten Prüflinge sind grau hinterlegt, da einerseits bestimmte Versuchsergebnisse deren Messung überflüssig gemacht haben und andererseits wäre auch eine komplette Testreihe zeitlich derart aufwendig, dass sie den Rahmen dieser Arbeit bei Weitem übersteigen würde.

Die O-Ring-Materialien wurden nach Lieferbarkeit den Prüflingen zugeteilt. In den Versuchen wird Acrylnitril-Butadien-Kautschuk (NBR) in den Härten 70 und 80 verwendet. Silikonkautschuk (VMQ) hat nach Norm ebenfalls eine Härte von 70 [Klein 2008, S.504] und wird aufgrund der Tests an der Dribblerwalze, bei denen Silikon eine hohe Reibung erzeugen kann, ebenfalls getestet.

Die Anzahl der Querräder wird nach geometrischer Machbarkeit gewählt. Es sollte dabei in etwa eine Verdopplung bzw. Halbierung des Polygoneffekts gegenüber dem Basisrad entstehen, um diesen Einfluss zu untersuchen. Da die Querradanzahl diskret sein muss, gelingt das aber nur bedingt.

Rad Nr.	Raddm. D	Breite Dq	O-Ring	O-Ring Material	Querrad Anzahl	Polygoneffekt	Anmerkungen
	<i>mm</i>	<i>mm</i>	<i>mm*mm</i>		<i>#</i>	<i>mm</i>	
1	50	12,5	7,5x2,5	NBR 70	16	0,48	Grundversion [Girstmair 2010]
2	50	12,5	7,5x2,5	NBR 80	16	0,48	Grundversion
11	63	12,5	7,5x2,5	NBR 70	18	0,48	größerer D
12	63	12,5	7,5x2,5	NBR 80	18	0,48	größerer D
21	63	12,5	7,5x2,5	NBR 70	25	0,25	weniger Polygoneffekt
22	63	12,5	7,5x2,5	NBR 80	25	0,25	weniger Polygoneffekt
31	50	12,5	7,5x2,5	NBR 70	13	0,73	mehr Polygoneffekt [Girstmair 2010]

Rad Nr.	Raddm. D	Breite Dq	O-Ring	O-Ring Material	Querrad Anzahl	Polygon-effekt	Anmerkungen																
	mm	mm	mm*mm		#	mm																	
32	50	12,5	7,5x2,5	NBR 80	13	0,73	mehr Polygoneffekt																
101	50	10,0	6x2	NBR 70	16	0,48	kleinerer O-Ring [Girstmair 2010]																
102	50	10,0	6x2	NBR 80	16	0,48	kleinerer O-Ring																
103	50	10,0	6x2	VMQ	16	0,48	kleinerer O-Ring																
111	50	10,0	6x2	NBR 70	22	0,25	weniger Polygoneffekt																
112	50	10,0	6x2	NBR 80	22	0,25	weniger Polygoneffekt																
113	50	10,0	6x2	VMQ	22	0,25	weniger Polygoneffekt																
201	50	13,5	7,5x3	NBR 70	16	0,48	breiterer O-Ring [Girstmair 2010]																
202	50	13,5	7,5x3	NBR 80	16	0,48	breiterer O-Ring																
301	63	15,0	10x2,5	NBR 70	18	0,48	größerer O-Ring																
302	63	15,0	10x2,5	NBR 80	18	0,48	größerer O-Ring																
311	63	15,0	10x2,5	NBR 70	25	0,25	weniger Polygoneffekt																
312	63	15,0	10x2,5	NBR 80	25	0,25	weniger Polygoneffekt </tr <tr> <td>321</td> <td>60</td> <td>15,0</td> <td>10x2,5</td> <td>NBR 70</td> <td>14</td> <td>0,75</td> <td>mehr Polygoneffekt</td> </tr> <tr> <td>322</td> <td>60</td> <td>15,0</td> <td>10x2,5</td> <td>NBR 80</td> <td>14</td> <td>0,75</td> <td>mehr Polygoneffekt</td> </tr>	321	60	15,0	10x2,5	NBR 70	14	0,75	mehr Polygoneffekt	322	60	15,0	10x2,5	NBR 80	14	0,75	mehr Polygoneffekt
321	60	15,0	10x2,5	NBR 70	14	0,75	mehr Polygoneffekt																
322	60	15,0	10x2,5	NBR 80	14	0,75	mehr Polygoneffekt																

Tabelle 3.8: Liste aller Prüflinge und deren Beschaffenheit

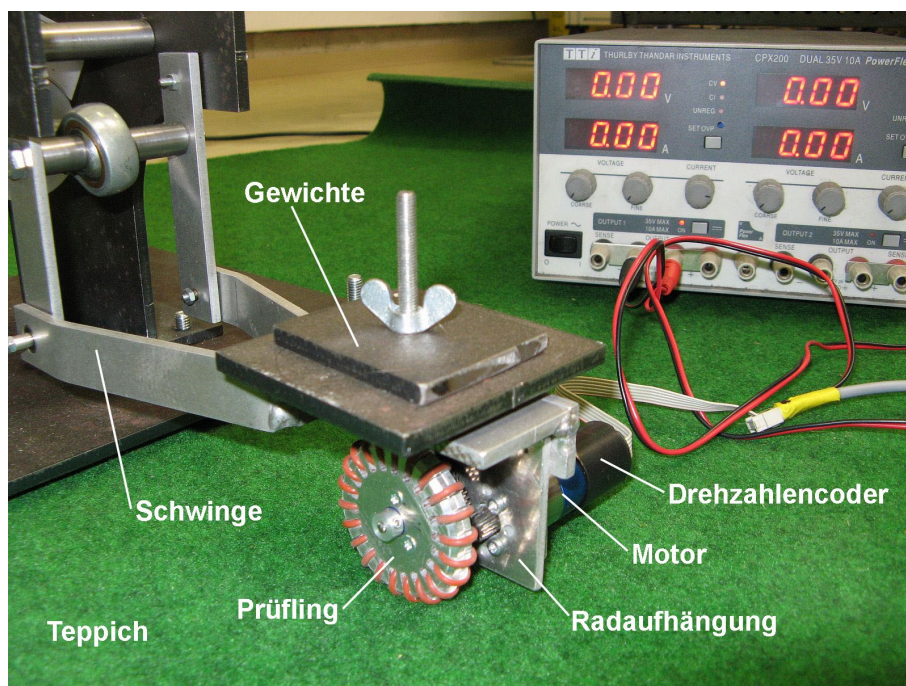


Abbildung 3.29: Foto des Omniwheelprüfstandes, Ansicht 1

3.5.2 Der Prüfstand

Der Prüfstand besteht im Wesentlichen aus einer Radaufnahme, an der ein Elektromotor für die Erzeugung des Drehmoments angebracht ist, sowie einer Aufnahme für Gewichte um die Radaufstandskraft einstellen zu können (siehe Abb. 3.29). Die auftretende Zugkraft des Rades wird

über eine Schwinge mittels einer Kraftmessdose gemessen (siehe Abb. 3.30). Weiters wird die Motordrehzahl mittels eines Drehzahlencoders aufgenommen um den Zeitpunkt des Übergangs von Haft- auf Gleitreibung feststellen zu können. Der Rahmen des Prüfstandes ist schwer genug, sodass er nicht weiter befestigt werden muss. [vgl. Girstmair 2010, S.3ff]

Ein weiterer wichtiger Bestandteil des Prüfstandaufbaus ist der Teppich, es wurde ein handelsüblicher Teppichboden verwendet. Bei den Versuchen wurde immer derselbe Teppich verwendet um gleichbleibende Versuchbedingungen herzustellen.

Die Signale der Kraftmessdose sowie des Drehzahlencoders werden von einem Messverstärker eingelesen und am PC dargestellt und ausgewertet.

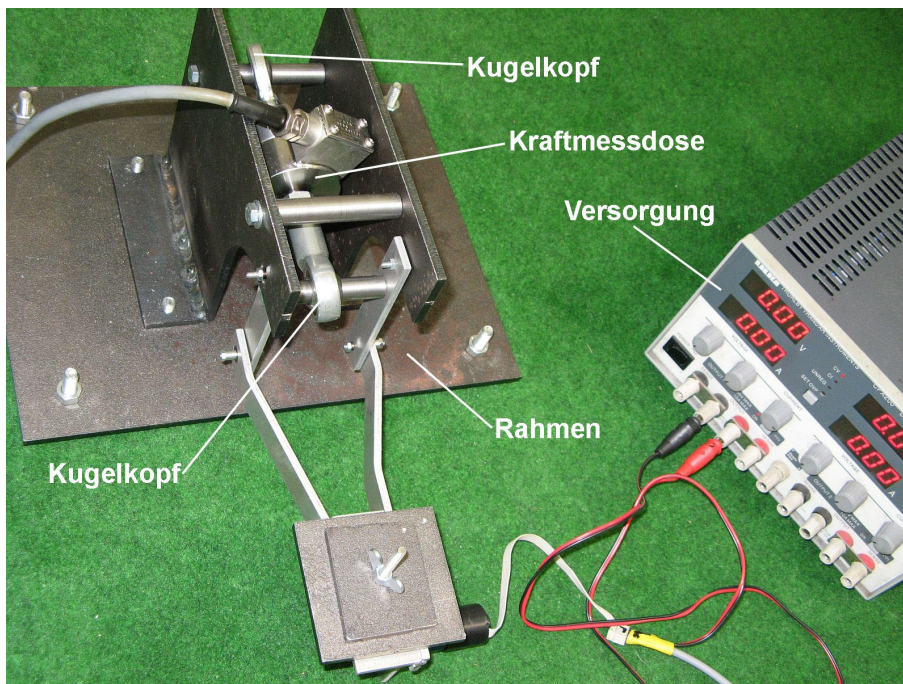


Abbildung 3.30: Foto des Omniwheelprüfstandes, Ansicht 2

3.5.3 Die Messung allgemein

Nach der Montage des Rades und dem Einstellen der Radaufstandskraft durch das Aufbringen von Stahlplatten mit einer bestimmten Masse wird die Schwinge auf dem Teppich derart aufgesetzt, dass keine Kraft in horizontaler Richtung wirkt. Weiters wurde auf die Spannungsfreiheit des Aufbaus geachtet. Dann wird die Kraft in vier verschiedenen Richtungen (siehe Abb. 3.31) gemessen. Der Versuch wird pro Richtung drei Mal durchgeführt und dieses Ergebnis gemittelt. Die Abweichung dieser drei Messungen lag im Allgemeinen bei $\pm 0,2$ N (bei hohen Radaufstandskräften etwas darüber), was eine Unsicherheit von etwa 8 % ergibt. Insgesamt ergeben das für eine Radaufstandskraft je zwölf Messwerte für Haft- und für Gleiten.

Als Haftreibungswert wurde der maximale Wert, bevor sich das Rad zu drehen beginnt, erfasst und ist meistens etwas höher als der Gleitreibungswert. Dieser wiederum wird aus dem Mittelwert der Kraft bei einem langsam drehenden Rad ermittelt.

Bei einigen Rädern wird zusätzlich auch der Kraftverlauf gemessen, wobei die zeitliche Auflösung der Messung auf das Maximum erhöht wird und die Peaks bei einer Raddrehzahl von etwa 240 U/min aufgezeichnet werden.

Um durch die Abnutzung des Teppichs keine Änderung der Versuchsbedingungen zu verursachen, werden die Versuche immer an einer etwas anderen Stelle am Teppich durchgeführt. Allerdings haben Tests gezeigt, dass die Abnutzung des Teppichs nur eine geringe Verschlechterung der Reibung bewirkt. Ebenfalls wird die Reproduzierbarkeit der Versuche getestet, indem am Ende der Messreihe noch einige Parameter aus früheren Messungen wieder eingestellt und die Ergebnisse verglichen werden. Die Abweichungen liegen dabei in den sonst auch aufgetretenen Schwankungen.

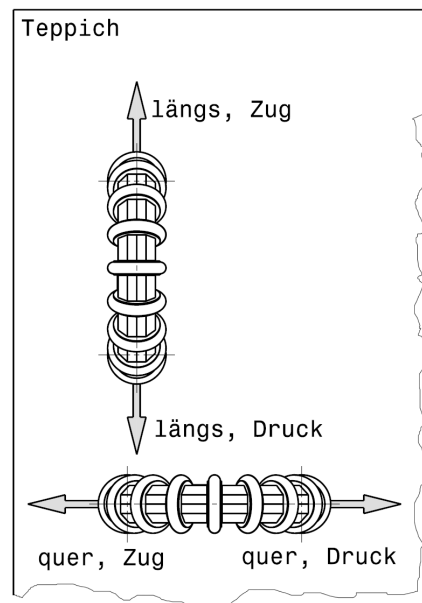


Abbildung 3.31: Richtungen der Kraftmessungen bei den Rad-Versuchen

Nicht unerwähnt bleiben dürfen auch mögliche Fehlerquellen neben der Messgenauigkeit an sich. So können Fehler beim Ablesen, beim Kalibrieren oder bei der Übertragung der Ergebnisse auftreten, welche dann Ausreißer verursachen können.

3.5.4 Messung Rad "1"

Für die Messung des Rades "1" wird die Radaufstandskraft in 50 g Schritten erhöht. Der kleinste Wert ist 270 g, das ist die Masse, die durch das Eigengewicht der Radaufhängung, des Rades selbst und des Antriebsmotors wirkt.

In der Abbildung 3.32 ist eine Auswahl der Messwerte für Haftreibung dargestellt. Die obere bzw. untere Kurve verbindet alle Extremwerte, die mittlere Kurve ist der Mittelwert aller Werte für eine bestimmte Radaufstandskraft.

Zunächst könnte angenommen werden, die Messung sei unbrauchbar, da Maxima und Minima einen so großen Bereich beanspruchen. Tatsächlich treten aber Maxima und Minima immer in bestimmte Richtungen auf, was auf eine Richtungsabhängigkeit der Teppichfasern schließen lässt (siehe auch Abb. 3.5 auf S.48).

In zwei Richtungen ist demnach die Reibung deutlich größer als in die anderen beiden (siehe Abb. 3.33). Versuche mit anderen als den in Abb. 3.31 angegebenen Richtungen ergeben, dass es sich bei den gewählten tatsächlich in etwa um die Maxima bzw. Minima handelt. Somit sind die gewählten Richtungen für die weiteren Messungen gut geeignet.

3 Das Fahrwerk

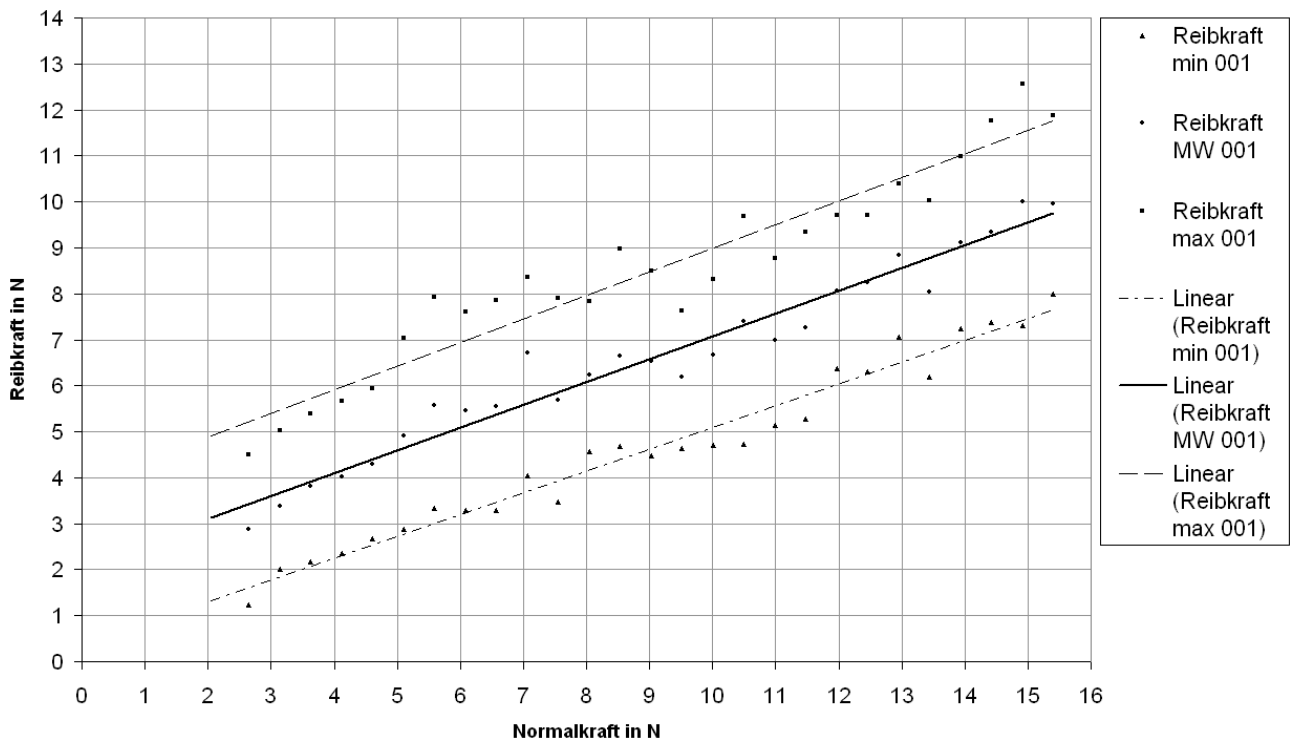


Abbildung 3.32: Messung von Rad "1": Haftreibungskraft über Normalkraft

Des Weiteren ist zu erkennen, dass die Kurven der Reibkraft vermutlich nicht exakt durch den Ursprung gehen (siehe Abb. 3.32). Das kann zwar nicht durch Versuche belegt werden, da diese nicht bis zu einer Radaufstandskraft von Null durchgeführt werden können, jedoch wäre es unwahrscheinlich, dass sich das Rad unterhalb des letzten Messwertes völlig anders verhält. Das lässt darauf schließen, dass ein Teil der Reibung aus Formschluss zwischen den Querrädern und den Teppichfasern herrührt und ein zweiter Teil Coulombsche Reibung ist. Dabei ist der Formschlussanteil in die "starken" Richtungen (Teppichfaserrichtungen mit großer Reibung) sehr viel größer als in die "schwachen". Hingegen ist der Coulombsche Anteil der Reibung annähernd unabhängig von der Teppichfaserrichtung, wie man in Abbildung 3.33 gut erkennen kann.

Zum Vergleich sollen an dieser Stelle auch die Ergebnisse aus der Gleitreibung nicht unerwähnt bleiben. Der Gleitreibungskraftverlauf ist qualitativ gleich, nur zahlenmäßig etwas geringer (siehe Abb. 3.34).

3 Das Fahrwerk

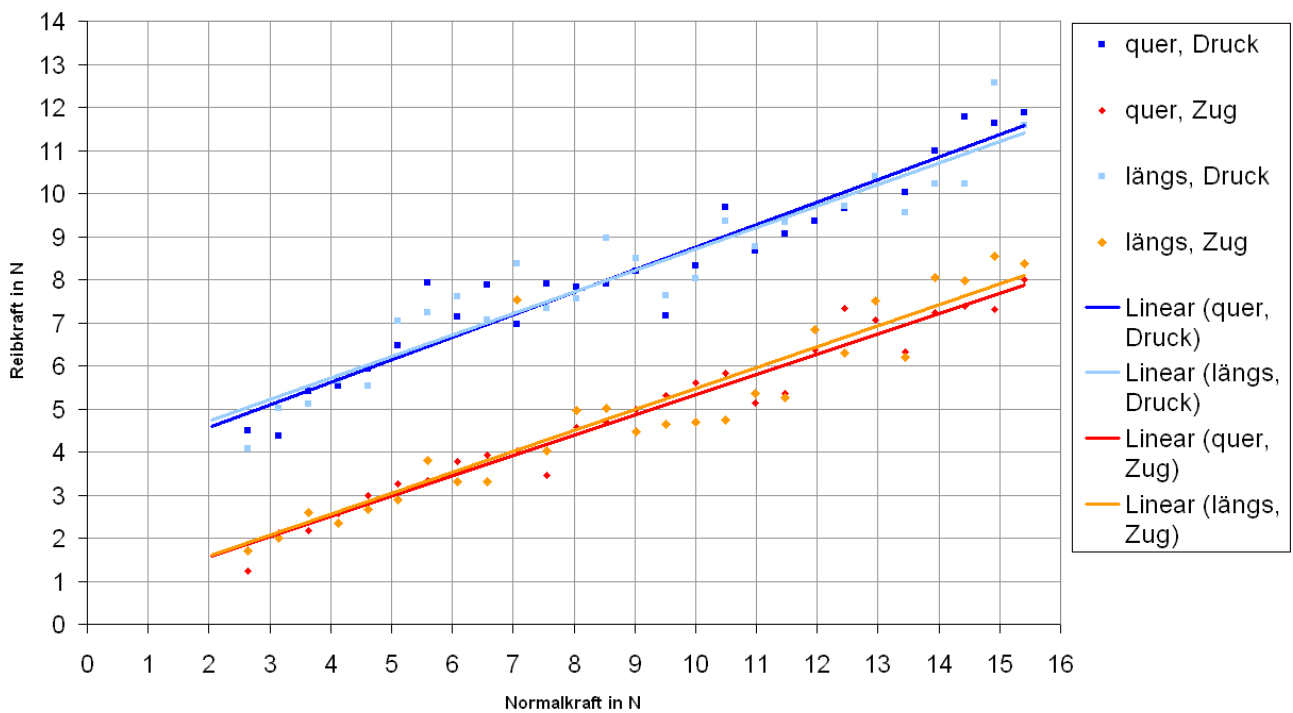


Abbildung 3.33: Messung von Rad "1": Richtungsabhängigkeit der Messwerte bei Haftreibung

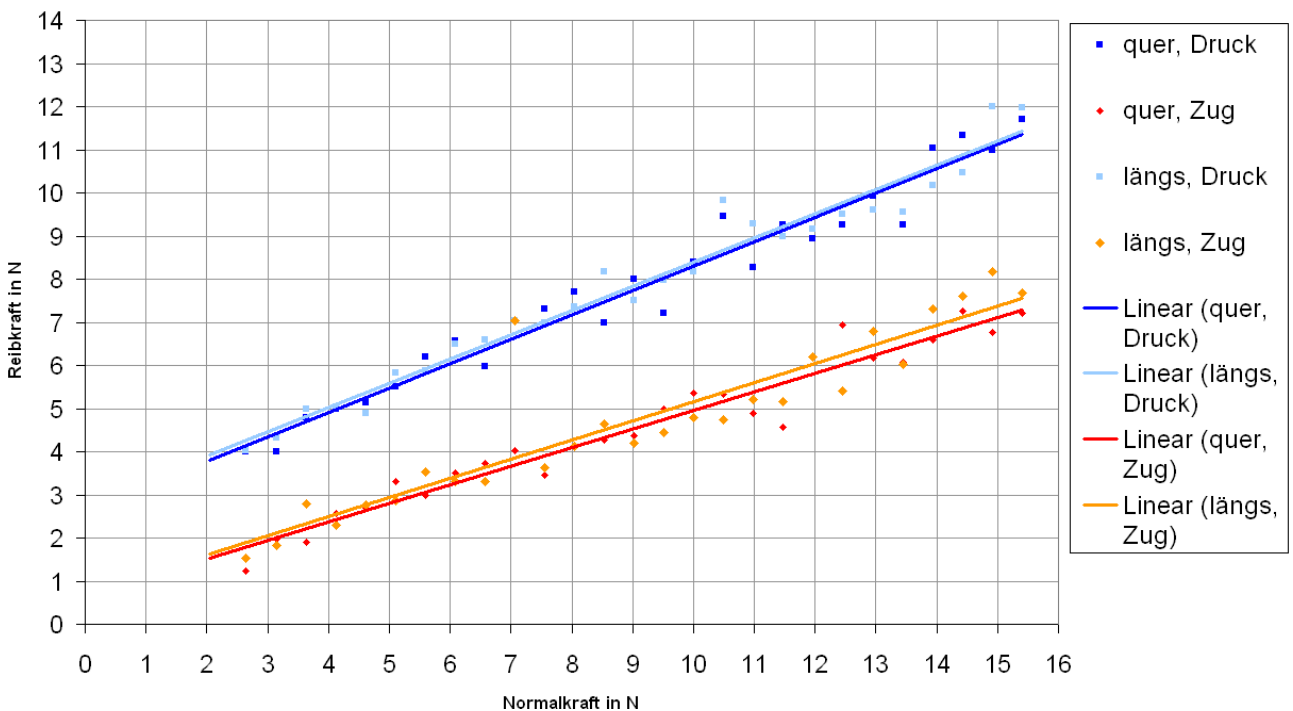


Abbildung 3.34: Messung von Rad "1": Richtungsabhängigkeit der Messwerte bei Gleitreibung

Nun werden die durchschnittliche Haftreibungskraft sowie deren Extrema auf einen Haftreibungskoeffizienten umgerechnet (siehe Abb. 3.35), es handelt sich um die gleichen Messwerte in einer anderen Darstellung.

In der Abbildung 3.35 ist zu erkennen, was in der ersten Grafik (Reibkraft über Normalkraft, Abb. 3.32) nicht besonders deutlich zum Ausdruck kommt: Die Reibung nimmt relativ gesehen mit

sinkender Normalkraft zu. Aber nicht nur im Mittel, sondern vor allem hinsichtlich des Maximalwertes. Während bei hohen Kräften die Unterschiede in den Teppichrichtungen immer geringer werden, ist bei kleinen Normalkräften die Reibkraft in bestimmte Richtungen besonders hoch. Das Minimum hingegen ist relativ konstant, was auf reine Coulombsche Reibung schließen lässt. Davon kann der folgende Sachverhalt abgeleitet werden: Bei kleinen Normalkräften entsteht Formschluss zwischen den Teppichfasern und dem Rad, aber nur in bestimmte Richtungen, da die Fasern leicht schräg am Teppich angebracht sind. In die Gegenrichtungen entsteht kein Formschluss, weil die Fasern beim Darüberfahren umgebogen werden. Wird die Normalkraft erhöht, werden die Fasern mehr und mehr zusammengedrückt, sodass der Formschlussanteil immer kleiner wird und schließlich verschwindet.

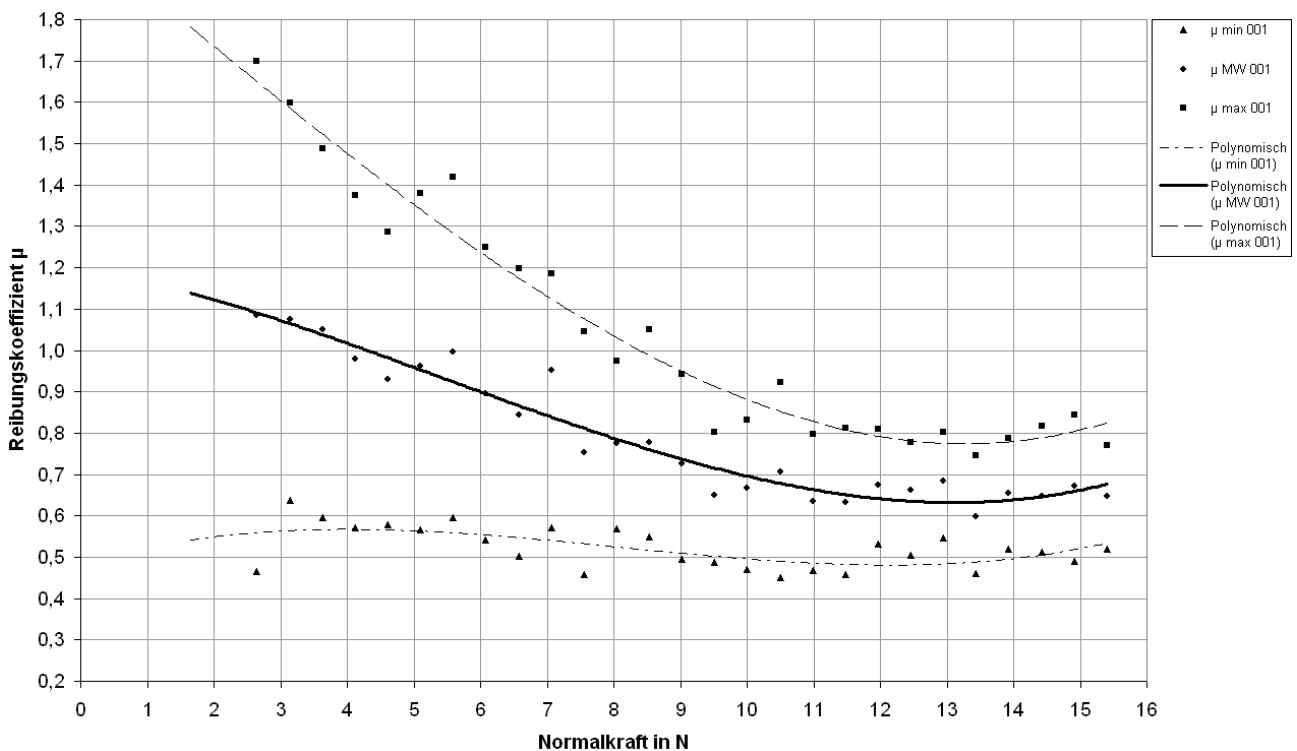


Abbildung 3.35: Messung von Rad "1": Reibungskoeffizient in Abhängigkeit der Normalkraft

Für die Radgeometrie bedeutet dieses Ergebnis, dass dünne und breite Querräder (d_q klein und D_q groß aus Abb. 3.1 auf S.43) mehr Reibung erzeugen können und somit für die Anwendung in der SSL am besten geeignet sind. Umgekehrt verringern breite Räder aber den Radmittelpunktdurchmesser d (siehe Abb. 3.3 auf S.46), da der Bauraum durch das Reglement begrenzt ist. Das führt in der Folge zu höheren Radlastschwankungen und stellt somit ein Nachteil dar. Das Optimum dazwischen kann mit Hilfe der Simulation aus dem vorangegangenen Kapitel bestimmt werden, wenn die Reibungsdaten der Räder bekannt sind.

Obwohl der Fall der Gleitreibung im realen Roboter aufgrund des omnidirektionalen Fahrwerks nicht eintreten sollte und regelungstechnisch verhindert wird, soll er hier betrachtet werden (siehe Abb. 3.36). Schließlich ist es wichtig zu wissen, ob etwa die Gleitreibung viel geringer ist als die Haftreibung, was regelungstechnisch ein großes Problem wäre, da dann durch auftretenden Schlupf bei einem Rad der Roboter schlagartig die Fahrtrichtung in eine nicht erwünschte ändern würde. Sind Haft- und Gleitreibung aber annähernd gleich würde das Auftreten von Schlupf zu einem untergeordneten Problem werden.

3 Das Fahrwerk

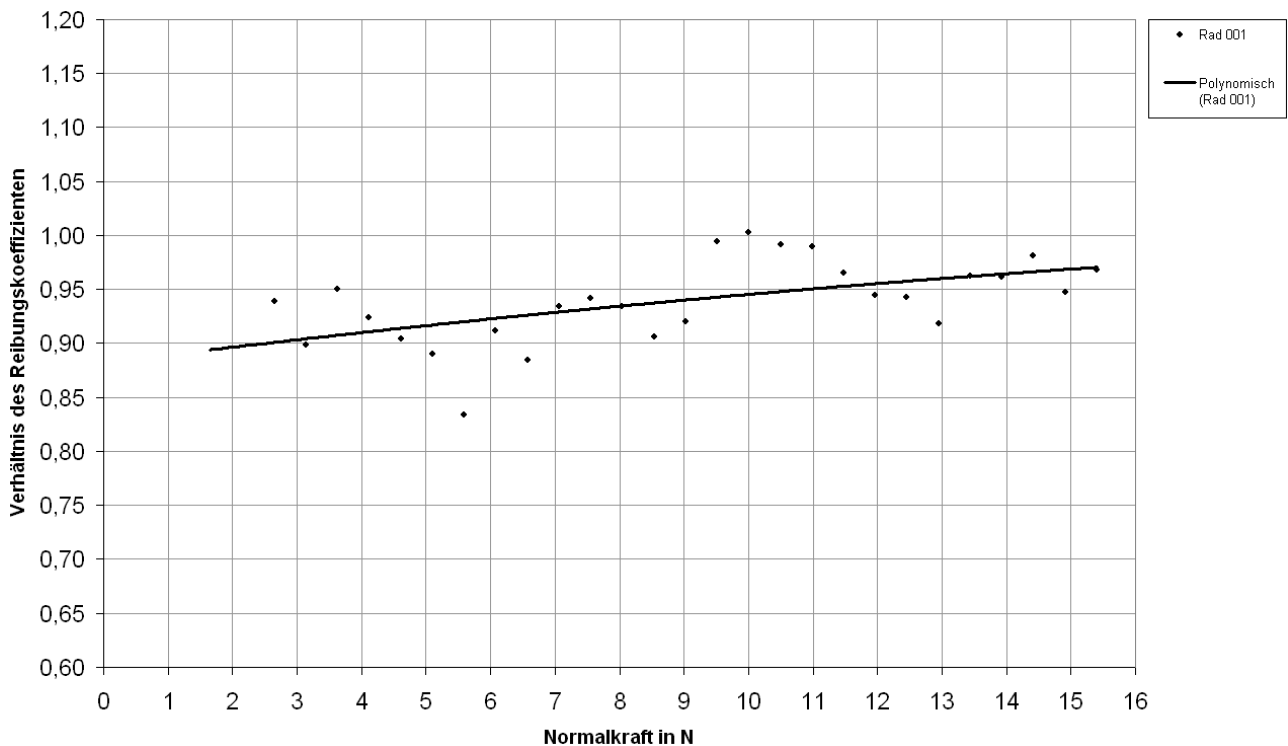


Abbildung 3.36: Reibungskoeffizientenverhältnis in Abhängigkeit der Normalkraft Rad "1"

Da sich in dieser Analyse die Messunsicherheiten verstärken bzw. auslöschen, kann nur eine grobe Aussage getroffen werden. Die Gleitreibung ist offenbar um etwa 5 bis 10 % geringer als die Haftreibung. Auch steigt dieses Verhältnis mit zunehmender Normalkraft, was wieder für die These spricht, dass der Formschluss abnimmt, da die Teppichfasern immer mehr zusammengedrückt werden.

Da die Gleitreibung nur etwas geringer als die Haftreibung ist, sollte die Regelung des Roboters problemlos möglich sein, da bei Schlupf an einem Rad dieses nur geringfügig weniger Zugkraft erzeugt als gewünscht. Das hat sich auch im praktischen Betrieb gezeigt.

3.5.5 Messung und Vergleich aller Prüflinge

Die Versuche und Auswertungen werden gleichermaßen wie für das Rad "1" für alle Prüflinge vorgenommen und sollen nun verglichen werden.

Zunächst einige Anmerkungen:

- Rad "101" streut recht stark, somit wird nur linear interpoliert.
- Die Rückwärtsinterpolation im Bereich 0 bis 3 N Normalkraft soll darstellen, mit welcher Funktion in der Simulation gearbeitet wird.
- Die Verhältnisse bei der Gleitreibung sind prinzipiell die gleichen und sind im Anhang S.A40 aufgeführt.

Ein Trend ist bei allen Rädern zu beobachten, nämlich dass der Reibungskoeffizient mit steigender Normalkraft sinkt (siehe Abb. 3.37). Die Erklärung dafür wurde schon in Kapitel 3.5.4 geliefert. Diese Erklärung ist offenbar für alle Omniwheels gültig zumal sich die Räder nicht sehr stark voneinander unterscheiden.

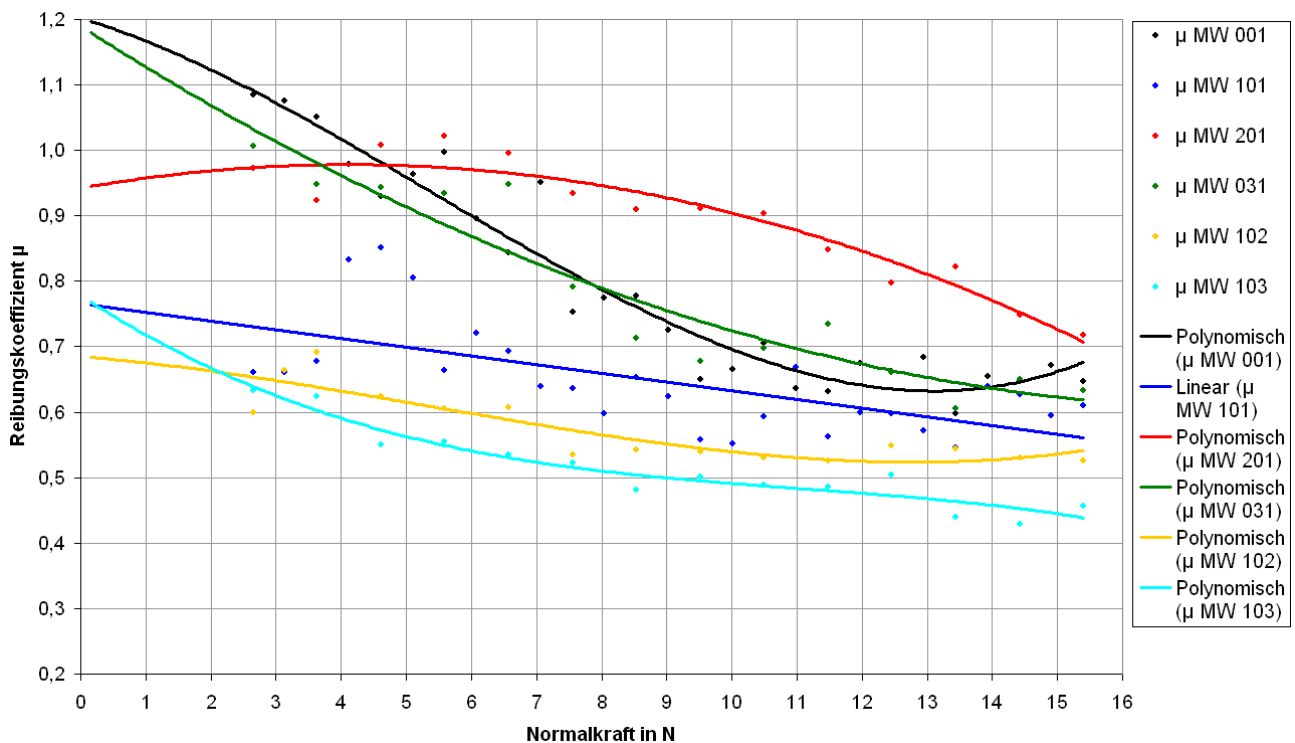


Abbildung 3.37: Reibungskoeffizient über Normalkraft aller Räder

3.5.5.1 Vergleich von Rad "1" mit Rad "31" – Der Polygoneffekt

Diese beiden Räder unterscheiden sich ausschließlich in der Anzahl der Querräder (Rad "1": 16 Stück bzw. Rad "31": 13 Stück) und somit hinsichtlich des Polygoneffekts (Rad "1": 0,5 mm bzw. Rad "31": 0,7 mm). Man erkennt, dass für die betrachteten Werte die Querradanzahl keine große Auswirkung auf die Reibung hat, die Ergebnisse der beiden Räder sind in etwa gleich. Daraus kann abgeleitet werden, dass eine Optimierung der Querradanzahl kaum Verbesserungspotential besitzt, vor allem deshalb, da diese kaum variiert werden kann. Mehr Querräder können aus geometrischen Gründen kaum verbaut werden bzw. weniger Querräder führen zu immer stärkeren Schlägen, dass sie für den Praxisgebrauch ungeeignet sind (siehe Kapitel 3.5.7).

3.5.5.2 Vergleich von Rad "1" mit Rad "201" – Die O-Ring-Dicke

Im folgenden Vergleich wird die Dicke des O-Rings am Querrad untersucht: Obwohl der Unterschied zwischen der O-Ring-Dicke des Rades "1" mit 3 mm und des Rades "201" mit 2,5 mm gering erscheint, beeinflusst dieser das Ergebnis stark.

Das etwas dickere Querrad bei Rad "201" hat zwei wesentliche Auswirkungen:

- Der Abfall der Reibung mit zunehmender Normalkraft tritt viel später ein, wobei dies in einem für den Roboter irrelevanten Bereich (ab 10 N). Somit könnte für den relevanten Bereich auch ein konstanter Reibungskoeffizient als gute Näherung angesetzt werden.
- Dieses Rad besitzt bei sehr niedrigen Radaufstandskräften einen geringeren Reibungskoeffizienten, was gerade bei Radlastschwankungen ein Nachteil ist (siehe Simulationen in Kapitel 3.4.5).

Aus diesen Ergebnissen ist Folgendes abzuleiten: Das dickere Querrad biegt mehr Teppichfasern um, wodurch der Formschlussanteil der Reibung geringer ist und somit das Rad bei kleineren Radaufstandskräften weniger Kraft übertragen kann. Hingegen führt die größere Dicke zu einer

größeren Auflagefläche und dadurch zu mehr Coulombscher Reibung, weswegen es dann auch bei größeren Radlasten besser als das Rad "1" ist.

Dieser Unterschied zwischen den beiden Rädern über die gesamte Messung gesehen ist zwar sehr groß, er wäre dann im Roboter aber dennoch recht klein, da sich die Radlast hauptsächlich in einem Bereich bewegt (um 5 N), in dem beide Räder in etwa den gleichen Grip haben.

3.5.5.3 Vergleich von Rad "1" mit Rad "101" – Die Querradgröße

Der Unterschied zwischen Rad "1" und "101" liegt im Querrad. Das des Rades "101" ist kleiner, was offenbar zu einem generell niedrigeren Reibungskoeffizienten führt. Das bestätigt die eingangs aufgestellte These, dass breitere Querräder mehr Grip erzeugen können.

3.5.5.4 Vergleich der Räder "101", "102", "103" – Das Material

Die Räder "101", "102" und "103" unterscheiden sich hinsichtlich des O-Ring-Materials. Dabei hat das Rad "103" den weichsten O-Ring, das Rad "102" den härtesten und das Rad "101" einen mittlerer Härte. Rad "101" ist hinsichtlich des Grips offenbar am besten. An dieser Stelle muss auch erwähnt werden, dass speziell beim Rad "103" bei hohen Normalkräften der O-Ring oft vom Querrad abgezogen worden ist, was schon eine mögliche Begründung für die Ergebnisse liefert. Es könnte sein, dass es zu wenig steif ist (sich zu stark verformt) und somit nicht genügend Kraft aufbauen kann.

Als nächstes könnte man erwarten, dass ein härteres Material besser ist, was der eingangs erwähnten These von Cornell entspricht (siehe Kapitel 3.2.4). Aber diese These muss verworfen werden. Wie schon vermutet scheint der Mittelweg am besten, wenngleich zu hartes Material im Zweifelsfall unkritischer ist als ein zu weiches (siehe Abb. 3.37).

3.5.5.5 Vergleich von Gleit- und Haftreibung

Im Folgenden soll analysiert werden, wie sich die Gleitreibung zur Haftreibung verhält (siehe Abb. 3.38, orange hinterlegter Bereich). Das Diagramm soll ausschließlich eine grobe Tendenz darstellen.

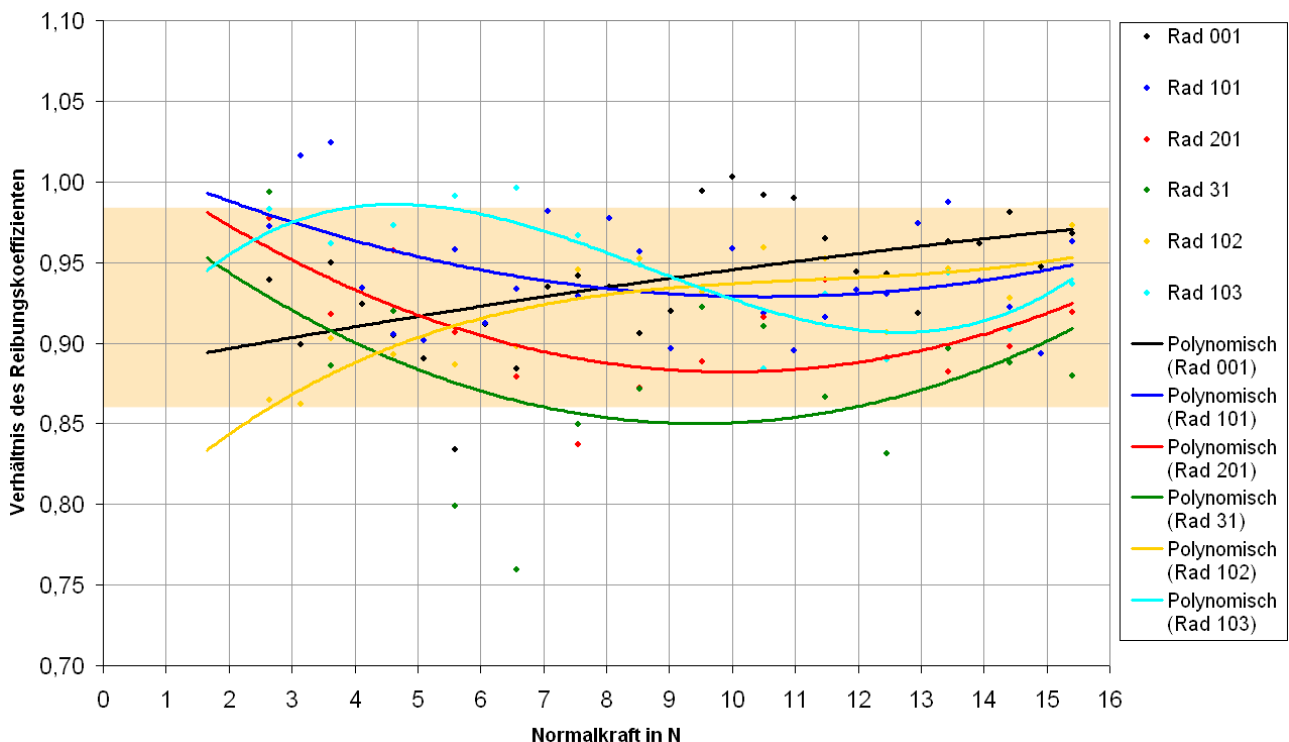


Abbildung 3.38: Verhältnis von Gleit- zu Haftreibung sämtlicher Räder

Zunächst bestehen keine großen Unterschiede zwischen den Rädern: Bei allen liegt das Verhältnis zwischen 0,85 und 1. Tendenziell weisen aber die Räder "101" bis "103", die einen sehr niedrigen Haftreibungskoeffizienten aufweisen, ein besseres Gleit- und Haftreibungsverhältnis auf. Außerdem steigt das Verhältnis mit zunehmender Normalkraft etwas an, was – in Kombination mit den vorherigen Ergebnissen – bedeutet, dass sich die Haftreibung mit zunehmender Normalkraft der Gleitreibung annähert. Genauer kann aber aufgrund der in diesem Diagramm sich aufaddierenden Messunsicherheiten nicht abgeleitet werden.

3.5.6 Auswertung zur Richtungsabhängigkeit des Grips

Der minimale und maximale Grip ist von der Teppichfaserrichtung abhängig. Um diese Bandbreite bestimmen zu können, werden für jedes Rad sämtlich Minima und Maxima gemittelt und seinem Mittelwert gegenüber gestellt (siehe Abb. 3.39). Es zeigt sich, dass zwischen den Rädern ein geringer Unterschied besteht und die Schwankungsbreite durchgehend bei +/- 30 % liegt. Damit zeigt sich klar, dass der Haupteinfluss auf die Schwankungsbreite aus der Teppichbeschaffenheit und nicht aus den Radeigenschaften resultiert, da auch die Räder mit wenig Grip eine ähnliche Schwankungsbreite aufweisen. Somit könnten – will man Aussagen über den Grip auf einem anderen Teppich treffen – Tests mit einem Rad genügen, dessen Ergebnisse dann auf die anderen Räder übertragen werden.

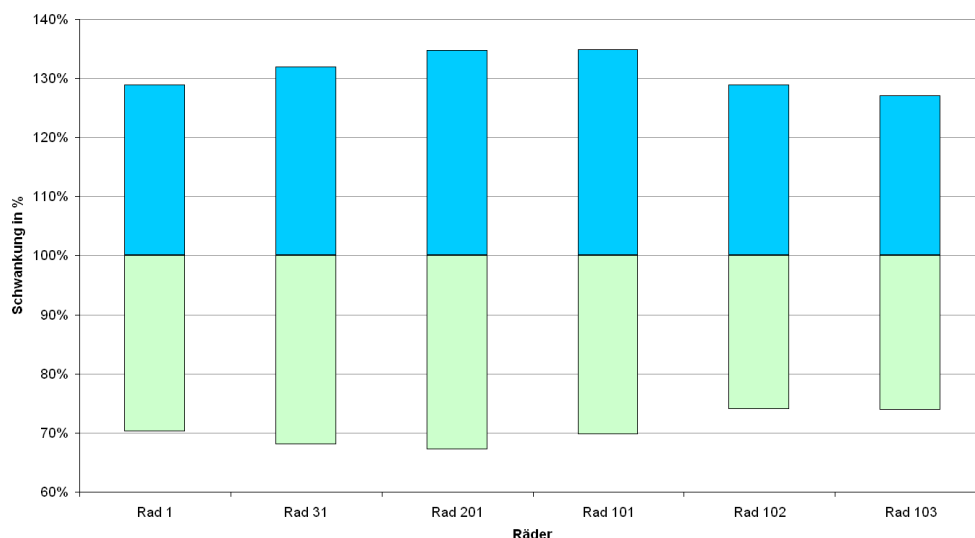


Abbildung 3.39: Prozentuelle Schwankungsbreite der Minima und Maxima aller Räder

3.5.7 Messung der Kraftspitzen

Für einige Räder wird bei einer Raddrehzahl von etwa 4 Hz (= 240 U/min) die maximal auftretende Kraft gemessen (siehe Abb. 3.40). Diese Kraft entsteht durch die Bauart des Omniwheels und dessen Polygoneffekt. Es bedeutet auch, dass die zuvor angegebenen Daten zur Reibung nur die mittlere Kräfte darstellen, die das Rad aufbringt, während es exakt betrachtet jedes Mal, wenn ein Querrad in den Teppich eintaucht, einen Kraftstoß erzeugt und dazwischen die Kraft wieder auf annähernd Null absinkt. Das ist zwar für die Betrachtung der Reibung nicht relevant, sehr wohl aber für die mechanische Auslegung des Roboters, um die Spannungen im Omniwheel berechnen zu können.

Es zeigt sich, dass ein Zusammenhang zwischen dem erreichten Grip und den Peaks besteht. Rad "101" verzeichnet die geringsten Peaks und hat auch am wenigsten Grip. Das Rad "201" überholt das Rad "1" bei etwa 6 N. Zum Vergleich: Im Bezug auf den Reibungskoeffizient wird das Rad "1"

bei etwa 5 N überholt, hier besteht ein Zusammenhang. Auch deshalb, da das Rad "1" mit zunehmender Radlast relativ gesehen weniger Kraft übertragen kann, daher steigt auch der Peak kaum noch an.

Eine Ausnahme davon stellt das Rad "31" dar, welches durch den größeren Polygoneffekt generell höhere Peaks erzeugt. Dies führt zu der Schlussfolgerung, dass es für den Roboter nicht geeignet ist, schließlich erzeugt es nicht mehr Grip, sondern nur mehr Vibrationen und Kräfte.

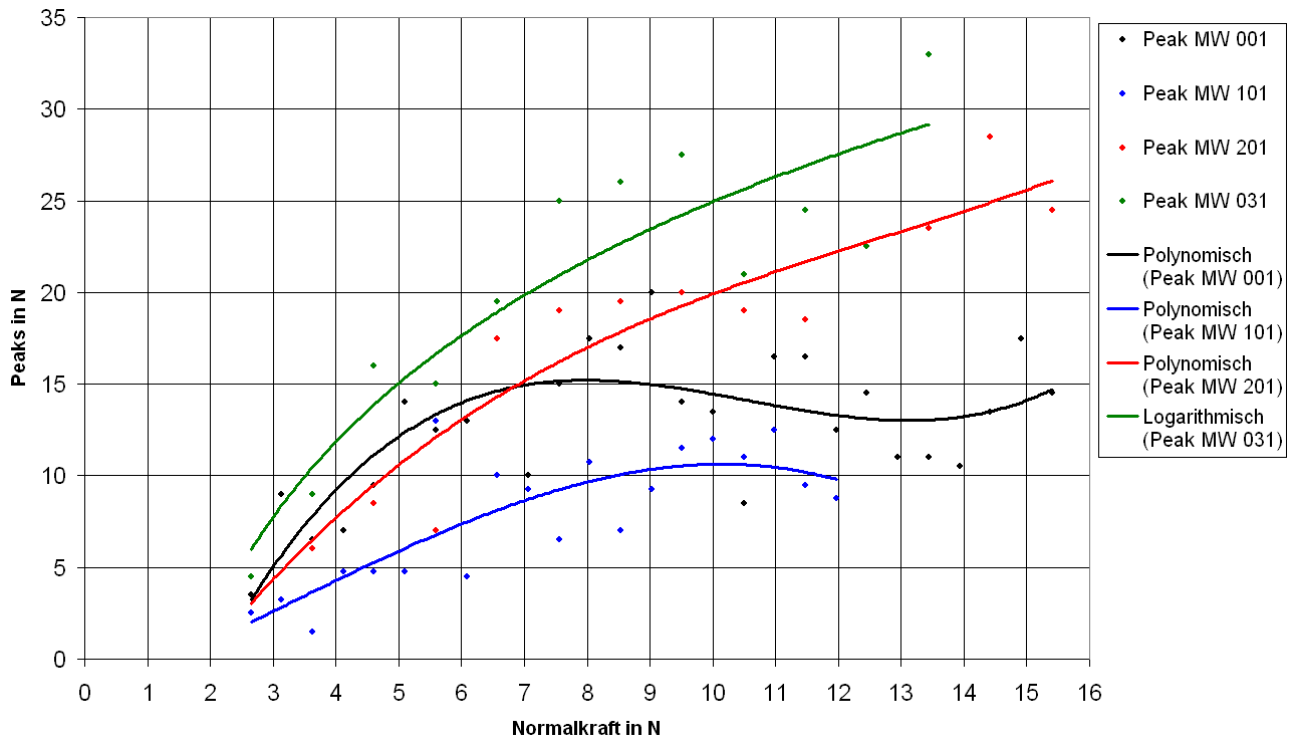


Abbildung 3.40: Messung der Kraftpeaks in Abhängigkeit der Normalkraft

Der Vergleich der Peaks mit den Reibkräften bei 5 N zeigt, dass die Peaks etwa drei mal so groß sind wie die mittlere Reibkraft, die das Rad effektiv übertragen kann.

Die Ergebnisse der Versuche zum Kraftverlauf werden als Lastannahme in eine Finite Elemente Rechnung des Omniwheels eingebracht, wodurch die ausreichende Festigkeit des Omniwheels validiert wird.

3.5.8 Zusammenfassung der Versuche

Es zeigt sich, dass die Versuche im Wesentlichen die theoretischen Überlegungen bestätigen, allerdings ist die Stärke der Auswirkungen bestimmter Parameter sehr unterschiedlich. So haben Form und Größe sowie das Material des Querrades einen weitaus größeren Einfluss als der Polygoneffekt.

Weiters wurde entdeckt, dass sich die Reibung eines derartigen Omniwheels aus zwei Komponenten zusammensetzt, nämlich aus einem Formschlussanteil bei geringen Radlasten und Coulombscher Reibung. Insbesondere diese Ergebnisse zeigen, dass die Robotermaße ein entscheidender Faktor für die Leistungsfähigkeit des Roboters ist.

Was die Materialwahl betrifft wird zwar ein Optimum aus den zur Verfügung gestandenen Varianten gefunden, jedoch bleibt hier noch viel Spielraum für weitere Untersuchungen. Ebenso würde die

Abarbeitung der in Tabelle 3.8 aufgelisteten und noch nicht getesteten Omniwheels mehr Erkenntnisse bringen.

Kriterium	Ziel	Größe der Auswirkung auf den Grip
Querradbreite (Dq)	groß	groß
Querraddicke (dq)	klein	mittel
Querradmaterial	mittlere Härte	mittel
Roboter­masse	möglichst gering	groß
Polygoneffekt (p)	klein	gering

Tabelle 3.9: Entscheidende Kriterien eines Omniwheels

In der Tabelle 3.9 sind noch einmal die wichtigen Kriterien zusammengefasst. Sämtliche Ergebnisse aus den Versuchen befinden sich im Anhang S.A37ff.

3.6 Das Ergebnis

Es hat sich gezeigt, dass nur die Kombination aus Versuchen und Simulation zu einem sinnvollen Ergebnis führt. Die Simulationen alleine bleiben ungenau ohne reale Daten über das Rad. Und die Ergebnisse aus den Versuchen alleine ergeben nicht automatisch das Optimum für den Roboter, da das Rad im Kontext des gesamten Fahrwerks betrachtet werden muss.

Die Vielzahl an Parametern führen auf ein mehrdimensionales Optimierungsproblem, wobei die Parameter nicht unabhängig voneinander betrachtet und eingestellt werden können. Die hier vorgestellte Simulation hilft dabei, dieses zu verstehen und zu lösen.

Weiters muss erwähnt werden, dass das Verhalten des Roboters, das aufgrund der Simulationen erwartet wurde, auch im praktischen Betrieb beobachtet werden kann. Dadurch kann die Simulation plausibilisiert werden.

Ein wichtiges Teilziel dieser Arbeit war es einerseits das omnidirektionale Fahrwerk und das Omniwheel zu erforschen und andererseits eine möglichst gute Variante zu finden, die im Roboter verbaut werden kann. Beides ist gelungen, wenngleich noch einiges offen geblieben ist, das weiterer Untersuchungen bedarf. So wären etwa detaillierte Versuche über die Räder "1" und "201" von Vorteil, um deren unterschiedliches Verhalten – trotz fast identischer Geometrie – herauszuarbeiten.

Bereits in Planung ist die nächste Ausbaustufe des Radprüfstandes im Rahmen des Austrian Cubes RoboCup Teams. Das Rad soll nicht mehr auf einer starren Unterlage getestet werden, sondern der Boden soll sich bewegen und die Trägheit des Roboters abbilden. Dadurch könnten detailliertere Erkenntnisse über das Rad gewonnen werden und möglicherweise mit Hilfe dieses Prüfstandes sogar die elektronische Regelung optimiert werden. Nicht zuletzt soll in Zukunft die Bandbreite der getesteten Räder steigen, um das Wissen über dieses Gebiet zu vervollständigen.

4 Der Kicker

Dieses Kapitel behandelt die Versuche zu den Kickern eines SSL-Roboters. Es wird sowohl der Kicker für den horizontalen Schuss (H-Kicker) als auch der Chipkicker (C-Kicker) behandelt. Das Kicken ist neben dem Fahren das entscheidende Erfolgskriterium in der SSL. Einfach nur zu versuchen, mit dem Ball in das Tor zu fahren, würde nicht einmal gegen ein schlechtes SSL-Team funktionieren. Daher ist es entscheidend, möglichst fest und genau zu Kicken, um ein Tor erzielen können. Der Kicker ist kaum reglementiert, lediglich Ballbeschädigungen sind verboten [Reglement 2009 S.21f] und die Kickgeschwindigkeit sollte unter dem SSL-Gentlemensagreement von 10 m/s bleiben.

Der Schwerpunkt der durchgeführten Untersuchungen liegt beim C-Kicker, da einerseits noch nicht auf Erfahrungen vom Austrian Cubes RoboCup Team zurückgegriffen werden konnte und andererseits die zusätzliche Dimension die Komplexität erhöht.

4.1 Lastenheft

Im Zuge der Versuche zu den Kickern eines SSL-Roboters soll folgendes untersucht werden: Beim H-Kicker soll die Geschwindigkeit in Abhängigkeit des Treffpunktes untersucht werden und somit der optimale Treffpunkt ermittelt werden. Damit ergeben sich folgende Versuchsparameter (siehe Abb. 4.1):

- Höhe des Kickers h bzw. d
- Abstand Kicker zu Ball e (Leerweg)

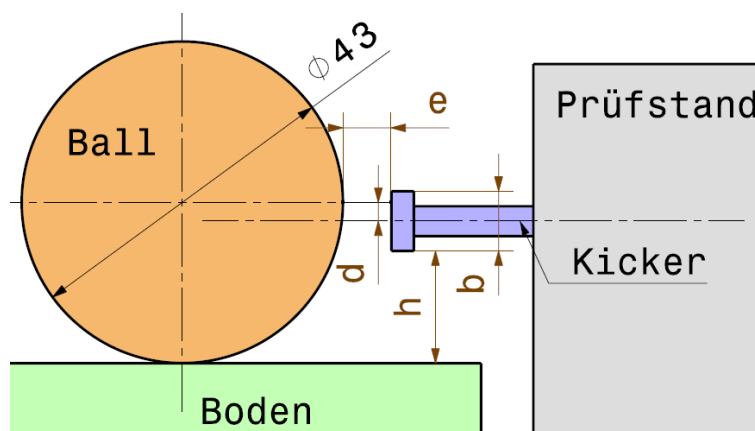


Abbildung 4.1: Versuchsparameter H-Kicker

Beim C-Kicker wurde im Team festgelegt, den Ball mittels einer horizontalen Bewegung zu kicken. Zu ermitteln ist die Flugbahn bzw. die Überschießbarkeit. Damit ist gemeint, wie nahe ein gegnerischer Roboter am eigenen stehen kann, um ihn mit dem Ball gerade nicht zu treffen bzw. ob dies überhaupt möglich ist. Ein sinnvoller Wert für die Überschießbarkeit wird mit kleiner als 50 cm angenommen (siehe Abb. 4.2), da bei einem Freistoß, bei dem der C-Kick vorrangig eingesetzt wird, die Gegner mindestens 50 cm Abstand halten müssen [Reglement 2009, S.25].

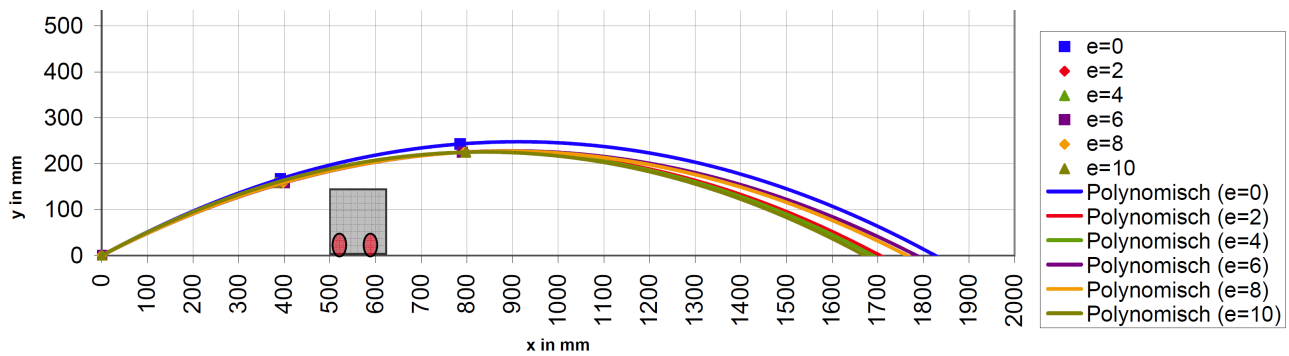


Abbildung 4.2: Flugparabeln für C-Kicker 45x8 $h=0$ als Beispiel für die Überschießbarkeit

Folgende Versuchsparameter werden für den C-Kicker betrachtet (siehe Abb. 4.3):

- Winkel des Kickerbalkens α
- Höhe des Kickerbalkens b
- Material und Oberfläche des Kickers
- Höhe des Kickers h bzw. d
- Abstand Kicker zu Ball e (Leerweg)

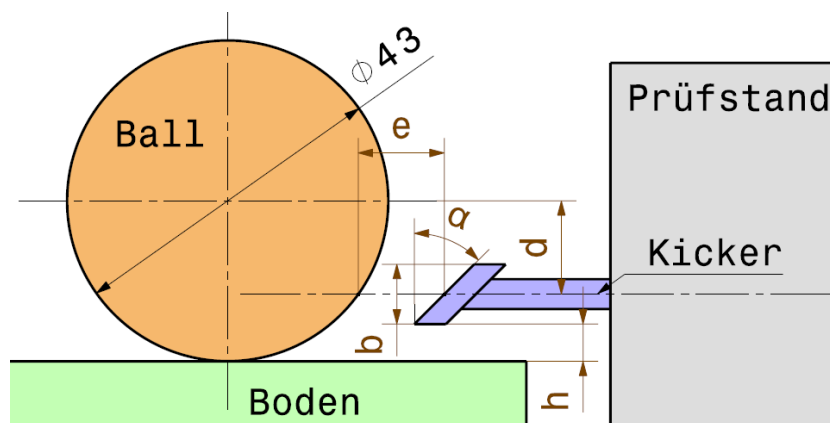


Abbildung 4.3: Versuchsparameter C-Kicker

Für beide Kickerarten sollen derselbe Aufbau und dieselbe Elektronik verwendet werden. Zusätzlich wird ermittelt, wie groß die auftretenden Kräfte sind, um den Kicker hinsichtlich seiner Festigkeit auslegen zu können.

4.2 Theorie

4.2.1 Der Stoß

In einem ersten Schritt wird die Überlegung analysiert, ob aus einer horizontalen Bewegung heraus mit Hilfe eines geneigten Kickerbalkens der Ball überhaupt angehoben werden kann. Dazu werden Ergebnisse aus dem Golfspiel verwendet, da in der SSL ein Golfball verwendet wird.

Diese Untersuchungen ergeben, dass der Ball eher dem Winkel des Golfschlägers (zu 80 %) als dessen Bahn folgt. Bei größeren Winkeln zu etwa 60 % [Tutelman 2010]. Das heißt, bei einem Schuss aus der Horizontalen erhält man 60 % des Winkels des Kickerbalkens (α) als Abschusswinkel. Dies zeigt die Funktionsfähigkeit dieser Variante für einen SSL-Roboter, wenngleich Leistungseinbußen zu erwarten sind (siehe Abb. 4.4).

Ohne Reibung würde der Ball exakt dem Winkel des Golfschlägers folgen. Durch die Reibung folgt er etwas mehr der Bahn des Schlägers und erhält gleichzeitig auch einen Drall [Tutelman 2010]. Demnach sollte der Kickerbalken möglichst glatt sein, um einen möglichst steilen Abschusswinkel zu erreichen.

Ein größerer Winkel führt weiters zu einer geringeren Ballgeschwindigkeit [Tutelman 2010] und somit zu einem geringeren Wirkungsgrad. Insgesamt bewirkt ein größerer Winkel am Kickerbalken zwar einen etwas steileren Abschusswinkel, dieser wird aber in Relation immer schlechter und zusätzlich sinkt die Schussgeschwindigkeit. Daher darf der Winkel auch nicht zu groß gewählt werden, will man noch eine ausreichende Schussweite erzielen.



Abbildung 4.4: Winkel-Verhältnisse beim Abschuss eines Golfballes [Tutelman 2010]

Die Zusammenhänge beim Golfball werden mit der folgenden Formel beschrieben [Tutelman 2010]. Der damit berechnete Winkel soll mit den Versuchsergebnissen verglichen werden.

$$\beta = \alpha * (0,96 - 0,0071 * \alpha)$$

mit

α ... Loft (Schlägerwinkel) in $^{\circ}$

β ... Abschusswinkel in $^{\circ}$

(F4.1)

Am Ende der Versuchsreihe soll noch auf die Stoßzahl eingegangen werden. Sie kann dazu verwendet werden, von der aus den Versuchen resultierenden Ballgeschwindigkeit auf die Kräfte zu schließen, welche für die Festigkeitsberechnung nötig sind. Eine indirekte Messung der Kraft wäre mittels Dehnmessstreifen möglich, aber sehr aufwändig, da die zeitliche Auflösung sehr groß sein müsste und selbst dann noch immer nicht garantiert ist, dass der größte Peak wirklich gemessen werden kann. Weiters würde der Versuchsaufbau den Kicker schwerer machen, was wiederum den Versuch verfälscht.

Die Stoßzahl für den Kontakt zwischen Golfschläger und Ball liegt zwischen 0,78 und 0,83 [Tutelman 2010]. Da die Stoßzahl für das Kicken in der SSL unbekannt ist, soll der Mittelwert davon für die weiteren Berechnungen verwendet werden.

4.2.2 Die Masse des Kickers

Versuche von Cornell haben ergeben, dass bei einem schwereren Kicker weniger Energie in den Ball eingebracht werden kann [Cornell 2003, S.118], weil er aufgrund seiner Trägheit eine geringere Geschwindigkeit erreicht. Da aber die exakten Daten dieser Versuche unbekannt sind, wird in den Versuchen nicht davon ausgegangen. Schließlich wirken sich hier mehr Parameter aus,

wie zum Beispiel die Kraftentfaltung des Elektromagneten über die Zeit und der Leerweg des Kickers e . Da aber der Leichtbau ein generelles Prinzip beim gesamten Roboter ist, soll es auch hier angewendet werden. Um die Anzahl der Versuche überschaubar zu halten wird dieser Parameter nicht weiter untersucht.

4.2.3 Der Hub des Elektromagneten

Als Hub wird der Weg des Eisenkerns im Elektromagneten bezeichnet. Bisher wird beim Austrian Cubes RoboCup Team ein Hub von 15 mm verwendet. Cornell schlägt auf Basis von Versuchen einen Hub von 12,5 mm vor [Cornell 2003, S.121]. Da ein maximaler Schwingenweg der Dribblereinheit von 10 mm gewählt wird, ist aufgrund der Konstruktion bereits ein Leerweg von 10 mm zwingend vorhanden. Es würden dann nur mehr 2,5 mm für den Ballkontakt verbleiben, wählt man die 12,5 mm von Cornell. Umgekehrt ergibt sich aus der Konstruktion ein maximal möglicher Hub von 16 mm, welcher dann auch gewählt und für alle Versuche beibehalten wurde. Auf eine Optimierung bzw. Untersuchung des Hubes wurde zunächst aus Zeitgründen verzichtet und später nachgeholt (siehe Kapitel 4.6).

4.3 Versuchsaufbau

Der konstruierte Prüfstand erlaubt es verschiedene Kicker einzubauen und sämtliche im Lastenheft geforderten Parameter einzustellen (siehe Abb. 4.5).

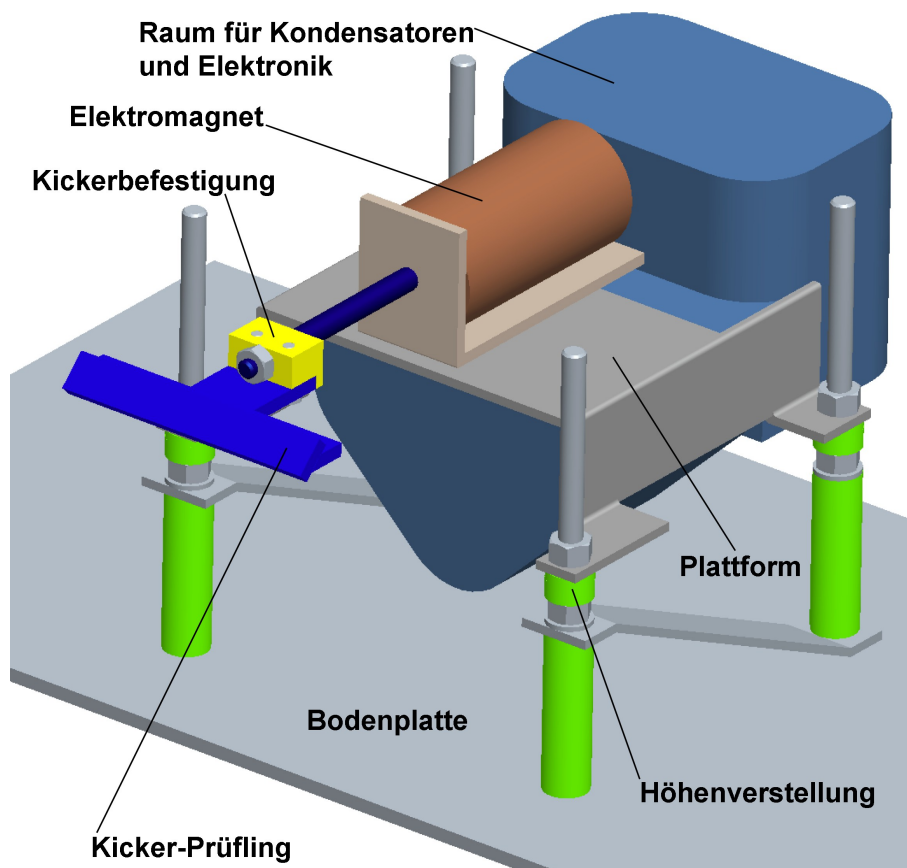


Abbildung 4.5: CAD-Ansicht des Kickerprüfstandes

An der Kickerbefestigung können die Prüflinge montiert werden. Die Prüflinge sind Aluminiumteile mit einem bestimmten Winkel α und einer bestimmten Kickerhöhe b . Die

4 Der Kicker

Höhenverstellung wird mittels Einschieben von Plättchen verschiedener Dicken realisiert, wodurch die Plattform entsprechend angehoben wird. Für die Einstellung des Abstandes von Kicker und Ball wird der gesamte Prüfstand entsprechend positioniert und dann fixiert. Angesteuert wird der Prüfstand von einem Elektromagneten und einer Leistungselektronik, wie sie auch im Roboter verwendet wird.

Um die Funktion des Prüfstandes zu testen und auch ein Gefühl für die Größenordnungen beim C-Kicken zu bekommen, werden zunächst einige Prinzipversuche durchgeführt und die Ergebnisse mit einfachen Mitteln vermessen. Zwar soll für die genaue Bahnbestimmung eine Highspeedkamera zum Einsatz kommen, aufgrund des großen Aufwandes soll aber zuerst das System ungefähr bekannt sein und beherrscht werden.

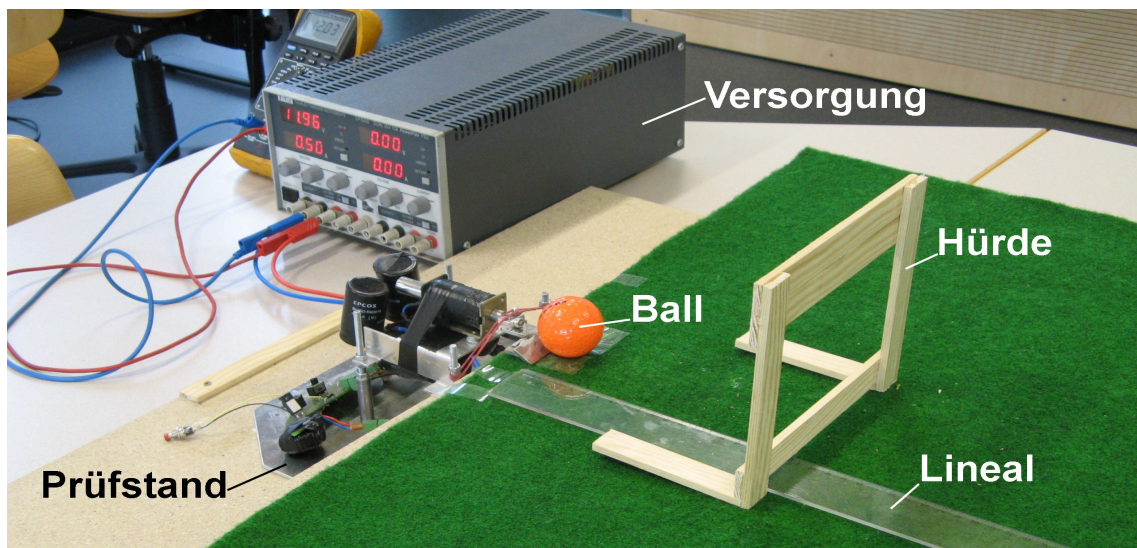


Abbildung 4.6: Foto des Aufbaus der ersten Kickerversuche

Abbildung 4.6 zeigt den Aufbau. Die Hürde hat dieselbe Größe wie ein SSL-Roboter. Damit kann nicht nur die Überschießbarkeit bestimmt werden, sondern auch ein Punkt der Flugparabel, wenn durch eine entsprechende Anzahl an Versuchen die Position bestimmt wird, bei der der Ball die Hürde gerade nicht umstößt.

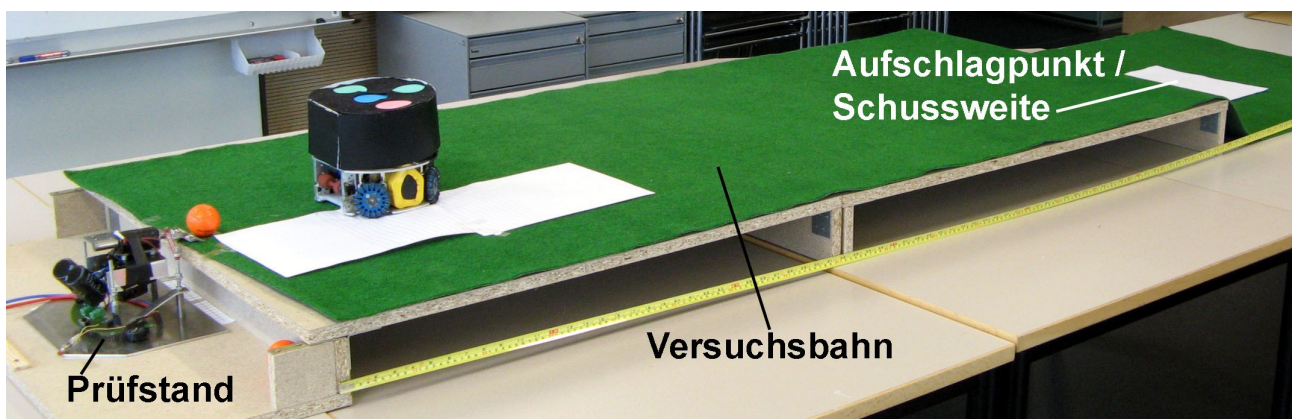


Abbildung 4.7: Foto der Prinzipversuche

Ein weiterer Punkt für die Berechnung der Flugparabel ist der Nullpunkt bzw. die Position des Balles vor dem Abschuss. Der dritte Punkt der Flugparabel wird durch den Aufschlagpunkt, also die Schussweite, bestimmt. Abbildung 4.7 zeigt dazu den gesamten Aufbau.

4 Der Kicker

Da die Prinzipversuche das in der Theorie erwartete Ergebnis grundsätzlich widerspiegeln, werden nun eine Auswahl an Prüflingen gefertigt (siehe Abb. 4.8). Die Definition der geometrischen Parameter sind den Abbildungen 4.1 für den H-Kick und 4.3 für den C-Kick zu entnehmen. Die Flugbahn beim C-Kick soll mittels einer Highspeedkamera genau vermessen werden. Im Gegensatz zum C-Kick soll beim H-Kick keine Flugbahn, sondern nur die Geschwindigkeit ermittelt werden.

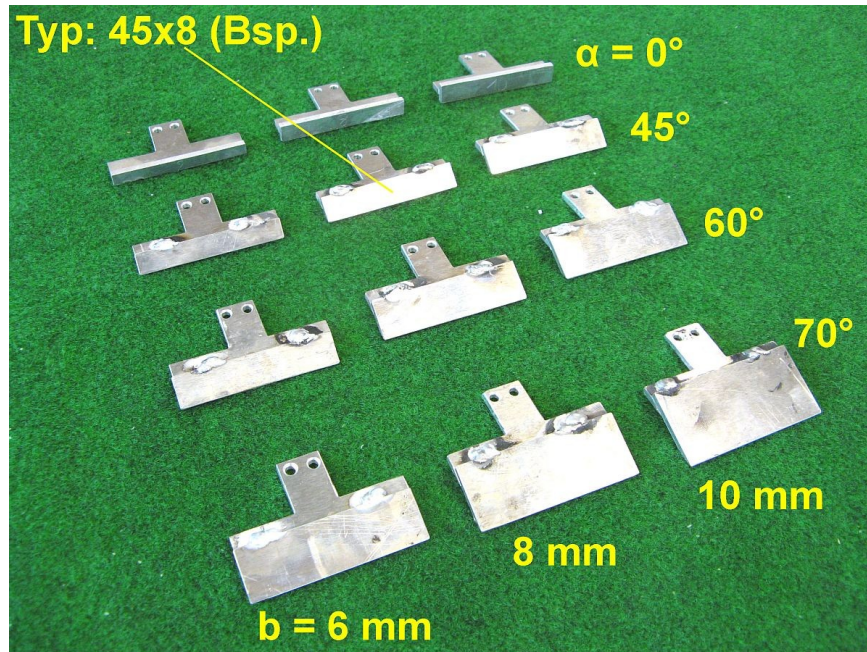


Abbildung 4.8: Prüflinge und Erklärung zur Typbezeichnung

Der Aufbau für die Versuche mit der Highspeedkamera ähnelt jenem der Vorversuche, zusätzlich wird knapp hinter dem Prüfstand ein Raster montiert um später anhand des Videos die Flugbahn errechnen zu können (siehe Abb. 4.9). Gleichzeitig werden im Video die Versuchsnummer, der Kickertyp, die Parameter und die Zeit in Millisekunden eingeblendet.

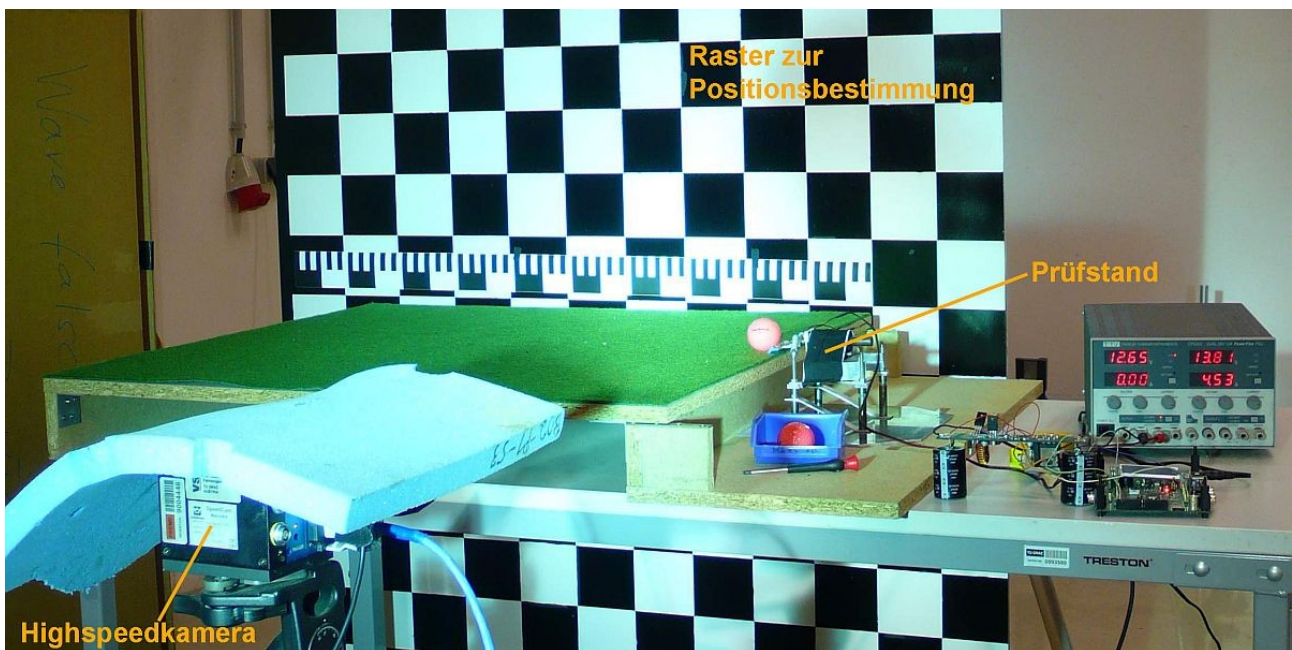


Abbildung 4.9: Aufbau für die Versuche mit der Highspeedkamera

In der abschließenden Berechnung wird der Luftwiderstand vernachlässigt, was bei der geringen Geschwindigkeit und der Tatsache, dass ein Golfball einen geringen c_w -Wert hat, keine große Ungenauigkeit darstellt. Die Berechnung der Flugbahn erfolgt mittels zweier Punkte und der dazwischen verstrichenen Zeit. Verschiedene Berechnungsmethoden (Berechnung der Bahn mittels dreier Punkte, bzw. anderer Punkte) bei demselben Versuch zeigen eine Unsicherheit von maximal 8 % auf, welche hauptsächlich durch die Ableseungenauigkeit der Ballposition aus dem Video resultiert. Die Unterschiede durch die Streuung bei den Versuchen liegt in einer ähnlichen Größenordnung, wodurch die Messunsicherheit insgesamt bei etwa 15 % liegt.

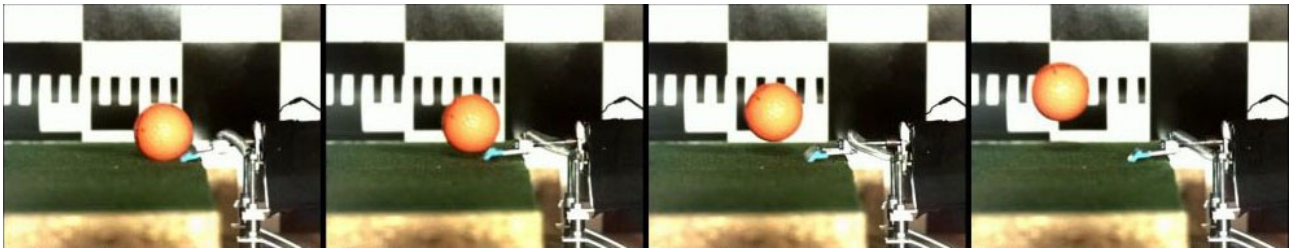


Abbildung 4.10: Ausschnitt aus einem Messvideo

4.4 Versuche zum H-Kicker

Bei den Versuchen zum H-Kicker ist das Ziel, in Abhängigkeit der Höhe und des Kicker-Ball-Abstandes, die Geschwindigkeit zu bestimmen und ein Optimum zu finden. Insbesondere die Höhe ist interessant, da einerseits ein weiter oben liegender H-Kicker die Konstruktion erleichtert, andererseits möglicherweise durch einen höheren Treffpunkt der Ball einen zusätzlichen Vorwärtsdrall erhält, welcher ihn zusätzlich beschleunigen könnte.

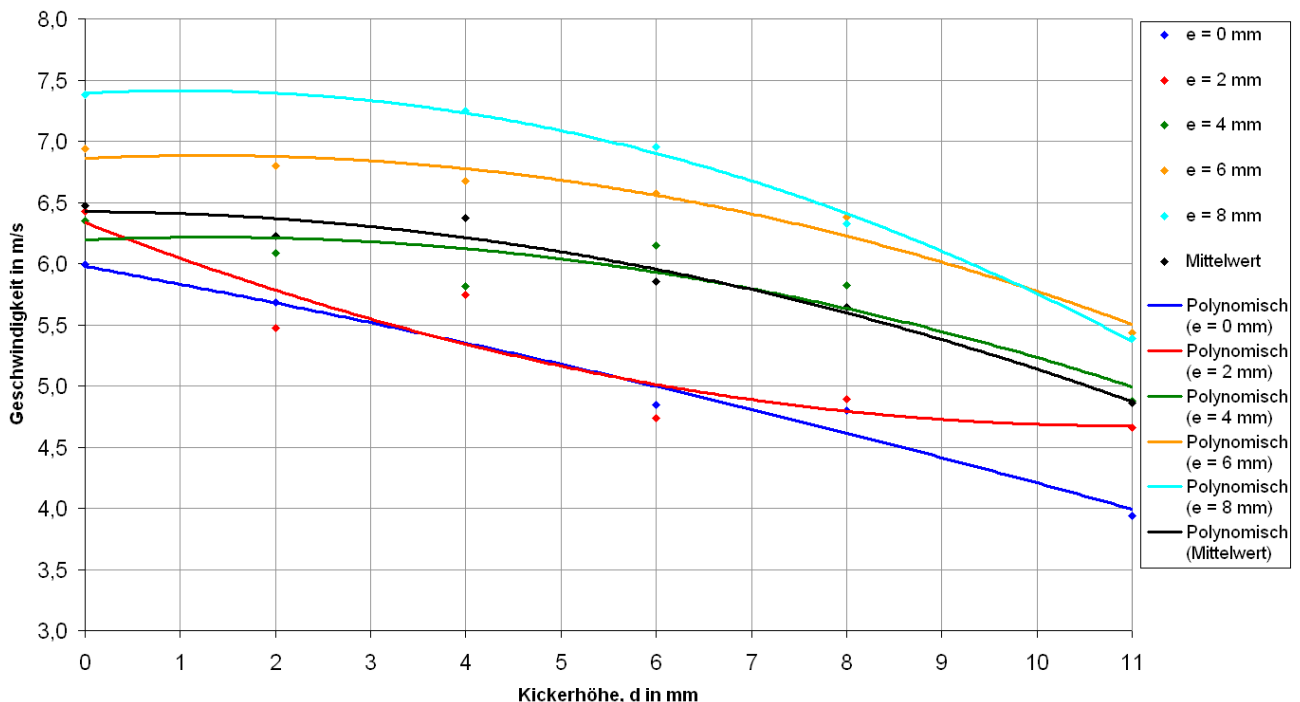


Abbildung 4.11: Versuche zum H-Kicker: Geschwindigkeit in Abhängigkeit der Kickerhöhe

Zunächst sollen die Messergebnisse hinsichtlich der Kickerhöhe analysiert werden (siehe Abb. 4.11). Unabhängig vom Kicker-Ball-Abstand ist ein höherer Treffpunkt am Ball schlechter: Idealerweise trifft man den Ball genau in der Mitte. Der Grund dafür ist, dass durch einen höheren Treffpunkt mehr Energie nach unten wirkt und somit vernichtet wird. Die These, dass dadurch

4 Der Kicker

Vorwärtsdrall entsteht kann zwar bestätigt werden, das resultiert in Summe aber nicht in einer höheren Geschwindigkeit, ganz im Gegenteil. Bei einer Höhendifferenz von 11 mm tritt dann sogar ein Hüpfen des Balles auf, da der Ball derart stark in den Boden gedrückt wurde, sodass dieser abprallt und nach oben springt. Das ist bei einem H-Kick natürlich unerwünscht.

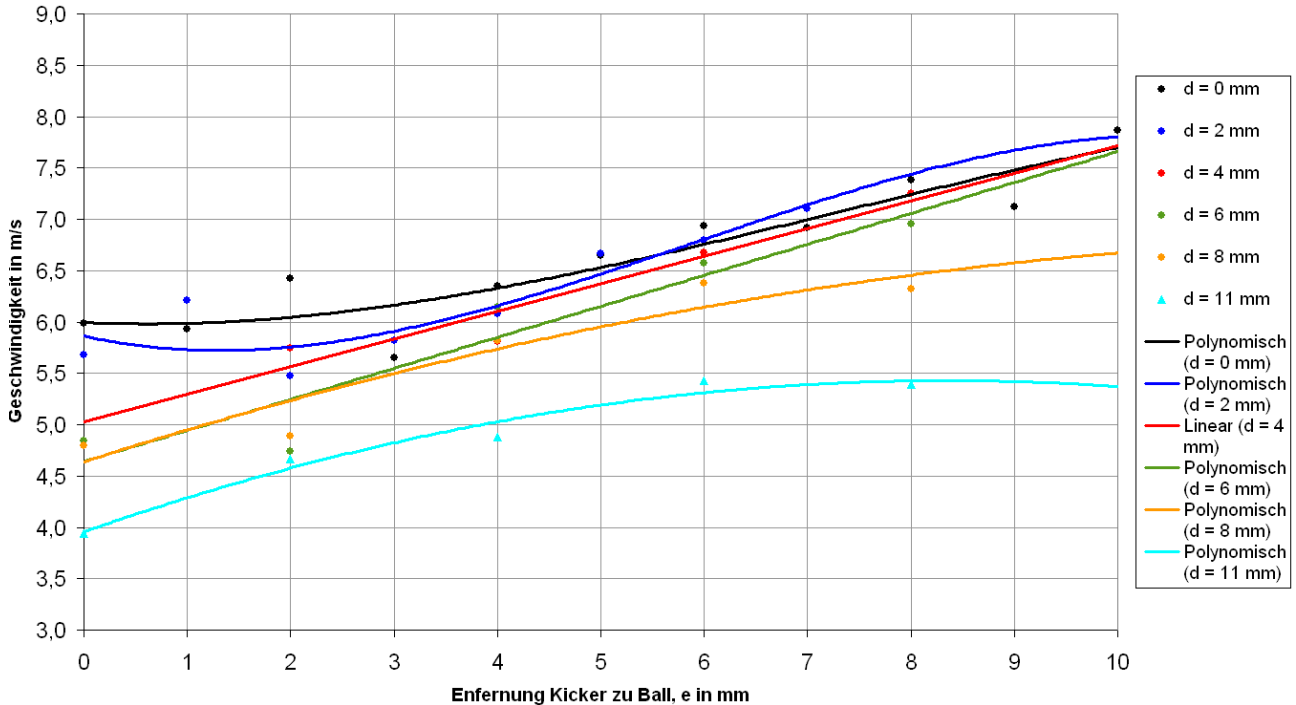


Abbildung 4.12: Versuche zum H-Kicker, Geschwindigkeit in Abhängigkeit der Kicker-Ball-Entfernung

Bei Betrachtung des Kicker-Ball-Abstand (siehe Abb. 4.12) ist zu erkennen, dass ein aus konstruktiven Gründen ohnehin notwendiger Abstand von 10 mm ideal ist. Es ist somit besser, wenn der Kicker zuerst beschleunigt wird und dann auf den Ball trifft und nicht – wie es beim Extremfall $e = 0$ mm der Fall ist – nur weggeschoben wird. Der Grund dafür liegt vermutlich in der in den Kondensatoren des Kicksystems gespeicherten Energiemenge. Diese wird genau in der Zeit komplett in der Spule umgesetzt, in der der Kicker einen Weg etwa 10 mm zurücklegt und somit der Kicker dann die größte Geschwindigkeit erreicht hat.

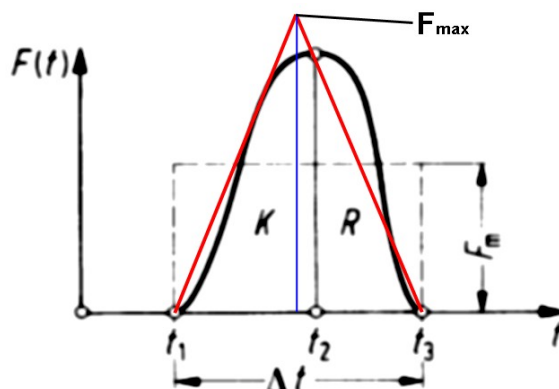


Abbildung 4.13: Stoßverlaufaufnahme, vgl. Dubbel 2005, S.B37

Zusätzlich wird für den Kickertyp "0x8" die Kontaktzeit bestimmt. Mit dieser Information und unter Einbeziehung der Stoßzahl soll nun die auf den Kicker wirkende Kraft ermittelt werden. Da

4 Der Kicker

der Kraftverlauf während des Stoßes nicht ohne übermäßigen Aufwand ermittelt werden kann, werden ein linearer Verlauf sowie Kompressions- (K) und Restitutionsphase (R) als gleich lang angenommen (siehe Abb. 4.13). Daraus lässt sich eine mittlere Stoßkraft bestimmen und aus dieser wiederum die maximal auftretende Kraft während des Stoßes. Da diese Kraft aus dem Impuls des Balles errechnet wird, wird für die Kickerkraft der mit dem Kehrwert der Stoßzahl multiplizierte Wert angesetzt (siehe Formel F4.2). Bei einer Stoßzahl von 0,8 liegt dieser Wert somit um ca. 20 % über der maximalen Ballkraft.

$$\begin{aligned}
 p_{Ball} &= m_{Ball} * v_{Ball} \\
 p_{Ball} &= F_{mittel} * \Delta t \\
 F_{BallMittel} &= \frac{m_{Ball} * v_{Ball}}{\Delta t} \\
 F_{MaxKicker} &= \frac{2 * F_{BallMittel}}{k}
 \end{aligned}
 \tag{F4.2}$$

mit

p ... Impuls
 k ... Stoßzahl

Natürlich stellt diese Berechnung nur eine sehr ungenaue Näherung dar, eine andere Methode ist aber mangels eines echten Kraftverlaufes nicht möglich. Da die Verhältnisse im Roboter ohnehin je nach Spielsituation sehr unterschiedlich sein werden, ist diese Näherung zur Bestimmung der Kraft sicherlich ausreichend, solange dann bei der Auslegung hinsichtlich der Festigkeit entsprechende Sicherheiten verwendet werden.

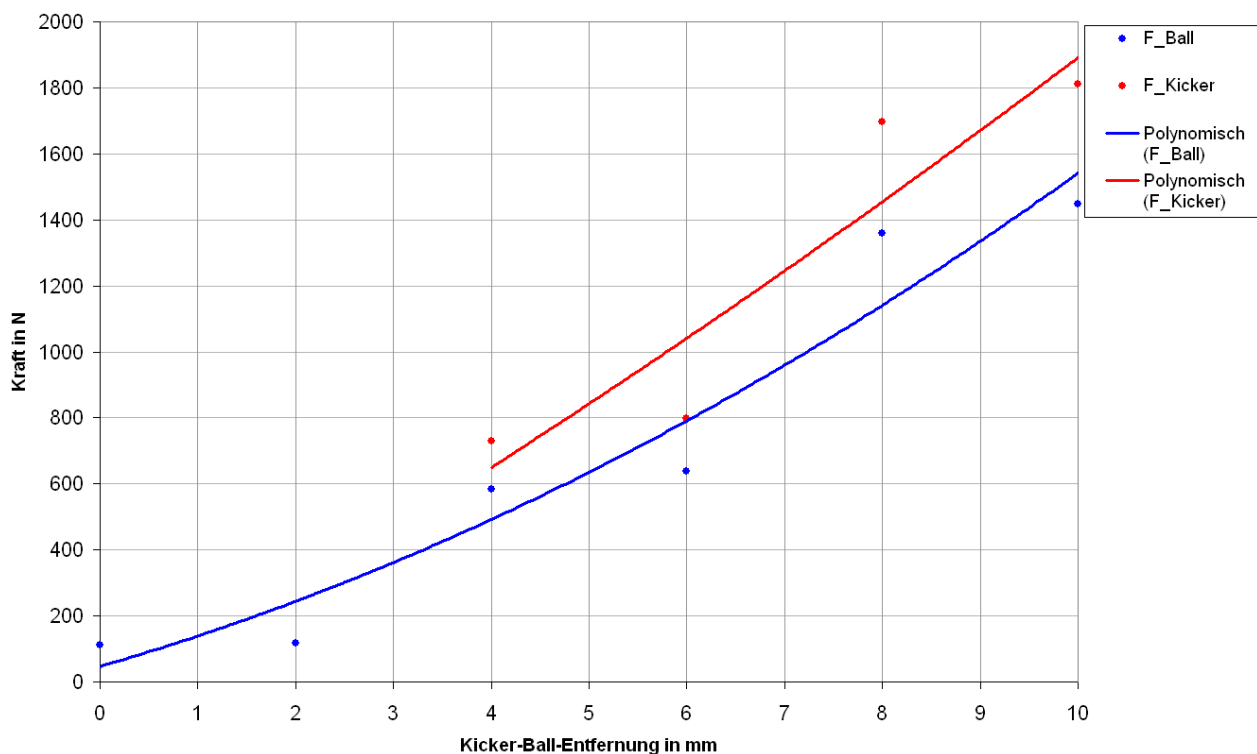


Abbildung 4.14: Maximalkraft in Abhängigkeit der Kicker-Ball-Entfernung für Kickertyp "0x8" und bei $d = 0$ mm

Das Ergebnis des später für den Roboter gewählten Kickers zeigt, dass bis zu einer Entfernung von 2 mm der Ball quasi nur weggeschoben wird, weswegen die Kraft sehr klein ist und somit nicht von

einem Stoß im eigentlichen Sinn gesprochen werden kann. Bei größeren Abständen nimmt die Kontaktzeit stark ab, weshalb sehr große Kräfte entstehen. Die blaue Linie in Abbildung 4.14 zeigt dabei die Kraft im Bezug auf den Ball, die rote Linie die aufgrund des Stoßes und der Stoßzahl erhöhte Kraft am Kicker. Die Versuche führen zu dem Ergebnis, dass bei dem im Roboter verbauten Kicker, dessen Kicker-Ball-Abstand 10 mm beträgt, mit einer Kraftspitze von 2000 N gerechnet werden muss.

An dieser Stelle wird das Ergebnis der Stoßversuche beim C-Kicker bereits vorweggenommen, da eine große Ähnlichkeit vorliegt. Lediglich quantitativ liegen die Werte des C-Kickers unter jenen des H-Kickers, da der Ball nach dem Abschuss einen kleineren Impuls hat.

4.5 Versuche zum C-Kicker

Aus den in Abb. 4.8 aufgelisteten Prüflingen werden mangels verfügbarer Zeit, was die Verwendung der Highspeedkamera betrifft, die wichtigsten Prüflinge gewählt und getestet. Es ist nicht für jeden Prüfling die volle Bandbreite an Tests durchgeführt worden, da in einigen Fällen keine sinnvollen Ergebnisse mehr vorhanden sind. Die Vorwärtsinterpolation der Ergebnisse ist also keinesfalls zulässig, das gilt für alle Ergebnisse dieses Kapitels.

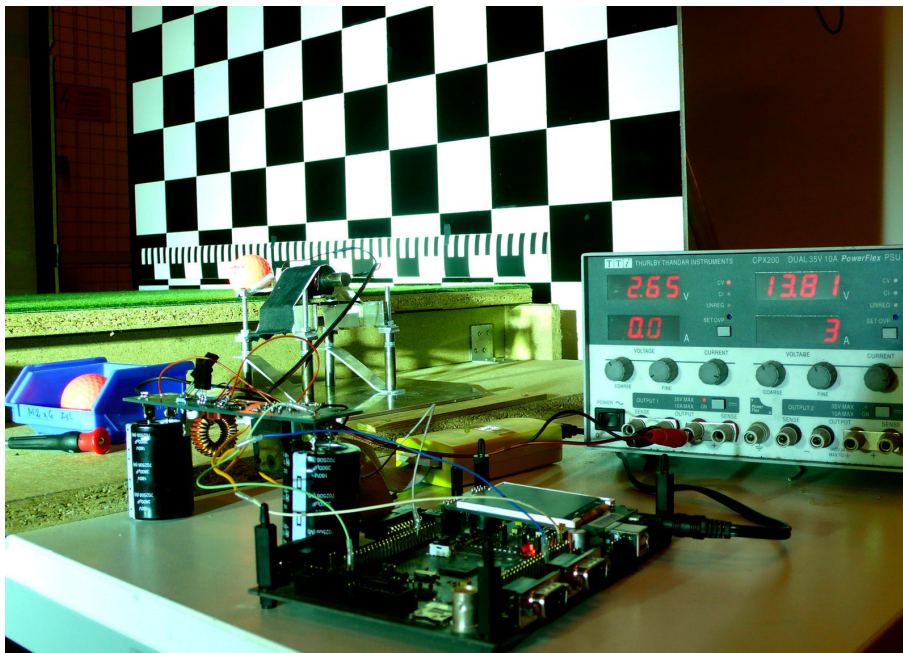


Abbildung 4.15: Foto des Versuchsaufbaus

4.5.1 Die Flugparabeln

Als erstes werden die Flugparabeln, die aus dem Highspeedkamera-Video errechnet werden, behandelt. In den Abbildungen 4.16 bis 4.20 ist zusätzlich mittels der gelb-schwarzen Kontur die Freistoßssituation angezeigt, also ein SSL-Roboter in 50 cm Entfernung.

Hinsichtlich der Flugbahn gibt es zwar deutliche Unterschiede, die effektive Reichweite unterscheidet sich aber kaum und auch die Überschießbarkeit eines gegnerischen Roboters ist bei den meisten Varianten nicht gegeben. Am besten schneidet der Kickertyp "45x8" ab, allerdings auch nur in bestimmten Bereichen. Weiters ist überraschenderweise – mit Ausnahme des genannten "45x8" – der Unterschied zwischen den Kickervarianten relativ gering. An dieser Stelle soll noch einmal erwähnt werden, dass die Ungenauigkeit dieser Auswertung bei etwa 15 % liegt.

4 Der Kicker

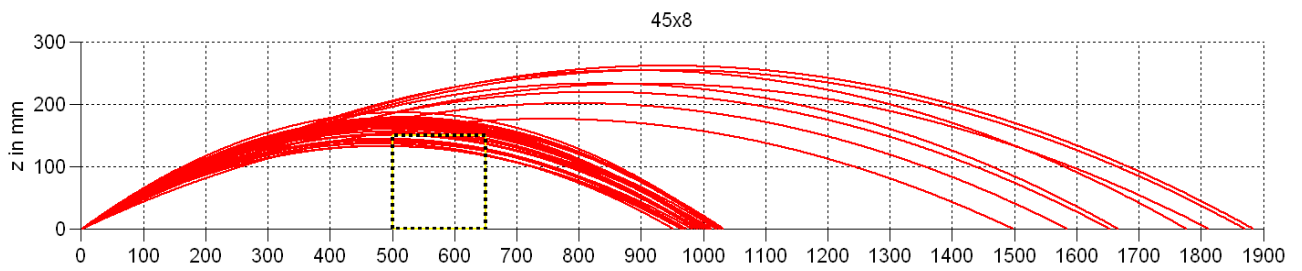


Abbildung 4.16: Alle Flugparabeln für Kickertyp "45x8"

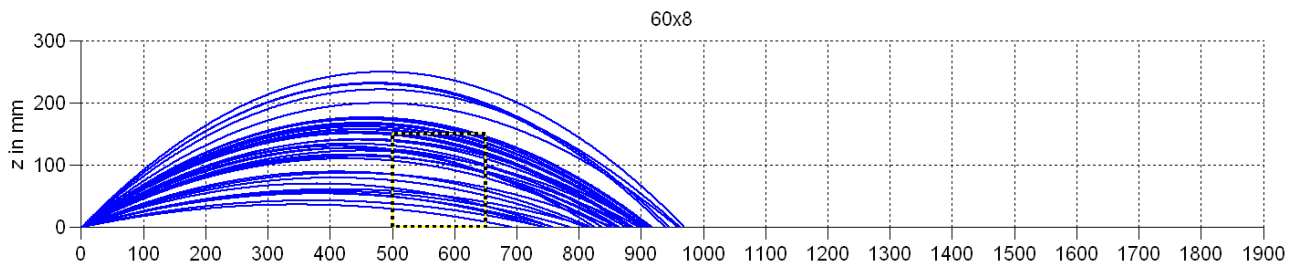


Abbildung 4.17: Alle Flugparabeln für Kickertyp "60x8"

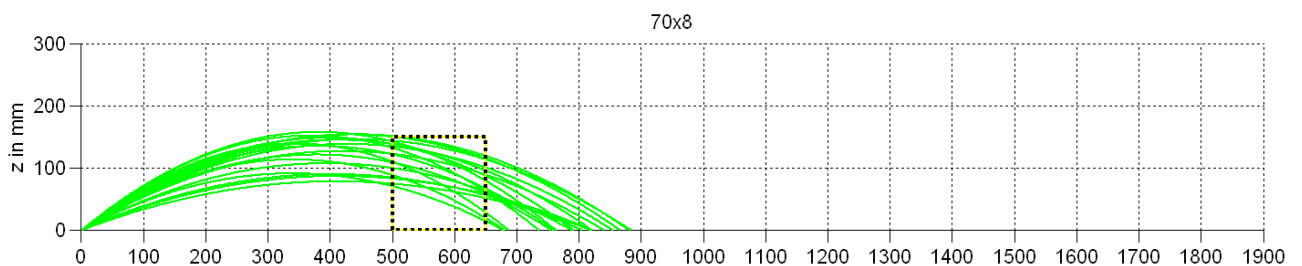


Abbildung 4.18: Alle Flugparabeln für Kickertyp "70x8"

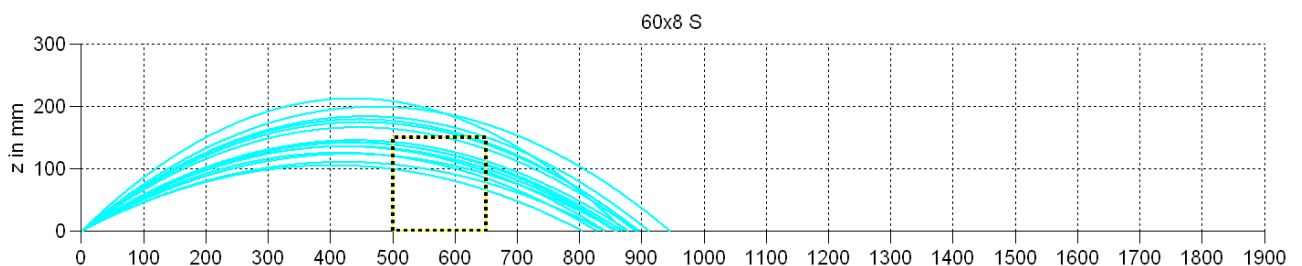


Abbildung 4.19: Alle Flugparabeln für Kickertyp "60x8" mit Schleifpapier als Oberfläche

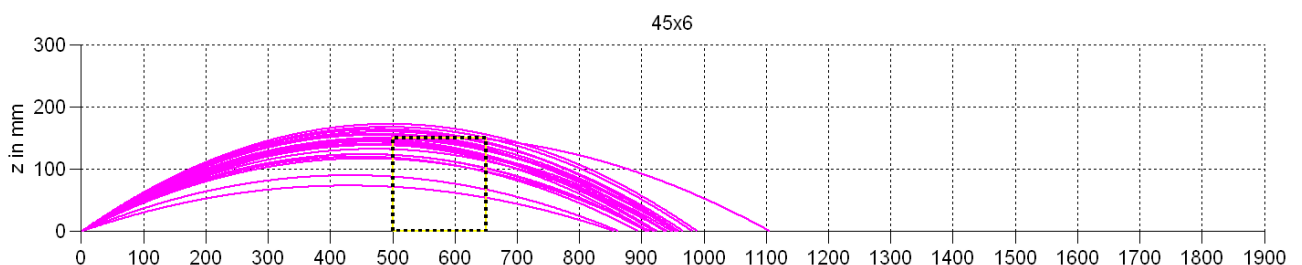


Abbildung 4.20: Alle Flugparabeln für Kickertyp "45x6"

Da offensichtlich nur der Kicker "45x8" sinnvoll im Roboter eingesetzt werden kann, soll nun untersucht werden, wie dieses Ergebnis zu Stande kommt, und ob man Gründe finden kann, die dieses Ergebnis verursachen.

4.5.2 Der Einfluss der Höhe

Wertet man die Versuche hinsichtlich der Höhe h aus, so zeigt sich Folgendes: Die Geschwindigkeit des Balles ist von der Höhe unabhängig, lediglich die Reichweite ist bei $h = 0$ mm deutlich höher, was somit nur auf einen steileren Abschusswinkel zurückzuführen ist (siehe Abb. 4.21). Bei den anderen Kickern zeigt sich eine noch geringere Abhängigkeit, als Beispiel sei hier der Kickertyp "45x6" erwähnt (siehe Abb. 4.22). Die Auswertung der übrigen Kickertypen befindet sich im Anhang S.A43ff.

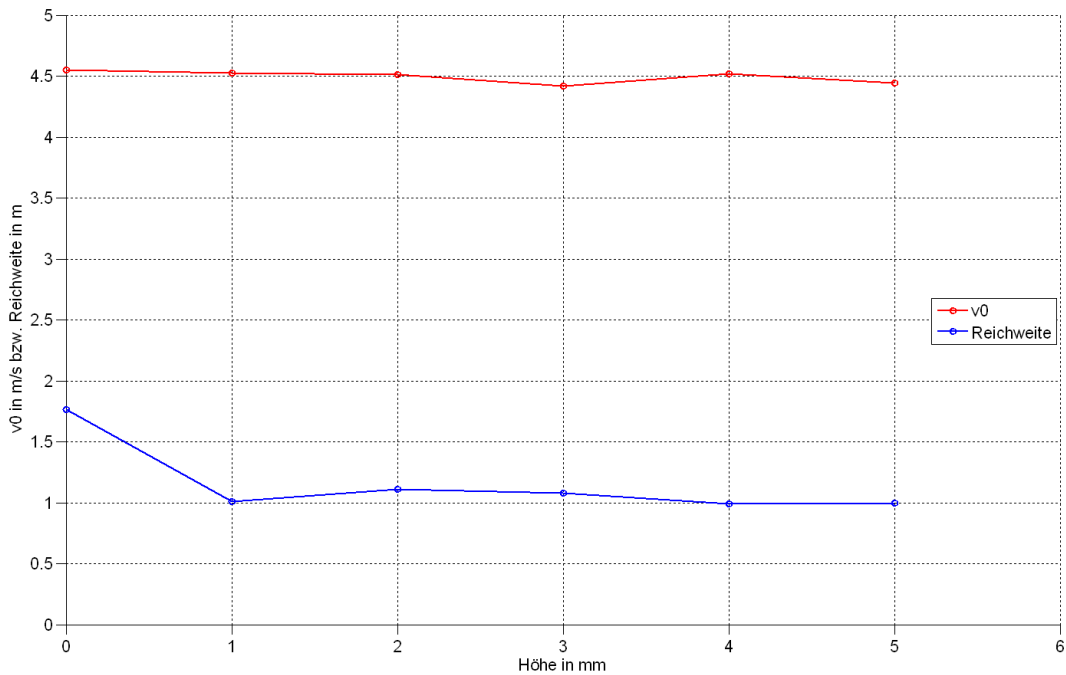


Abbildung 4.21: Geschwindigkeit und Reichweite in Abhängigkeit der Höhe für den Kicker "45x8"

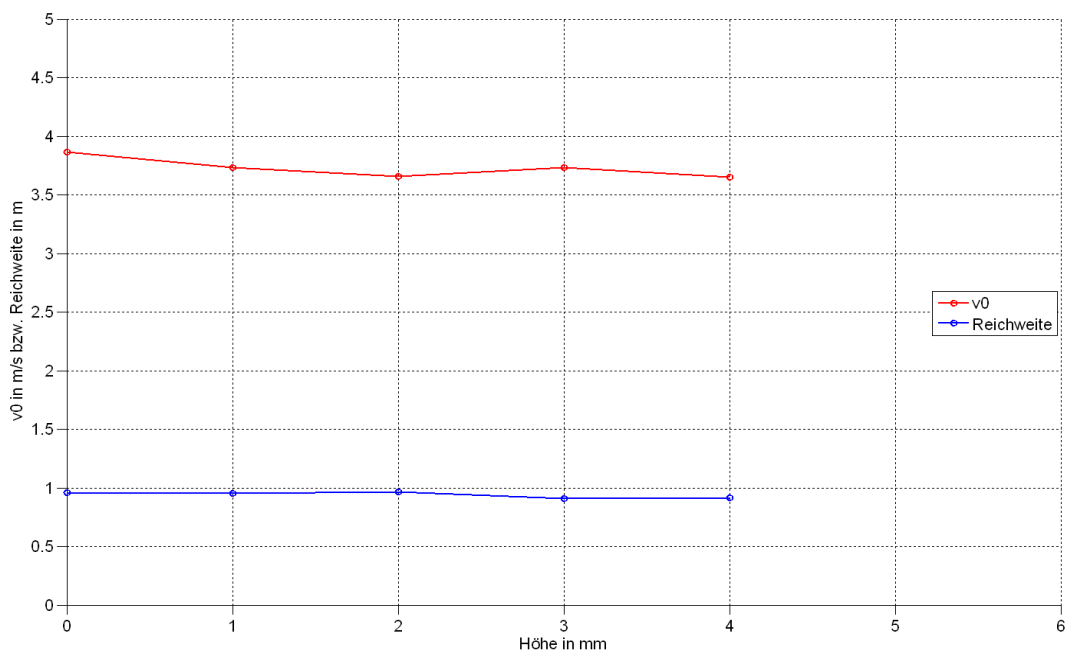


Abbildung 4.22: Geschwindigkeit und Reichweite in Abhängigkeit der Höhe für den Kicker "45x6"

An dieser Stelle darf natürlich nicht unerwähnt bleiben, dass bei größeren Höhen h die Geschwindigkeit und Reichweite deutlich abnehmen. Diese Versuche wurden aber nicht in die Grafiken aufgenommen, da dann keine sinnvolle Flugbahn zu Stande kommt und der Versuch abgebrochen wurde.

Der geringe Einfluss der Kickerhöhe auf die Flugbahn kann damit erklärt werden, dass der Ball trotz unterschiedlicher Höhe des Kickers in etwa an derselben Position getroffen wird, da der Kickerbalken geneigt und eine ebene Fläche ist.

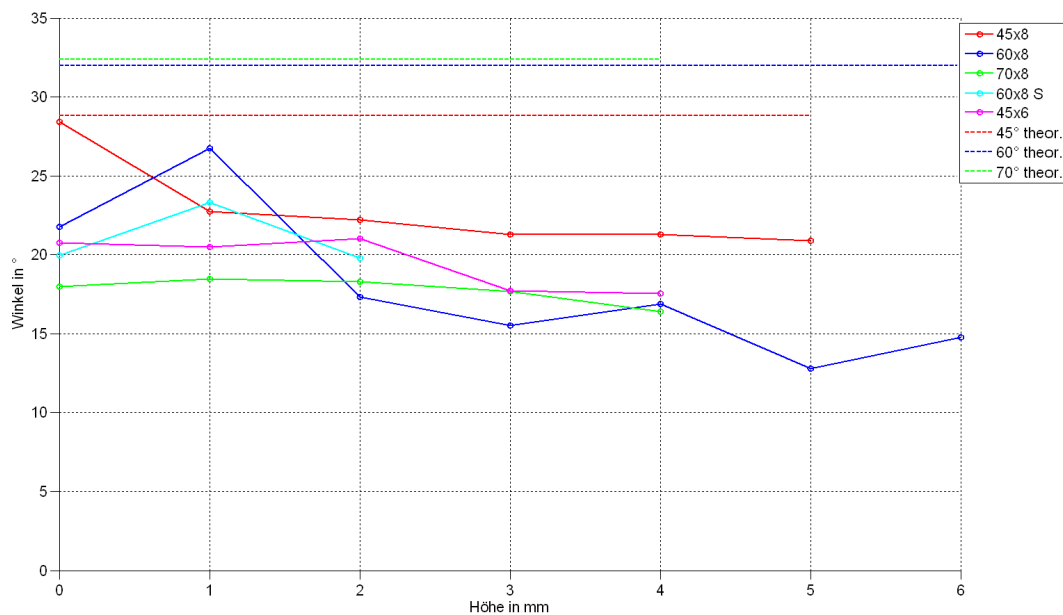


Abbildung 4.23: Abschusswinkel in Abhängigkeit der Höhe für alle Kickertypen

In der Abbildung 4.23 sind die Abschusswinkel der Kickertypen aufgetragen sowie der zu erwartende Winkel nach der Formel (F4.1) für das Golfspiel (siehe auch Auswertungen im Anhang S.A43ff). Es zeigt sich, dass es keine großen Unterschiede zwischen den Kickertypen gibt, weshalb der Grund für die Unterschiede zwischen den Kickern nur in der Geschwindigkeit liegt. Diese hängt wiederum nur mehr vom Kickertyp selbst ab. Die aus dem Golfspiel entnommene These nur für einen Fall, nämlich den Kicker "45x8" bei der Höhe Null, bestätigt werden. In allen anderen Fällen bleibt der Abschusswinkel teilweise deutlich darunter. Vergleicht man den Kicker "60x8" mit und ohne Schleifpapier als Oberfläche so zeigt sich, dass tatsächlich eine höhere Reibung einen negativen Einfluss hat, was wieder der These entsprechen würde. Möglicherweise gelten die Annahmen aus Kapitel 4.2.1 nur für Winkel unter 45° . Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass auch der Abschusswinkel im Wesentlichen von der Höhe unabhängig ist, sofern h nicht allzu groß wird.

4.5.3 Der Einfluss des Kicker-Ball-Abstandes

Dieselben Versuche sollen nun hinsichtlich des Parameters Kicker-Ball-Abstand (e) ausgewertet werden (siehe Abb. 4.24). Hier zeigt sich für alle Kickertypen, dass die Geschwindigkeit mit zunehmendem Abstand leicht ansteigt (siehe auch Anhang S.A43ff). Der Einfluss auf die Reichweite ist hingegen sehr gering, was zu der Schlussfolgerung führt, dass der Abschusswinkel mit zunehmendem Abstand geringer wird. Das zeigt sich dann auch in der Auswertung des Abschusswinkels (siehe Abb. 4.25). Dieser sinkt bei den meisten Kickertypen mit zunehmendem Leerweg e deutlich ab. Die Grund dafür könnte im Stoß selbst liegen. Bei einem größerem Kicker-Ball-Abstand ist die Geschwindigkeit im Moment des Ballkontaktes höher, und damit auch die

4 Der Kicker

Kraft (siehe Kapitel 4.4). Da – wie an anderer Stelle (Kapitel Fahrwerk) beschrieben – die Reibung nur in Spezialfällen unabhängig von der Kraft ist, und wie in Kapitel 4.2.1 die Reibung auf den Stoß einen großen Einfluss ausübt, könnte aus der Änderung der Reibung eine Änderung des Stoßverhaltens resultieren.

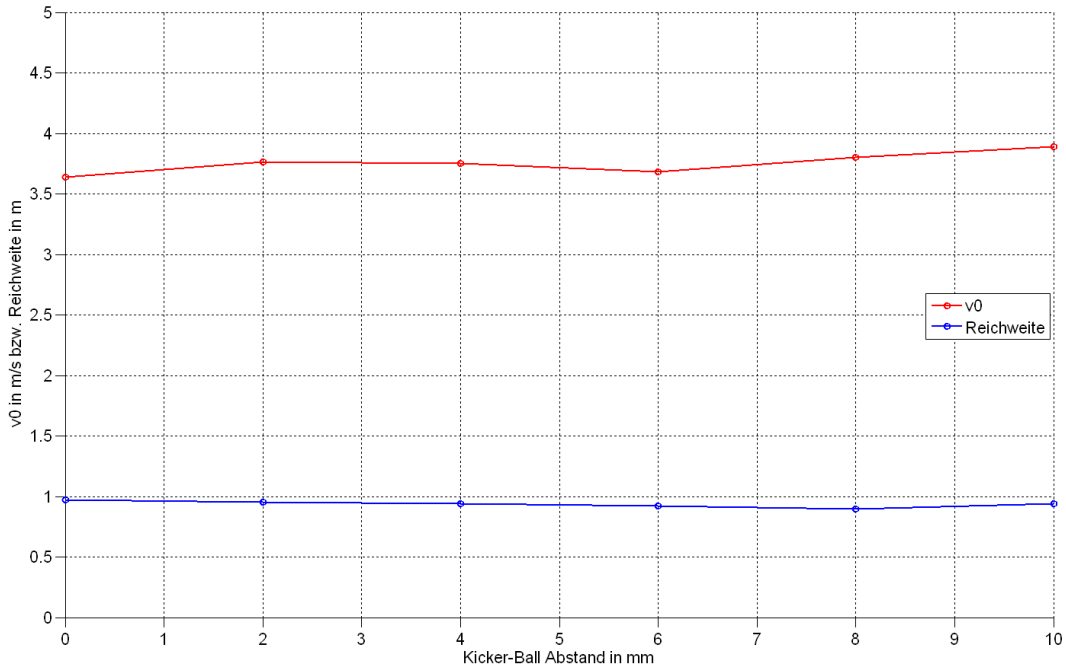


Abbildung 4.24: Geschwindigkeit und Reichweite in Abhängigkeit des Kicker-Ball-Abstandes für den Kicker "45x8"

Auch hier kann der Winkel aus der These vom Golfspiel nicht erreicht werden kann. Auch gilt hier das gleiche wie für den Parameter h , den großen Unterschied macht der Kickertyp selbst, nicht aber der getestete Parameter.

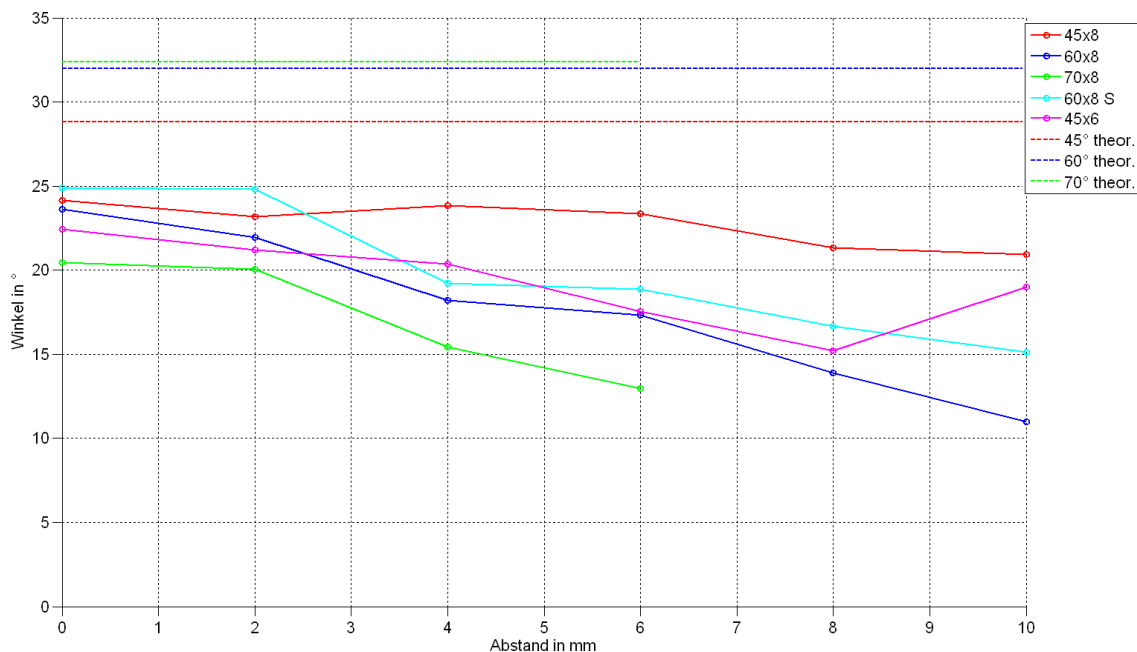


Abbildung 4.25: Abschusswinkel in Abhängigkeit des Kicker-Ball-Abstandes für alle Kickertypen

4.5.4 Die Ballenergie in Abhängigkeit des Winkels

Aus der Abschussgeschwindigkeit und der Masse des Golfballs kann die kinetische Energie errechnet werden. Fasst man dabei die Ergebnisse der Versuche von H- und C- Kicker zusammen und definiert weiters, dass bei einem Winkel von 90° auch die Energie Null sein muss, kann man einen Zusammenhang zwischen Ballenergie und Kickerwinkel α (siehe Abb. 4.26) erzeugen. Die blauen Punkte zeigen dabei das Ergebnis aus den Versuchen, die rote Linie zeigt eine polynomische Näherung (siehe Abb. 4.27).

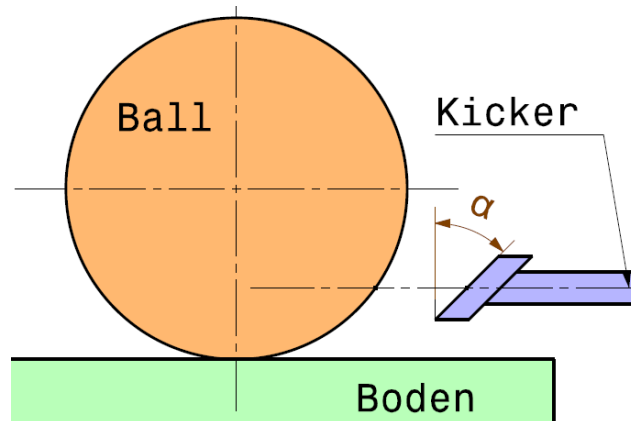


Abbildung 4.26: Definition des Kickerwinkels α

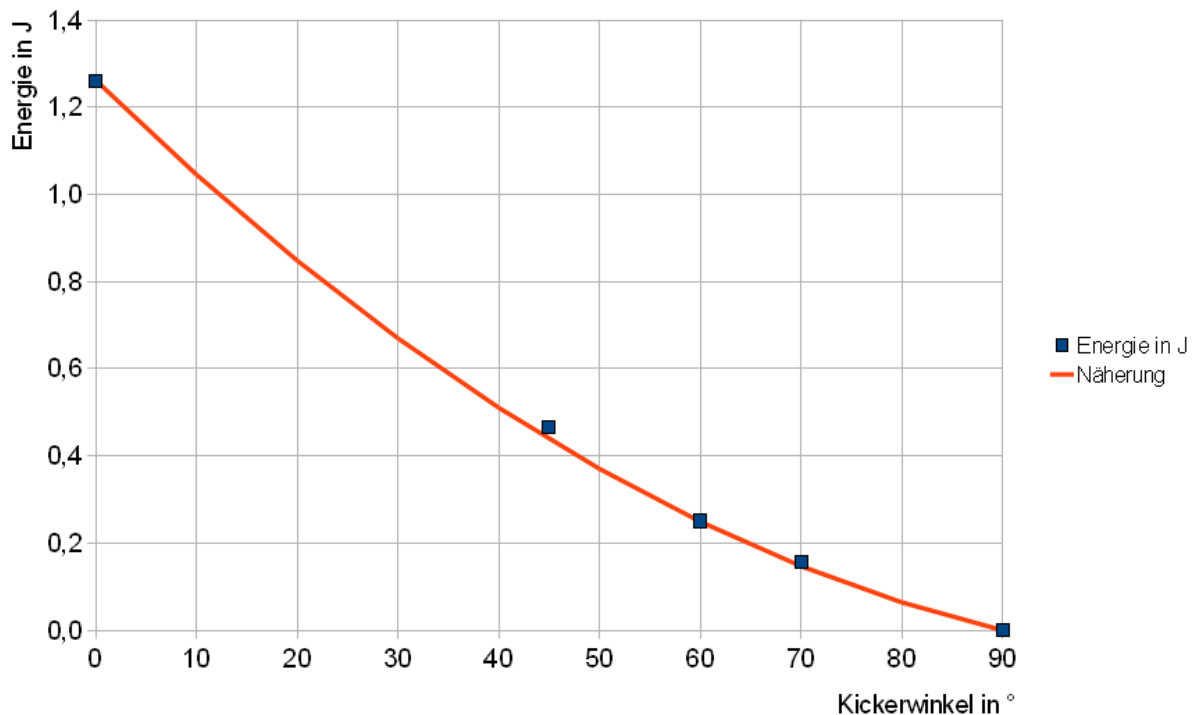


Abbildung 4.27: Ballenergie in Abhängigkeit des Kickerwinkels

$$E = E_0 * \frac{\left(\frac{\pi}{2} - \alpha\right) + \left(\frac{\pi}{2} - \alpha\right)^2}{\frac{\pi}{2} + \left(\frac{\pi}{2}\right)^2} \quad (\text{F4.3})$$

mit

E_0 ... Ballenergie bei $\alpha=0^\circ$ in J

α ... Kickerwinkel in rad

Für diesen Anwendungsfall lässt sich also eine recht gute Näherung für den Zusammenhang zwischen der Ballenergie und dem Kickerwinkel definieren (siehe Formel F4.3). Weiters erkennt man, dass der 45° -Winkel, der für das C-Kicken verwendet wird, bei gleicher elektrischer Energie nur mehr etwa ein Drittel gegenüber dem H-Kicker auf den Ball übertragen kann. Wie die Energieausbeute für das C-Kicken verbessert werden kann, wird als Abschluss in Kapitel 4.6 erläutert.

4.6 Zusammenfassung der Kicker-Versuche

Im Gegensatz zu den Ergebnissen aus den Versuchen zum H-Kicker scheint der Einfluss der untersuchten Parameter beim C-Kicker recht gering. So hatte zum Beispiel der Kicker-Ball-Abstand beim H-Kicker einen sehr starken Einfluss, beim C-Kicker hingegen einen sehr geringen. Das liegt an der Eigenheit beim H-Kick, dass je nach Abstand der Ball eher geschoben oder eher gestoßen wird. Bei C-Kick hingegen wird der Ball immer gestoßen, also nur sehr kurz berührt, wie auch Detailvideos mit der Highspeedkamera gezeigt haben. Weiters ist der Einfluss des Kickertyps selbst, wie es auch aus der Theorie zu erwarten ist, so groß, sodass die anderen Parameter kaum noch ins Gewicht fallen. Offen bleibt aber, warum zwar dieser Einfluss an sich groß ist, das Ergebnis quantitativ aber völlig anders ist als es die Theorie vermuten lässt. Es kann jedoch die Vermutung angestellt werden, dass die Führung des Kickers im Versuchsaufbau zu viel Spiel hatte, und somit der Kicker den Ball gar nicht in dem Winkel getroffen hat, wie man es erwarten würde. Auch die Kickerhöhe b hat einen massiven Einfluss, was sich durch das wesentlich schlechtere Abschneiden des Kickers "45x6" im Vergleich zum "45x8" gezeigt hat. Möglicherweise müsste die Kickerhöhe noch gesteigert werden, um sich dem Ergebnis aus dem Golfspiel annähern zu können. Da das im Roboter aber konstruktiv nicht möglich ist, wird diese Untersuchung ausgelassen. Die Tabellen 4.1 und 4.2 zeigen den Einfluss der untersuchten Parameter und sein Optimum.

Neben den vielen Ergebnissen aus den Versuchen bleibt als zusätzliche Erkenntnis, dass man noch mehr Versuche benötigen würde, um eine umfassende Beschreibung des (Stoß-)Verhaltens beim Kicken zu ermöglichen. Während zum Beispiel bei den Versuchen zum C-Kick der Einfluss der Höhe h recht gering ist, hat sich im praktischen Betrieb des Roboters gezeigt, dass ihr Wert entscheidend ist und genau eingestellt werden muss, um überhaupt einen hohen Schuss abgeben zu können. Diese Diskrepanz zwischen Versuch und Roboter lässt sich schwer erklären, da alle Parameter prinzipiell gleich sind. Lediglich die höhere Kickermasse und die präzisere Führung unterscheiden den Kicker im Roboter von dem im Versuch. Offenbar ist der Einfluss dieser Parameter so groß, dass sie einer eigenen Untersuchung bedürfen.

Es zeigt sich, dass ein C-Kick durch eine rein horizontale Kickerbewegung zwar funktioniert, aber weder effizient ist, noch so gut, wie es erwartet wurde. Daher wird als nächster Schritt im Rahmen des Austrian Cubes RoboCup Teams die Untersuchung einer Schwinge als C-Kick-System begonnen. Diese haben gezeigt, dass eine Schwinge wesentlich besser geeignet ist, da bei diesen

4 Der Kicker

Versuchen mit demselben Elektromagneten Schussweiten von über 8 m erreicht werden [Mitterer, Rabitsch 2010, S.24ff].

H-Kicker Parameter	Ziel / Optimum	Einfluss
Kickerhöhe (d)	ideal sind 0 mm	groß
Kicker-Ball-Abstand (e)	eher groß, hier 10 mm	groß

Tabelle 4.1: Parametereinfluss auf den H-Kicker

C-Kicker Parameter	Ziel / Optimum	Einfluss
Kickerhöhe (h)	möglichst klein, ideal sind 0 mm	niedrig
Kicker-Ball-Abstand (e)	möglichst klein	niedrig
Höhe des Kickerbalkens (b)	möglichst groß	mittel
Oberfläche des Kickerbalkens	möglichst glatt	mittel
Winkel des Kickerbalkens (α)	abhängig von der Aufgabe, hier 45°	hoch

Tabelle 4.2: Parametereinfluss auf den C-Kicker

5 Resümee

Abschließend werden vor dem eigentlichen Resümee noch weitere Punkte angeführt, die keinen Eingang in diese Arbeit gefunden haben aber dennoch sehr entscheidend für den Erfolg beim Bau und Betrieb eines SSL-Roboters und für ein SSL-Teams sind.

5.1 Die Organisation

5.1.1 Das Team und die Aufgaben

Um einen SSL-Roboter zu bauen und erfolgreich im Wettbewerb einzusetzen, ist ein interdisziplinäres Team von Studentinnen und Studenten, die weit über das übliche Maß eines universitären Projektes hinaus ihre Zeit und Energie dafür einsetzen, unverzichtbar.

Da die Finanzierung eines derartigen Projektes nicht durch die Universität allein erfolgt, sind externe Partner nötig, um die elektronischen und mechanischen Teile fertigen zu können sowie auch die Teilnahmegebühren und Reisekosten für einen Wettbewerb finanzieren zu können. Diese Tatsache zieht wiederum einige Aufgaben nach sich, um überhaupt einen Sponsor bzw. Partner für ein derartiges Projekt gewinnen zu können. Somit genügt es nicht nur technische MitarbeiterInnen im Team zu haben, sondern benötigt auch Mitglieder, die sich um Aufgaben wie Sponsoring, Marketing, Public Relations, Presse, Finanzen, Veranstaltungen und Organisation kümmern. Da diese Aufgaben meist von Mitgliedern aus einem technischen Gebiet mit erfüllt werden, gelingt es damit, dass ein Teammitglied nicht nur viel Erfahrung in seinem Fachgebiet sammeln kann, sondern auch darüber hinaus in andere Fachgebiete vordringt und somit das normale Studium mit umfassenden Erfahrungen aus unterschiedlichen Bereichen ergänzt wird. Dazu wird bei den Austrian Cubes eine modulare Organisationsstruktur (siehe Abb. 5.1) verwendet, wobei jedes Teammitglied gleichzeitig in mehreren Modulen vertreten sein kann.

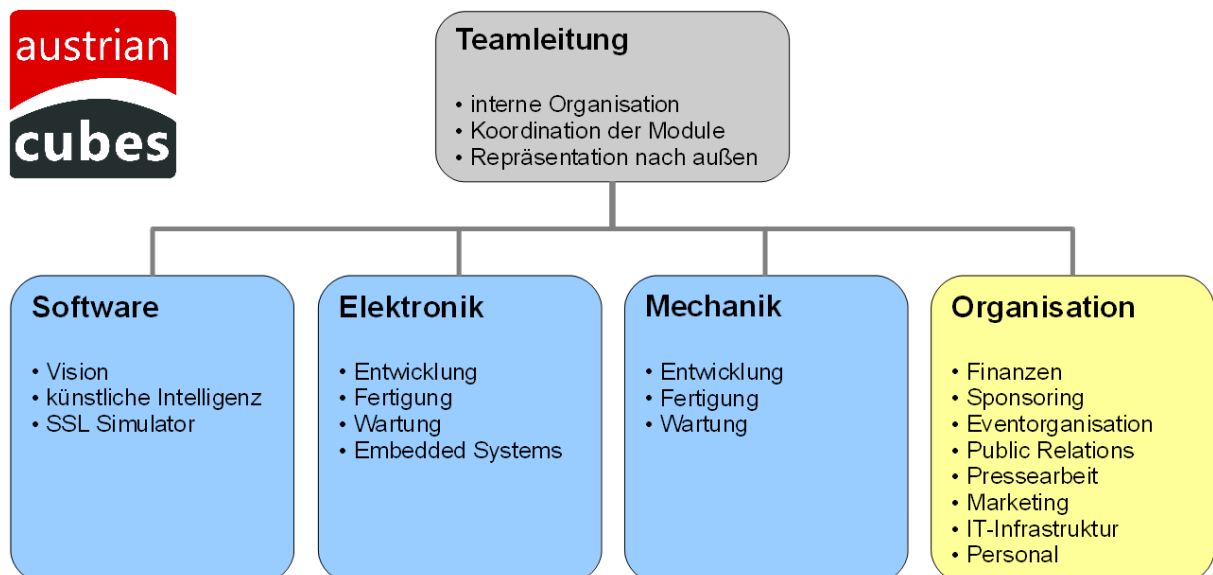


Abbildung 5.1: Teamstruktur der Austrian Cubes

Jedes Modul verfügt über eine(n) ModulleiterIn, der/die die Projekte innerhalb eines Fachbereiches koordiniert und die Aufgaben verteilt. Die ModulleiterInnen wiederum koordinieren gemeinsam mit

der Teamleitung die Fachbereiche untereinander und treffen strategische und wichtige technische Entscheidungen.

Durch diese Organisationsstruktur sind die interne Koordination und Kommunikation einfach und direkt sowie die Arbeitsweise effizient. Entscheidend dabei ist, dass ohne die Aufgaben, die vom Organisationsmodul erledigt werden, die Existenz des Teams und eine erfolgreiche Wettbewerbsteilnahme gar nicht möglich wäre. Es ist als Support-Modul für die technischen Entwickler zu betrachten. Je nach Bedarf können hingegen Aufgaben aus den technischen Modulen reduziert werden, wenn man Elemente der vergangenen Saison wiederverwendet oder lediglich optimiert. Das hemmt zwar die Weiterentwicklung, da aber die Teilnahme an einem studentischen Team wie den Austrian Cubes freiwillig und unentgeltlich ist, findet man nicht für jede Aufgabe eine(n) MitarbeiterIn.

Es sollte nicht unerwähnt bleiben, dass durch die Teilnahme bei einem studentischen Wettbewerb wie dem RoboCup und der Erfüllung unterschiedlicher – auch wirtschaftlicher – Aufgaben in einem solchen Team in kurzer Zeit sehr viele Erfahrungen gesammelt werden können. Diese werden in einem typischen Karriereverlauf in einem Unternehmen häufig erst nach Jahren und bei gleichzeitigen Um- und Aufstiegen gemacht.

5.1.2 Die Fertigung

Im Rahmen der Fertigung der Prototypen sowie der Serienroboter werden viele Erfahrungen gesammelt, die hier kurz zusammengefasst sind, und als Hilfestellung bei einem ähnlichen Fertigungsprozess dienen können.

Das Konstruktionsprinzip der Einzelteile wird dabei so gewählt, dass ein Großteil der Bauteile sehr einfach herzustellen ist. Das ist natürlich nicht überall möglich, somit bleiben einige wenige kompliziert zu fertigende Teile übrig. Anders formuliert bedeutet das, dass die wenigen komplexen Bauteile die vielen einfachen miteinander verbinden. Zusätzlich wird auch darauf geachtet, möglichst wenige verschiedene Halbzeuge zu verwenden.

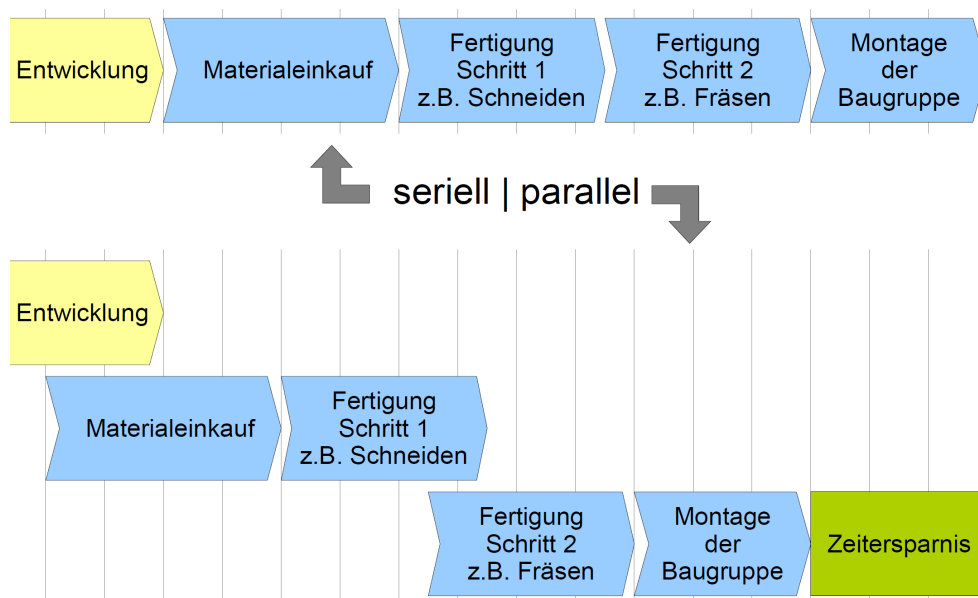


Abbildung 5.2: Parallelisierung des Fertigungsprozesses, beispielhaft

Da nicht die gesamte Fertigung durch Sponsoring finanziert wird, werden viele Teile von den Teammitgliedern der Austrian Cubes gefertigt. Dabei werden die vom Team zu fertigenden Teile so

gewählt, dass sie Studierende ohne technische Vorkenntnisse nach einer kurzen Einführung herstellen können, während die komplexeren Teile an Unternehmen ausgelagert werden.

Es hat sich gezeigt, dass aufgrund der für jeden Produktionsschritt (vom Zeitpunkt der Materialbeschaffung) erforderlichen Zeit sowie eines zusätzlichen Zeitdrucks unter Umständen dem Entwicklungsende vorgegriffen werden sollte (siehe Abb. 5.2). So wird der Fertigungsprozess parallelisiert, indem das Material bestellt wird, bevor endgültig klar ist, was genau benötigt wird. Weiters werden einige Komponenten, wie z.B. die Teile des Omniwheels, schon früher gefertigt, bevor die Konstruktion abgeschlossen ist. Ein Vorgriff dieser Art funktioniert nur dann, wenn diese Komponente ohnehin nicht mehr konstruktiv verändert werden soll oder kann.

Somit muss zwar manchmal ein bestimmtes Halbzeug später nachgekauft werden, die Masse der Teile wird aber aufgrund der sich überlappenden Prozesse früher fertig und die verbleibende Zeit kann dann für Fehlerbehebung oder die Produktion der später fixierten Teile genutzt werden. Diese Parallelisierung erfordert natürlich ein höheres Maß an Planung als eine serielle Fertigung.

5.2 Zusammenfassung

5.2.1 Die Erfüllung der Ziele

Im Folgenden wird die Erreichung der Ziele, welche zu Beginn im Lastenheft fixiert wurden, qualitativ betrachtet (Tab. 5.1).

Konstruktionsziele	Erfüllungsgrad	Erfolgsrelevanz
Fehlerbehebung gegenüber der alten Robotergeneration	+	●●●
Ballannahme ermöglichen	+*	●●
Chipkick ermöglichen	+	●●
Einfaches Handling	+	●
Beschleunigung min. 6 m/s ²	+**	●●●
Geschwindigkeit 3,5 m/s	-	●
Implementierung diverser elektronischer Komponenten	+	●●●
Zuverlässigkeit	+	●●
Leistungsfähigkeit, Leichtbau	+	●●

Tabelle 5.1: Erfüllungsgrad der Konstruktionsziele

- Legende zu den Tabellen 5.1 und 5.2: Erfüllungsgrad: erfüllt +, nicht 100 %ig erfüllt -.
Relevanz: klein: ● bis groß: ●●●
- * im Nachhinein verbessert und dann erreicht
- ** vom Teppich abhängig

Es zeigt sich, dass die Ziele im Wesentlichen erreicht wurden. Konkret wurde die geplante Höchstgeschwindigkeit nicht erreicht, was an dem gewählten Elektromotor lag und im Widerspruch zur erzielbaren Beschleunigung stand. Da eine hohe Beschleunigung für wichtig erachtet wurde, musste das Ziel mit der geringeren Relevanz fallen gelassen werden. Kompromisse dieser Art sind bei einem derartigen Projekt oftmals notwendig.

Da allerdings nicht nur eine optimale Konstruktion eines SSL-Roboters als Ziel der Arbeit definiert wurde, sondern auch einzelne Funktionen untersucht werden sollten, um deren Funktion besser zu verstehen und die wichtigen Aspekte herauszufinden, ist in einer zweiten Tabelle (5.2) die

Zielerreichung hinsichtlich der Detailuntersuchungen dargestellt. Die Erfolgsrelevanz bezieht sich hierbei nicht mehr auf den Roboter, sondern auf die Relevanz hinsichtlich der Erforschung und des besseren Verständnisses eines SSL-Roboters.

Ziele von Detailuntersuchungen	Erfüllungsgrad	Relevanz
Rad: Optimierung des Grips	+	●
Rad: Bestimmung des Einflusses von zehn Parametern	+	●●●
H-Kick: Optimierung der Schussgeschwindigkeit	+	●
H-Kick: Bestimmung des Einflusses von zwei Parametern	+	●●
C-Kick: Optimierung der Reichweite	+	●
C-Kick: Erforschung unterschiedlicher Kinematik	-	●●●
C-Kick: Bestimmung des Einflusses von fünf Parametern	+	●●●

Tabelle 5.2: Erfüllungsgrad der Forschungsziele in den Detailuntersuchungen

Es ist zu erkennen, dass im Bereich der Kinematik des C-Kickers noch Potential vorhanden ist, welches auch im Nachhinein von Teammitgliedern der Austrian Cubes behandelt und verbessert wurde [Mitterer, Rabitsch 2010]. Die anderen Ziele wurden erreicht und deren Ergebnisse können ein Hilfsmittel für die Entwicklung eines SSL-Roboters darstellen.

5.2.2 Ausblick

Abschließend lässt sich sagen, dass viel erreicht wurde. Einerseits wurde eine Roboterserie gebaut, die international konkurrenzfähig ist. Andererseits wurden viele Informationen über das Verhalten des Rades, des Fahrwerks und des Kickers gewonnen und damit einige Lücken in der Beschreibung eines SSL-Roboters geschlossen. Gleichzeitig ist zu berücksichtigen, dass die Komplexität von Systemen wie Fußballrobotern einer schrittweisen und zeitintensiven Weiterentwicklung und Verbesserung bedarf. Dabei darf aber auch nicht vergessen werden, dass mit einem größeren Budget und mehr Teammitgliedern weitaus mehr erreicht werden könnte, da oftmals trotz besseren Wissens eine schlechtere Lösung gewählt werden musste, weil entweder das Budget nicht reichte oder der Aufwand zu groß war.

Im Jahr 2050 soll ein Roboterteam ein menschliches im Fußball schlagen können, das ist das eingangs erwähnte Ziel der RoboCup Federation. Um dieses Ziel zu erreichen ist noch viel Forschungsarbeit zu tun und dafür wird es auch entsprechender Mittel bedürfen.



Abbildung 5.3: Spielsituation in der Small Size League [Austrian Cubes 2009]

Letztlich kann diese Arbeit als Hilfsmittel bei der Entwicklung der Mechanik eines SSL-Roboters dienen und soll – nimmt man die gewonnen Erkenntnisse heraus und entwickelt sie weiter – zu einem guten Fußballroboter führen. Durch die eingehende Beschäftigung mit dem Thema und motiviert durch das spielerische Element des Fußballs, wird das Wissen über autonome und mobile Roboter stetig wachsen und somit unsere Zukunft beeinflussen.

Verzeichnisse

Abbildungsverzeichnis

Bilder auf der Titelseite: Austrian Cubes

Abbildung 1.1: Robocup Logo [Robocup Federation 2010].....	3
Abbildung 1.2: Funktionsprinzip der Small Size League.....	3
Abbildung 1.3: Spielsituation in der Small Size League [Austrian Cubes 2009].....	4
Abbildung 1.4: Logo der Austrian Cubes www.austriancubes.at	4
Abbildung 1.5: Zeitplan.....	6
Abbildung 2.1: gewähltes Koordinatensystem.....	7
Abbildung 2.2: Dribbler Backspin und 80-20 Regel, [Reglement 2009, S.8 und S.23].....	9
Abbildung 2.3: Phasen der Produktentstehung [VDI 2221, S.8].....	10
Abbildung 2.4: Generelles Vorgehen beim Entwickeln und Konstruieren [VDI 2221, S.9].....	11
Abbildung 2.5: Entwicklung Prototyp.....	12
Abbildung 2.6: Serienentwicklung.....	14
Abbildung 2.7: Mecanum Rad [MIAG 2010].....	15
Abbildung 2.8: Omniwheel der Austrian Cubes.....	15
Abbildung 2.9: Beschleunigungsprofil für drei bzw. vier Omniwheels (jeweils bei verschiedenen Öffnungswinkeln), [Cornell 2003, S.49].....	16
Abbildung 2.10: Das Kickerprinzip.....	16
Abbildung 2.11: Hacker A20-50S.....	18
Abbildung 2.12: Maxon EC45flat.....	18
Abbildung 2.13: Hacker A20-50S CAD Skizze.....	18
Abbildung 2.14: Maxon EC45flat CAD Skizze.....	18
Abbildung 2.15: Leistungs- und Geschwindigkeitspotential in Abhängigkeit der Bewegungsrichtung.....	19
Abbildung 2.16: Skizze zur Berechnung der Motorleistung.....	19
Abbildung 2.17: CAD Modell des Fahrwerks des Roboter-Prototypen.....	21
Abbildung 2.18: CAD Modell des Fahrwerks des Serien-Roboters.....	21
Abbildung 2.19: Skizze Klemmsitz [Jürgens 2010, S.27].....	22
Abbildung 2.20: Funktionsprinzip Kicker des Roboter-Prototypen.....	22
Abbildung 2.21: CAD-Modell der Kickereinheit im Roboter-Prototyp.....	22
Abbildung 2.22: Funktionsprinzip der Kicker im Serienroboter.....	23
Abbildung 2.23: CAD-Modell der Kickereinheit des Serien-Roboters.....	23

Verzeichnisse

Abbildung 2.24: (1) Kicker eingefahren (2) H-Kicker ausgefahren (3) C-Kicker ausgefahren.....	24
Abbildung 2.25: Funktionsprinzip der Dribblereinheit. Grau: Roboter, Orange: Ball, Blau: Schwinge, Rot: Walze, Schwarz: Dämpfungselement.....	24
Abbildung 2.26: CAD-Modell der Dribblereinheit beim Serienroboter.....	26
Abbildung 2.27: Die Dämpfungsfunktion der Dribblereinheit: (1) Neutralstellung (2) Eingefedert.	26
Abbildung 2.28: Roboter mit Ball an der Dribblerwalze anliegend.....	27
Abbildung 2.29: CAD Modell des Prototypen mit Elektronikbeschreibung.....	28
Abbildung 2.30: CAD Modell des Serien-Roboters mit Elektronikbeschreibung.....	28
Abbildung 2.31: Explosionsmodell des Omniwheels.....	29
Abbildung 2.32: Prinzipskizze der Radaufhängung.....	30
Abbildung 2.33: Prinzipskizze des Fahrwerks mit Getriebe, Motor und Omniwheel.....	30
Abbildung 2.34: Explosionsmodell der Radeinheit.....	31
Abbildung 2.35: Zeichnungen zum Fahrwerk.....	31
Abbildung 2.36: Zeichnung der Kickereinheit, Aufriss.....	32
Abbildung 2.37: Zeichnung der Kickereinheit, Schnitt A-A.....	33
Abbildung 2.38: Zeichnung der Kickereinheit, Schnitt B-B.....	33
Abbildung 2.39: Zeichnung der Dribblereinheit.....	34
Abbildung 2.40: CAD Modell des gesamten Rahmens.....	35
Abbildung 2.41: Explosionsdarstellung des Rahmens.....	36
Abbildung 2.42: CAD Modell der Außenhaut des Roboters.....	37
Abbildung 2.43: Explosionsdarstellung des Deckels.....	37
Abbildung 2.44: Spielsituation bei der Weltmeisterschaft 2009 in Graz.....	38
Abbildung 2.45: Entscheidende Toleranzen für die Funktion des Omniwheels.....	39
Abbildung 2.46: Einige Aluminium Schnittteile des Roboters.....	39
Abbildung 2.47: Die ersten sechs Roboter nach der Montage.....	40
Abbildung 2.48: Foto des Roboters.....	42
Abbildung 3.1: Radparameter.....	43
Abbildung 3.2: Verringerung der Rauigkeit durch Druckkraft [Köhler Rögwitz 1 2007, S.237].....	44
Abbildung 3.3: Definition Koordinatensystem, Kräfte und Geometrie.....	46
Abbildung 3.4: Geometrie des Modells.....	47
Abbildung 3.5: Darstellung der Richtungsabhängigkeit der Teppichfasern.....	48
Abbildung 3.6: Schema Rückwärtskinematik.....	49
Abbildung 3.7: Programmschema des Fahrwerksimulationsprogramms.....	50
Abbildung 3.8: Auswirkung der Schrittweite auf das Beschleunigungsprofil, $a=f(\varphi)$	51

Verzeichnisse

Abbildung 3.9: Auswirkung der Parameterschrittweite bei der Schwerpunktlage, $a=f(x_s)$	51
Abbildung 3.10: Haftreibungskoeffizienten verschiedener Omniwheels, Versuchsergebnisse.....	52
Abbildung 3.11: Simulation $a_{min}(m)$ min. Beschleunigung in Abhängigkeit der Roboter­masse.....	53
Abbildung 3.12: Beschleunigungsprofil von Rad "1" bei verschiedenen Roboter­massen.....	54
Abbildung 3.13: Simulation $a_{min}(m)$ mit Schwerpunkthöhe 20 mm.....	55
Abbildung 3.14: Simulation $a_{min}(h)$ min. Beschleunigung in Abhängigkeit der Schwer­punkthöhe	56
Abbildung 3.15: Beschleunigungsprofil Rad "1" bei verschiedenen Schwer­punkthöhen.....	57
Abbildung 3.16: Beschleunigungsprofil Rad "999" bei verschiedenen Schwer­punkthöhen.....	58
Abbildung 3.17: $a_{min}(h)$ für verschiedene Roboter­massen auf Basis des Rades "1"	58
Abbildung 3.18: statische Radlasten in Abhängigkeit der Schwer­punktlage.....	59
Abbildung 3.19: minimale Beschleunigung in Abhängigkeit der Schwer­punktlage für alle Räder...	59
Abbildung 3.20: Beschleunigungsprofil des Rades "1" für verschiedene Schwer­punktlagen.....	60
Abbildung 3.21: Beschleunigungsprofile sämtlicher Räder.....	61
Abbildung 3.22: Beschleunigungsprofile für Rad "1" bei verschiedenen Öffnungswinkeln.....	62
Abbildung 3.23: Erreichbare Beschleunigung in Abhängigkeit des Öffnungswinkels für Rad "1"...	62
Abbildung 3.24: Beschleunigung in m/s^2 in Abhängigkeit des Reibungskoeffizienten.....	63
Abbildung 3.25: Beschleunigungsprofile für verschiedene Reibungskoeffizienten.....	64
Abbildung 3.26: $a(h)$ für verschiedene Reibungskoeffizienten.....	64
Abbildung 3.27: Beschleunigungsprofile für verschiedene Schwer­punkthöhen bei $\mu=2$	65
Abbildung 3.28: Vergleich des Beschleunigungspotentials der Omniwheels.....	66
Abbildung 3.29: Foto des Omniwheelprüfstandes, Ansicht 1.....	68
Abbildung 3.30: Foto des Omniwheelprüfstandes, Ansicht 2.....	69
Abbildung 3.31: Richtungen der Kraftmessungen bei den Rad-Versuchen.....	70
Abbildung 3.32: Messung von Rad "1": Haftreibungskraft über Normalkraft.....	71
Abbildung 3.33: Messung von Rad "1": Richtungsabhängigkeit der Messwerte bei Haftreibung...	72
Abbildung 3.34: Messung von Rad "1": Richtungsabhängigkeit der Messwerte bei Gleitreibung...	72
Abbildung 3.35: Messung von Rad "1": Reibungskoeffizient in Abhängigkeit der Normalkraft.....	73
Abbildung 3.36: Reibungskoeffizientenverhältnis in Abhängigkeit der Normalkraft Rad "1".....	74
Abbildung 3.37: Reibungskoeffizient über Normalkraft aller Räder.....	75
Abbildung 3.38: Verhältnis von Gleit- zu Haftreibung sämtlicher Räder.....	76
Abbildung 3.39: Prozentuelle Schwankungsbreite der Minima und Maxima aller Räder.....	77
Abbildung 3.40: Messung der Kraftpeaks in Abhängigkeit der Normalkraft.....	78
Abbildung 4.1: Versuchsparameter H-Kicker.....	80
Abbildung 4.2: Flugparabeln für C-Kicker 45x8 h=0 als Beispiel für die Überschießbarkeit.....	81

Verzeichnisse

Abbildung 4.3: Versuchsparameter C-Kicker.....	81
Abbildung 4.4: Winkel-Verhältnisse beim Abschuss eines Golfballes [Tutelman 2010].....	82
Abbildung 4.5: CAD-Ansicht des Kickerprüfstandes.....	83
Abbildung 4.6: Foto des Aufbaus der ersten Kickerversuche.....	84
Abbildung 4.7: Foto der Prinzipversuche.....	84
Abbildung 4.8: Prüflinge und Erklärung zur Typbezeichnung.....	85
Abbildung 4.9: Aufbau für die Versuche mit der Highspeedkamera.....	85
Abbildung 4.10: Ausschnitt aus einem Messvideo.....	86
Abbildung 4.11: Versuche zum H-Kicker: Geschwindigkeit in Abhängigkeit der Kickerhöhe.....	86
Abbildung 4.12: Versuche zum H-Kicker, Geschwindigkeit in Abhängigkeit der Kicker-Ball-Entfernung.....	87
Abbildung 4.13: Stoßverlaufaufnahme, vgl. Dubbel 2005, S.B37.....	87
Abbildung 4.14: Maximalkraft in Abhängigkeit der Kicker-Ball-Entfernung für Kickertyp "0x8" und bei $d = 0$ mm.....	88
Abbildung 4.15: Foto des Versuchsaufbaus.....	89
Abbildung 4.16: Alle Flugparabeln für Kickertyp "45x8".....	90
Abbildung 4.17: Alle Flugparabeln für Kickertyp "60x8".....	90
Abbildung 4.18: Alle Flugparabeln für Kickertyp "70x8".....	90
Abbildung 4.19: Alle Flugparabeln für Kickertyp "60x8" mit Schleifpapier als Oberfläche.....	90
Abbildung 4.20: Alle Flugparabeln für Kickertyp "45x6".....	90
Abbildung 4.21: Geschwindigkeit und Reichweite in Abhängigkeit der Höhe für den Kicker "45x8".....	91
Abbildung 4.22: Geschwindigkeit und Reichweite in Abhängigkeit der Höhe für den Kicker "45x6".....	91
Abbildung 4.23: Abschusswinkel in Abhängigkeit der Höhe für alle Kickertypen.....	92
Abbildung 4.24: Geschwindigkeit und Reichweite in Abhängigkeit des Kicker-Ball-Abstandes für den Kicker "45x8".....	93
Abbildung 4.25: Abschusswinkel in Abhängigkeit des Kicker-Ball-Abstandes für alle Kickertypen.....	93
Abbildung 4.26: Definition des Kickerwinkels α	94
Abbildung 4.27: Ballenergie in Abhängigkeit des Kickerwinkels.....	94
Abbildung 5.1: Teamstruktur der Austrian Cubes.....	97
Abbildung 5.2: Parallelisierung des Fertigungsprozesses, beispielhaft.....	98
Abbildung 5.3: Spielsituation in der Small Size League [Austrian Cubes 2009].....	100

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.1: Vergleich der Antriebsmotorvarianten.....	18
Tabelle 2.2: Leistungsdatenvergleich Antriebsmotoren.....	20
Tabelle 2.3: Anforderungen an die Dribblerwalze.....	25
Tabelle 2.4: Bewertung der getesteten Materialien für die Dribblerwalze.....	25
Tabelle 2.5: Anforderungen an das Dämpfermaterial.....	25
Tabelle 2.6: Bewertung der Getriebealternativen für den Dribblerantrieb.....	27
Tabelle 2.7: Problemabhängige Werkstoffwahl nach Schumacher 2005 S.11.....	29
Tabelle 2.8: Technische Daten des Roboters.....	38
Tabelle 2.9: Probleme des Serien-Roboters.....	41
Tabelle 3.1: Liste der untersuchten Omniwheels.....	52
Tabelle 3.2: Die wichtigsten Randbedingungen der Roboter-masse-Simulation.....	53
Tabelle 3.3: Die wichtigsten Randbedingungen der Schwerpunkthöhen-Simulation.....	55
Tabelle 3.4: Bewertung der Einflüsse auf verschiedene Beschleunigungsrichtungen.....	57
Tabelle 3.5: Die wichtigsten Randbedingungen für den Vergleich sämtlicher Räder.....	61
Tabelle 3.6: Die wichtigsten Randbedingungen für die Gripsimulation.....	63
Tabelle 3.7: Die wichtigsten Randbedingungen der Simulation Schwerpunkthöhe bei höherem Grip	65
Tabelle 3.8: Liste aller Prüflinge und deren Beschaffenheit.....	68
Tabelle 3.9: Entscheidende Kriterien eines Omniwheels.....	79
Tabelle 4.1: Parametereinfluss auf den H-Kicker.....	96
Tabelle 4.2: Parametereinfluss auf den C-Kicker.....	96
Tabelle 5.1: Erfüllungsgrad der Konstruktionsziele.....	99
Tabelle 5.2: Erfüllungsgrad der Forschungsziele in den Detailuntersuchungen.....	100

Quellenverzeichnis

Austrian Cubes 2009: Austrian Cubes, <http://www.austriancubes.at/>, 20.12.2009

Busch 2008: Rudolf Busch 2008: Elektrotechnik und Elektronik, 5. Auflage, Vieweg+Teubner Verlag, Wiesbaden

Campell 2001: Murry Campbell et al., Deep Blue, 2001, <http://sjeng.org/ftp/deepblue.pdf>, 18.01.2010

Cornell 2003: Graham Anderson et al. 2003, 2003 Cornell RoboCup Documentation (Mechanical Group Final Documentation),

Verzeichnisse

- Dubbel 2005: K.-H. Grote, J. Feldhusen 2005: Dubbel Taschenbuch für den Maschinenbau, 21. Auflage, Springer Verlag, Berlin Heidelberg
- Girstmair 2010: Joachim Girstmair 2010: Projekt konstruktiv Optimierung des Rades eines RoboCup Small Size Fußballroboters
- Jonsson 1987: Jonsson 1987, New AGV with revolutionary movement, in R. Hollier, Automated Guided Vehicle Systems, Bedford
- Jürgens 2010: Gunter Jürgens 2010: Skriptum Maschinenelemente 1
- Klein 2008: Dieter Alex et.al. 2008: Einführung in die DIN-Normen, 14. Auflage, Teubner Verlag, Wiesbaden
- Köhler Rognitz 1 2007: Bernd Künne 2007: Kohler/Rognitz Maschinenteile 1, 10. Auflage, Teubner Verlag, Wiesbaden
- Köhler Rognitz 2 2004: Bernd Künne 2004: Köhler/Rognitz Maschinenteile 2, 9. Auflage, Teubner Verlag, Wiesbaden
- Leister 2009: Günter Leister 2009: Fahrzeugreifen und Fahrwerkentwicklung, Vieweg+Teubner Verlag, Wiesbaden
- MIAG 2010: MIAG Fahrzeugbau GmbH, <http://www.miag.de/>, 18.01.2010
- Mitterer, Rabitsch 2010: Martin Mitterer, Christian Rabitsch 2010: Projekt konstruktiv Chipkick
- Popov 2009: Valentin L. Popov 2009: Kontaktmechanik und Reibung, Springer Verlag, Berlin Heidelberg
- Reglement 2009: Laws of the F180 League 2009, <http://small-size.informatik.uni-bremen.de/>, 24.11.2008
- Robocup Federation 2010: Robocup Federation, <http://www.robocup.org/>, 18.01.2010
- Rojas 2005: Raul Rojas 2005, Omnidirectional Control, Freie Universität Berlin
- Schröder 2009: Dierk Schröder 2009: Elektrische Antriebe - Grundlagen, 4. Auflage, Springer Verlag, Dordrecht Heidelberg London New York
- Schumacher 2005: Axel Schumacher 2005: Optimierung mechanischer Strukturen, Springer Verlag, Berlin Heidelberg
- Schürmann 2007: Helmut Schürmann 2007: Konstruieren mit Faser-Kunststoff-Verbunden, 2. Auflage, Springer Verlag, Berlin Heidelberg
- Tutelman 2010: Tutelman, <http://www.tutelman.com/>, 24.03.2010
- VDI 2221: VDI 2221 Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte, Düsseldorf, 1993
- Weißgerber 2007a: Wilfried Weißgerber 2007: Elektrotechnik für Ingenieure 1, 7. Auflage, Vieweg Verlag, Wiesbaden

Anhang

Datenblatt Elektromotor Hacker A20-50S.....	A1
Datenblatt Elektromotor Maxon EC45flat.....	A9
Berechnungen Hacker A20-50S.....	A10
Berechnungen mit Maxon EC45flat.....	A14
Datenblatt Aluminium EN AW 6082.....	A19
Datenblatt Aluminium EN AW 2007.....	A20
Datenblatt Aluminium EN AW 7075.....	A21
Datenblatt Stahl 115CrV3.....	A22
Quellcode Fahrwerksimulation Datei "fahrwerk_v3.m".....	A24
Quellcode Fahrwerksimulation Datei "schleife.m".....	A34
Quellcode Fahrwerksimulation Datei "schleifeninhalt.m".....	A35
Versuchsergebnisse Reibung Omniwheel.....	A37
Versuchsergebnisse Kicker.....	A43
Der Kohlerfaser (CFK) Herstellungsprozess.....	A48