

Entwicklung einer mobilen Roboterplattform auf modularer Basis

Diplomarbeit

von

Norbert Rath

Technische Universität Graz

Fakultät für Maschinenbau und Wirtschaftswissenschaften

Institut für Maschinenelemente und Entwicklungsmethodik

O.Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Gunter Jürgens

Ass.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Michael Bader

Dipl.-Ing. Helmut Puschnig

Graz, im Juni 2011

EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/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

.....

(Unterschrift)

Danksagung

Mit dem Einreichen dieser Arbeit geht nicht nur ein Projekt, sondern für mich auch ein Lebensabschnitt zu Ende. Daß ich im Nachhinein beides als gelungen bezeichnen kann, ist vielen Menschen zu verdanken. Sie sollen hier Erwähnung finden.

Allen voran seinen an dieser Stelle meine Eltern genannt, die mir nicht nur dieses Studium ermöglicht, sondern mich auf diesem Weg auch stets begleitet haben. Euch ein herzliches Danke!

Darüber hinaus danke ich O.Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Gunter Jürgens für die Begutachtung der Arbeit, aber auch für viele neuen Blickwinkel.

Besonders bedanken möchte ich mich auch bei Ass.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Michael Bader und Dipl.-Ing. Helmut Puschnig, die während des Verfassens dieser Arbeit stets ein offenes Ohr für mich hatten, und mit vielen kreativen Idee und neuen Sichtweisen maßgeblichen Beitrag zum Erfolg dieser Arbeit geleistet haben.

Fußball ist ja bekanntlich ein Teamsport, und beim Roboterfußball ist das nicht anders. So möchte ich mich an dieser Stelle auch bei meinen Kollegen vom Mostly Harmless Robocup-Team, dafür bedanken, dass ich am „Abenteuer RoboCup“ teilhaben durfte.

Ein Aspekt dieser Arbeit der mich besonderst stolz macht ist, dass es gelungen ist, einen Prototypen zu fertigen. Ohne die vielen begeisterten Sponsoren, die uns dabei unterstützt haben wäre das wohl nicht machbar gewesen. Besonders erwähnen möchte ich dabei die Lehrer und Schüler der HTBLA Kaindorf, die mit viel Einsatz die gesamte Fertigung des Roboters begleitet haben. Ihnen allen gilt mein herzlicher Dank!

Last but not least sei all jenen gedankt, die diese Arbeit Korrektur gelesen haben!

Kurzfassung

Die vorliegende Arbeit beschreibt den Entwicklungsprozess eines mobilen Roboters auf der Basis eines vollständig modularen Aufbaus. Sie soll dabei auch und vor allem als Konzeptstudie dienen und zeigen, wie die Problemstellung eines modularen Entwurfs im Bereich der mobilen Robotik strukturiert gelöst werden kann, aber auch welche Potentiale und Schwierigkeit mit dieser Idee verbunden sind.

Aus diesem Grund wird in einem ersten Schritt der Konstruktionsprozess an sich beleuchtet. Dabei stehen vor allem das strukturierte Vorgehen und die angewandten Methoden im Vordergrund. Im Anschluss wird das Fahrwerk herausgegriffen und einer genauen Analyse unterzogen. Ein besonderer Fokus liegt hier auf der Auslegung der Fahrdynamik unter Berücksichtigung der modularen Bauweise. Es wird gezeigt, wie die Gestaltung des Fahrwerks, Lage und Ausrichtung der auftretenden Vorzugsrichtungen der Bewegung beeinflussen und wie diese den jeweiligen Anforderungen entsprechend bewusst beeinflusst werden können. Darüber hinaus beinhaltet die Arbeit eine Analyse der verwendeten „Mecanum Wheels“ und zeigt, wie diese das Schwingverhalten des gesamten Fahrwerks beeinflussen.

Abstract

This thesis describes the process of development of a mobile robot based on a highly modular base. It is meant to serve as proof of concept and show how to perform the task of modular design in mobile robotics, using systematic methods. Furthermore the benefits and cost of such an approach shall be displayed.

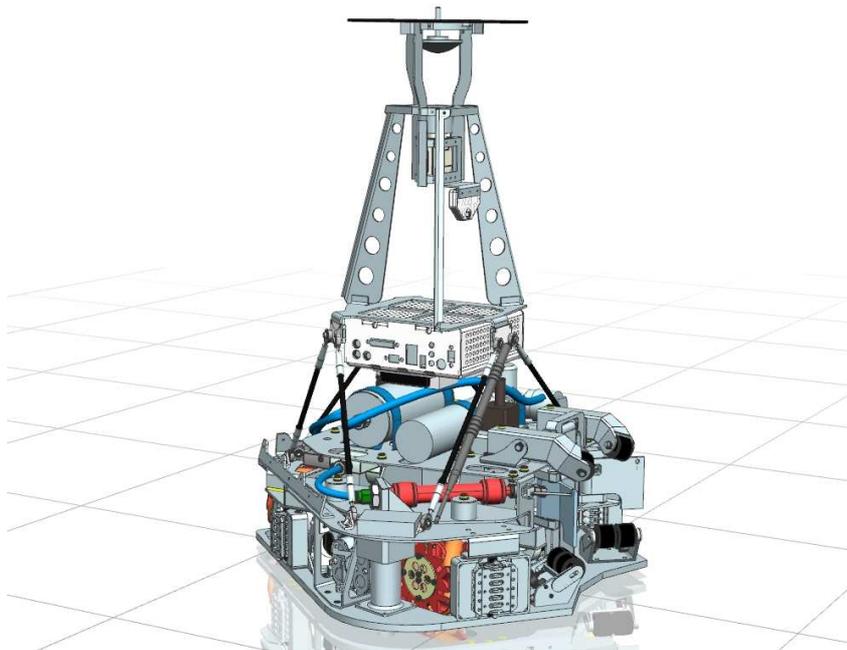
Therefore in a first step the design process itself will be examined, having a special focus on methods used. Following the omnidirectional drive will be analyzed closely. The optimization of the robots road performance considering the modular design is to be seen as one of the main goals. It will be shown, that the kinematics of the undercarriage contains several main directions of motion which can be altered in a way, so that they support the platforms task. Furthermore the thesis provides an analysis of the used “mecanum wheels” and shows how they influence the vibrations on the whole device

INHALTSVERZEICHNIS

INHALTSVERZEICHNIS.....	1
1. EINLEITUNG	4
1.1. DER ROBOCUP	4
1.2. MIDDLESIZE LEAGUE	5
1.3. MOSTLY HARMLESS: DAS TEAM.....	5
1.4. DIE VORGÄNGER.....	6
1.4.1. Keksi	6
1.4.2. Krikkit I und Krikkit II	7
1.4.3. Tricia.....	8
1.5. DIE AUFGABENSTELLUNG	9
2. KRIKKIT III KONZEPTFINDUNG UND KONSTRUKTION.....	10
2.1. DER PROJEKTABLAUF.....	10
2.2. DAS VORGÄNGERMODELL - LESSONS LEARNED	12
2.2.1. Das System.....	13
2.2.2. Analyse der Konstruktion.....	14
2.2.3. Bewertung der möglichen Verbesserungen.....	16
2.3. AUFGABENSTELLUNG.....	17
2.3.1. Positionierung des Roboters	18
2.3.2. Lastenheft.....	19
2.4. BENCHMARKING	22
2.4.1. Omniwheel	22
2.4.2. Fahrwerke.....	23
2.4.3. Kicker.....	23
2.4.4. Ballführung	24
2.4.5. Containment.....	24
2.4.6. Geschwindigkeit.....	25
2.4.7. Modularität	25
2.4.8. Werkstoffe	26
2.5. MODULARITÄT	27
2.5.1. Grundgedanke und Nutzen.....	27
2.5.2. Abgrenzung der Funktionalitäten	30
2.5.3. Modulare Architektur.....	32
2.6. DIE KONSTRUKTION.....	34
2.6.1. Frame.....	34
2.6.2. Vision	43
2.6.3. Powertrain	44
2.6.4. Servicemodul: Ballhandling.....	51

2.6.5.	<i>Prallschutz</i>	52
2.6.6.	<i>Odometrie-Sensoreinheit</i>	73
2.6.7.	<i>Akkuträger</i>	74
2.6.8.	<i>E-Box</i>	80
2.6.9.	<i>PC-Träger</i>	81
3.	DAS FAHRWERK	84
3.1.	MODELLIERUNG DES FAHRWERKS	84
3.1.1.	<i>Fahrwerksmodell allgemein</i>	84
3.1.2.	<i>Radvarianten</i>	86
3.1.3.	<i>Grad der Bestimmung</i>	89
3.1.4.	<i>Dynamisches Modell omnidirektionaler Fahrwerke</i>	91
3.1.5.	<i>Vergleichsgrösse Beschleunigungsprofil</i>	92
3.2.	AUFGABENSPEZIFISCHE AUSLEGUNG DES FAHRWERKS	93
3.2.1.	<i>Aufgabenspezifische Auslegung und Rekonfigurierbarkeit</i>	94
3.2.2.	<i>Parameter und deren Einflüsse</i>	95
3.2.3.	<i>Verschiedene Variationen</i>	101
3.3.	MECANUM WHEELS	104
3.3.1.	<i>Grundgedanke des Omniwheels</i>	104
3.3.2.	<i>Das ideale Mecanum- Wheel</i>	104
3.3.3.	<i>Das reale Mecanum-Wheel</i>	106
3.4.	FAHRWERKSSCHWINGUNGEN UND SCHWINGUNGSDÄMPFUNG.....	116
3.4.1.	<i>Messung am Krikkit II- Fahrwerk</i>	116
3.4.2.	<i>Ursachenforschung</i>	117
3.4.3.	<i>Gegenmassnahmen</i>	118
3.4.4.	<i>Erprobung des elastomergedämpften Moduls</i>	124
4.	RESÜMEE	131
4.1.	EVALUIERUNG DES VORGEHENS	131
4.1.1.	<i>Ziele</i>	131
4.1.2.	<i>Zeitplanung</i>	131
4.1.3.	<i>Methoden</i>	132
4.2.	EVALUIERUNG DES KRIKKIT III.....	132
4.2.1.	<i>Erreichen der Zielsetzung</i>	132
4.2.2.	<i>Fahrwerksauslegung</i>	133
4.2.3.	<i>Mecanum Wheels</i>	133
4.2.4.	<i>Prallschutz</i>	133
4.3.	AUSBLICK.....	134
4.3.1.	<i>Tests</i>	134
4.3.2.	<i>Schwingungstilgung und Schwingungsdämpfung</i>	134
4.3.3.	<i>Beschleunigungstest</i>	134
4.3.4.	<i>Fertigstellung</i>	134

VERZEICHNISSE.....	135
LITERATURVERZEICHNIS	135
ABBILDUNGSVERZEICHNIS	138
TABELLENVERZEICHNIS	141
ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS	141
INHALTSVERZEICHNIS	1



1. EINLEITUNG

Bevor in den folgenden Kapiteln auf die Entwicklung der neuen Roboterplattform und die dabei entwickelten Lösungen näher eingegangen wird, soll an dieser Stelle das Umfeld, in dem das Projekt angesiedelt ist, ein wenig näher beleuchtet werden.

1.1. DER ROBOCUP¹

Durch die Entwicklung der ersten Computer in den frühen 60er- Jahren des vergangenen Jahrhunderts standen plötzlich ganz neue Möglichkeiten in der technischen Entwicklung offen. Schon bald wurde die Idee geboren Computer zu entwickeln, die in der Lage waren, Situationen selbstständig zu erfassen und darauf aufbauend Strategien zu entwickeln, um ein bestimmtes Ziel zu erreichen. Der erste große Durchbruch gelang im Mai 1997 als sich der damals amtierende Schachweltmeister dem von IBM entwickelte „Deep Blue“ geschlagen geben musste.

Bald erkannte man aber, dass diese Entwicklung nur von einer kleinen Gruppe von Experten verfolgt wurde. Um die Fortschritte in diesem Bereich der breiten Öffentlichkeit näher zu bringen, war Schach einfach nicht das richtige Spiel. Daher reift bald die Idee, Fußball als neue Arena für die Entwicklung künstlicher Intelligenzen (KI) zu erobern. Der Sport war deutlich publikumswirksamer als Schach, und forderte zusätzlich eine mechanische Komponente. Die KI war aus dem Computer herausgetreten und hatte den Schritt in die reale Welt geschafft. Die erste offizielle Weltmeisterschaft der „Robot World Cup Initiative“ kurz RoboCup fand 1997 in Nagoya statt.

Seither ist der RoboCup stark angewachsen. Neben diversen Spielklassen im Roboterfußball haben sich drei gänzlich neue Sparten etabliert: Der Robot- Rescue- Bereich befasst sich mit der Aufklärung fiktiver Katastrophenschauplatze. Ein spezieller Fokus liegt hier auf der Suche nach Überlebenden. Die Roboter der RoboCup @Home Liga sind als künstliche Haushaltshilfen gedacht. Sie können verlorene Gegenstände finden, Gäste begrüßen und Getränke servieren. Die drei Ligen des RoboCup-Junior richten sich an Schülerinnen und Schüler. Sie dienen dem Anspruch der RoboCup Initiative, nicht nur Forschungs- sondern auch Bildungsplattform zu sein.

Teil der alljährlichen Weltmeisterschaften ist stets auch eine Tagung, auf der hochkarätige WissenschaftlerInnen aus dem Bereich der Robotik neue Erkenntnisse austauschen. Grundlegendes Ziel der Initiative ist es, bis zum Jahr 2050 ein Team humanoider Roboter zu entwickeln, das in der Lage ist den amtierenden menschlichen Weltmeister im Fußball zu schlagen.

¹ Vgl. [RCF 2011]

Neben den bereits angesprochenen Weltmeisterschaften gibt es auch eine Reihe regionaler Veranstaltungen. Die Offenen Deutschen Meisterschaften, kurz German Open, haben sich für das Team aus Graz aufgrund der geographischen Nähe zum jährlicher Fixpunkt entwickelt.

1.2. MIDDLESIZE LEAGUE²

Die MidSize League ist als eine der ältesten Ligen des RoboCups im Bereich Roboter Fußball angesiedelt. Es treten zwei Mannschaften zu je fünf Robotern gegeneinander an. Das Spielfeld hat dabei etwa die Größe eines Tennisplatzes. Abgesehen davon gilt das offizielle Regelwerk der FIFA.

Alle Spieler sind vollkommen autonom, schätzen die aktuelle Lage am Feld also selbstständig ein und entwickeln Strategien, um ihre Ziele zu erreichen. Neben den softwareseitigen Schwerpunkten wie etwa Ballerkennung, Selbstlokalisierung und Pfadplanung, stellt die Liga auch hohe Ansprüche an die verwendete Hardware. Verfahrensgeschwindigkeiten von bis zu 5m/s und dem entsprechend harte Kollisionen stellen ein raues Klima für die verbauten mechanischen und elektronischen Komponenten dar.

1.3. MOSTLY HARMLESS: DAS TEAM

Das MSL-Team der Technischen Universität Graz mit dem irreführenden Namen „Mostly Harmless“ kann im vorliegenden Projekt zum Teil als Auftraggeber angesehen werden. Es wurde im Jahr 2002 in Zusammenarbeit mit dem Institut für Softwaretechnologie (IST) gegründet welches bis heute die Schirmherrschaft über das Team hat.

Die Entwicklung und Wartung der Roboter und der zugehörigen Software wird von derzeit ca. 30 StudentInnen aus den verschiedensten Fachrichtungen vorangetrieben. Zu den größten Erfolgen gehören bis dato der vierte Platz bei den German Open 2011 und das Erreichen der Zwischenrunde bei der Weltmeisterschaft 2009.

Organisatorisch ist das Team in die fünf Bereiche Software, Bildverarbeitung, Elektronik, Mechanik und Marketing gegliedert. Diese Arbeit ist im Fachbereich Mechanik angesiedelt, zeigt aber eine starke Überschneidung mit den Arbeitsgebieten Elektronik und Marketing.

² Vgl. [RCF 2011] und [RCI 2011]

1.4. DIE VORGÄNGER

Die Roboter der Krikkit III Klasse, deren Entwicklung den Inhalt dieser Arbeit bildet, sind die vierte Generation fußballspielender Roboter aus dem Hause Mostly Harmless. Die Vorgängermodelle sollen im Folgenden kurz beleuchtet werden.

1.4.1. KEKSI³

Die Keksi- Klasse bedeutet den Startschuß zum Engagement der TU-Graz im RoboCup . Die äußerst robust gestaltete Mechanik wurde in Kooperation mit der Firma Knapp entwickelt und optimiert. Das wohl auffälligste Designmerkmal dieser Generation ist ihr modulare Aufbau. Die Plattform besteht aus fünf Schichten, die weitestgehend unabhängig von einander agieren.

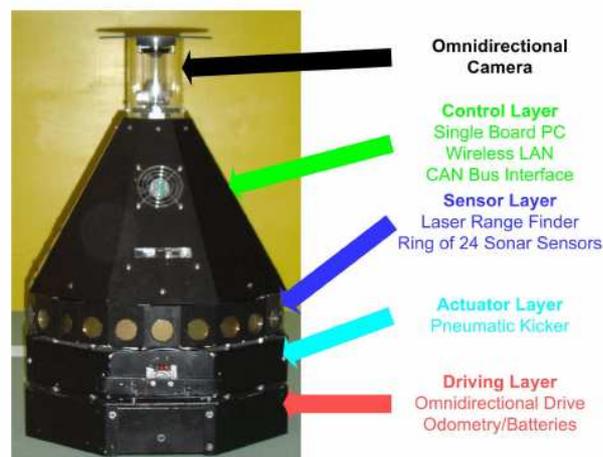


Abbildung 1. 1: Das Modell "Keksi"⁴

Diese Gestaltungsweise erlaubt nicht nur eine vereinfachte Wartung, sondern auch einen flexiblen Einsatz des Roboters. So war schon damals geplant die Aktor- Schicht, die den pneumatischen Kicker beinhaltet, gegen einen Greifer auszutauschen, um damit logistische Aufgaben am Institut wahrnehmen zu können. Was die Erfassung seiner Umwelt angeht, so war der Keksi mit einer ganzen Batterie unterschiedlicher Sensoren ausgestattet. In seinem Portfolio finden sich neben der obligaten omnidirektionalen Kamera mehr als 20 Ultraschallsensoren und ein Laser –Rangefinder.

³ Vgl. [MH 2003] und [MH 2004]

⁴ Quelle [MH 2004]

1.4.2. KRIKKIT I UND KRIKKIT II

Die Roboter der Krikkit I - Klasse stellen eine Weiterentwicklung der Keksi- Klasse dar. Der modulare Aufbau wurde dabei zugunsten eines deutlich integraleren Designs verworfen. Darüber hinaus wurden zahlreiche Blechteile in der Hülle durch eine moderne Abdeckung aus Glasfaserverbundwerkstoffen ersetzt. Eine neue, deutlich leistungsstärkere Omnivision machte weitere externe Sensoren überflüssig.



Abbildung 1. 2: Der Krikkit I⁵



Abbildung 1. 3: Das Modell Krikkit II

Was die Ballkontrolle angeht, wurde diese Plattform erstmals mit einer ausgeklügelten passiven Ballführung ausgestattet, die direkt in die Außenkontur des Fahrwerks eingelassen war. Dazu verfügte diese Generation erstmals über ein Kicksystem, das nicht nur flache, sondern auch hohe Schüsse erlaubt. Was das Fahrwerk selbst angeht, wurden im Krikkit I neue Mecanum Wheels anstelle der im Keksi verwendeten konventionellen 90°- Omniwheels verbaut.

Erst im Betrieb zeigte sich eine ganze Reihe von Schwachstellen, etwa beim Aufprallschutz oder im Aufbau des Pneumatischen Kickers. Im Zuge der Vorbereitung auf die Weltmeisterschaft 2009 wurde der Krikkit I einer umfangreichen Modernisierung unterzogen (vgl. [BHJ 2005]). Diese war so umfassend, dass es gerechtfertigt erschien die Roboter als neue Klasse mit der Bezeichnung Krikkit II anzusehen.

⁵ Quelle [JAN 2008] S.16, Abbildung 2.11

1.4.3. TRICIA⁶

Der Prototyp der Tricia- Klasse war ein Prinzipversuch zu einem neuen Fahrwerkskonzept. Bei diesem Ansatz wird der Roboter nicht mehr mit Omniwheels, sondern mit konventionellen Rädern ausgestattet, die um die Hochachse gedreht werden können. Auf diese Weise bleibt die Plattform weiterhin omnidirektional. Um eine definierte Bewegung zu garantieren, muss sichergestellt werden, dass sich die Drehachsen der drei Räder immer in einem Punkt, dem Momentanpol schneiden.

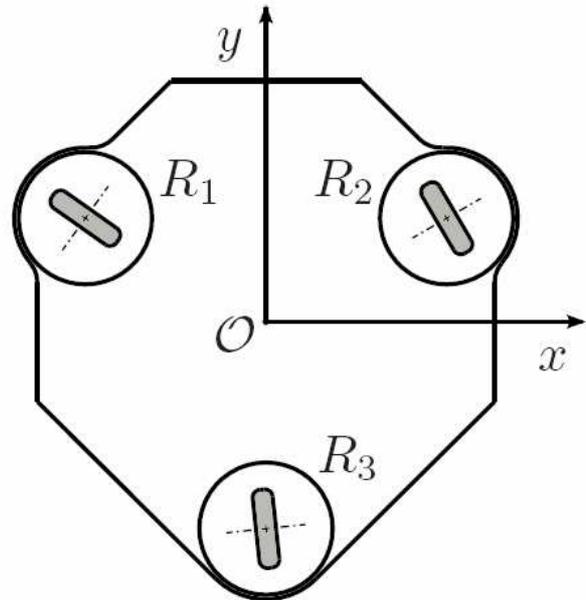


Abbildung 1. 4: Der Versuchsroboter "Tricia"⁷

Der Ansatz bietet in punkto Laufruhe und Fahrdynamik viele Vorteile. Das Problem, das auch bei der Entwicklung der Tricia- Klasse nie gelöst werden konnte, liegt in der Regelung der Ausrichtung der Räder. Beschreibt der Momentanpol eine Trajektorie, die eines der Räder in geringem Abstand passiert, muss dieses in sehr kurzer Zeit geschwenkt werden. Da die Drehzahl der Stellmotoren aber beschränkt ist, ist eine derartige Bahnkurve nicht möglich. Dies wiederum schränkt die Mobilität des Fahrwerks ein. Da dieses Problem zum damaligen Zeitpunkt als nicht lösbar galt, wurde das Projekt eingestellt.

⁶ Vgl. [BHJ 2005]

⁷ Quelle [JAN 2008] S.15, Abbildung 2.10

1.5. DIE AUFGABENSTELLUNG

Das Ziel des hier beschriebenen Projekts ist die Entwicklung der nächsten Generation der Krikkit-Klasse. Der Krikkit III soll dabei so gestaltet werden, dass er zwei unterschiedlichen Aufgaben dient.

Auf der einen Seite soll er die Lücke schließen, die in punkto Hardware, zwischen dem RoboCup- Team der Technischen Universität Graz und deren Konkurrenten entstanden ist. Die omnidirektionale Plattform soll also, was Agilität und Robustheit angeht, den Anforderungen der modernen RoboCup MSL gerecht werden. Dazu gehört selbstverständlich auch eine entsprechende Regelkonformität. Wie bereits erwähnt, ist- was diesen Teil die Arbeit angeht- Mostly Harmless als Auftraggeber anzusehen.

Darüber hinaus soll der Roboter aber auch ausreichend flexibel gestaltet werden, um dem IST als Plattform für diverse Forschungsprojekte im Bereich Robotik und Künstliche Intelligenz zu dienen. Ein rein auf den Bereich Roboterfußball spezialisiertes Gerät ist daher nicht erwünscht. Es gilt also einen weiten Bogen zu spannen.

Darüber hinaus soll die bereits in der Keksi- Klasse verfolgte Strategie der hochmodularen Gestaltung wieder aufgegriffen werden. Die zugrunde liegende modulare Architektur ist im Laufe einer Vorstudie zu ermitteln.

2. KRIKKIT III KONZEPTFINDUNG UND KONSTRUKTION

Die Kernaufgabe des in dieser Arbeit beschriebenen Projekts bestand, wie eingangs erwähnt, in Entwurf und Konstruktion eines mobilen Roboters. In Anlehnung an den System Engineering-Prozess (SE) umfasste dies die Analyse von Vorgängermodellen und Konkurrenz, daraus abgeleitet die Definition von Zielen für die Entwicklung der neuen Generation, die interaktive Erarbeitung von Lösungsansätzen und deren Ausarbeitung, und abschließend Fertigung und Inbetriebnahme des Prototyps.

Diese Schritte werden im folgenden Kapitel genauer beleuchtet, wobei der Fokus auf den Entwicklungsprozess als solchen und die dafür verwendeten Methoden gelegt wird.

2.1. DER PROJEKTBLAUF⁸

Als methodischer Rahmen für den Entwicklungsprozess wird, wie bereits vorweggenommen, das SE-Vorgehensmodell, wie in Abb. 2.1 dargestellt, gewählt.

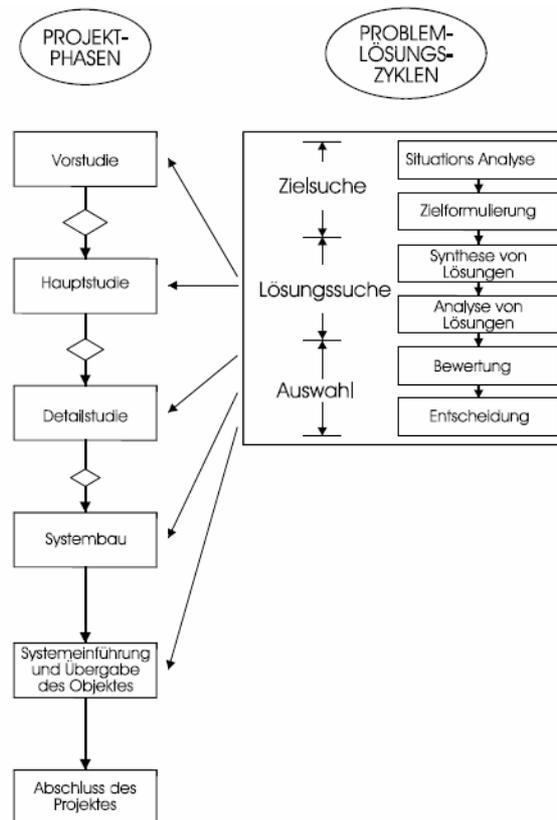


Abbildung 2. 1: Das System- Engineering- Vorgehensmodell⁹

⁸ Vgl. [HNB 2002]

⁹ Quelle [HNB 2002] S 3-15, Abbildung 3.1

II. Krikkit III Konzeptfindung und Konstruktion

Die Vorstudie umfasste hier neben einer ausführlichen Analyse der Stärken und Schwächen des Vorgängermodells Krikkit II auch eine Studie des Standes und der diversen Marschrichtungen der Konkurrenz.

In der Hauptstudie wird vor allem die Entwicklung des Roboters als Gesamtsystem vorangetrieben. Der Entwurf der Modulstruktur sei dabei als einer der vorrangigen Schwerpunkte erwähnt. Im Anschluss an die Abgrenzung der einzelnen Module folgte, im Rahmen der Detailstudie, ihre vollständige Entwicklung. Da es sich bei diesen Baugruppen wieder größtenteils um komplexe Teilprobleme handelt, werden auch sie wieder nach dem gleichen SE-Schema erarbeitet. In den Systembau fällt neben Arbeitsvorbereitung und Herstellung selbst gefertigter Komponenten, vor allem die Organisation diverser externer Partner, die abgegrenzte Fertigungsaufgaben übernehmen. Die Systemeinführung, also in diesem Fall die Inbetriebnahme der Plattform, wird in dieser Arbeit nur noch bedingt behandelt.

Der offizielle Projektbeginn erfolgte mit den RoboCup German Open 2010. Von Anfang an galten zwei Termine als unverhandelbare Meilensteine. Zum Ersten war das der Design-Freeze, also das Ende der Konstruktionsarbeit, Anfang November. Der Grund hierfür war die Notwendigkeit, bis Jahresende die Forderungen aller externen Fertiger im Jahresbudget des IST untergebracht zu haben. Als zweiter Fixtermin ist die Fertigstellung des Prototyps bis zu den German Open 2011 zu nennen.

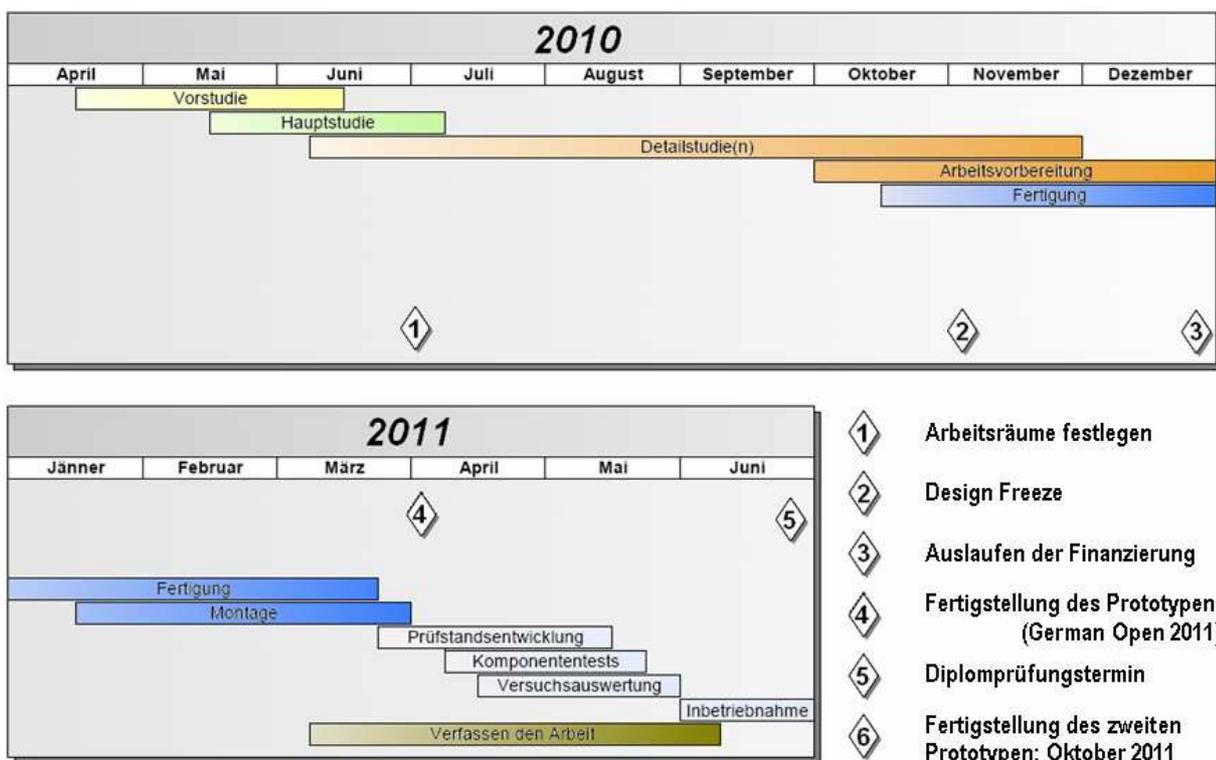


Abbildung 2. 2: Zeitplan des Projekts „Krikkit III“

Der enge Zeitplan und die starke Kapselung der jeweiligen Arbeitsbereiche begünstigten vielerorts den Einsatz des Simultaneous Engineerings (SimEng), also das zeitlich parallele Bearbeiten von Projektschritten, die im klassischen SE-Vorgehensmodell nacheinander erfolgen.

Als Fallbeispiel seien die Rollen der omnidirektionalen Räder genannt. Das Modul, in den sie verbaut werden, ist eines der Elemente mit hoher Priorität. Aus diesem Grund wurde die Hauptstudie an dieser Komponente stark vorangetrieben und frühzeitig fertig gestellt. Im Rahmen der Detailstudie erfolgte sofort, die genaue Konstruktion. Da aus gewissen geometrischen und wirtschaftlichen Zwängen heraus die Gestaltungsfreiheit der Omniwheel-Rollen gering ist, war die Arbeit daran nach verhältnismäßig kurzer Zeit abgeschlossen. Schließlich wurde mit der Fertigung der Teile begonnen noch bevor die Detailstudie des Gesamtsystems abgeschlossen war.

Im Fall dieses Projektes erwies sich SimEng als die einzig brauchbare Strategie um die engen zeitlichen Anforderungen zu erfüllen. Es sei an dieser Stelle aber auch auf die Gefahren gegenständlichen Vorgehens hingewiesen. Der Entwurfsprozess ist ein dynamischer Vorgang, bei dem Änderungen in einzelnen Bereichen zu jedem Zeitpunkt nötig werden können. In diesem Fall riskiert man mit dem SimEng, dass bereits erreichte Fortschritte in vorgezogenen Arbeitsphasen hinfällig werden. Ein derartiger Rückschlag musste auch bei der Entwicklung des zuvor bereits erwähnten Powertrains hingenommen werden. Das Modul, bestehend aus Motor, Radaufhängung und Omniwheel, war bereits im Rahmen der Detailstudie ausgearbeitet worden. Im Laufe der Hauptstudie wurde indes festgestellt, dass die geplante starre Radaufhängung nicht ausreichte, und durch eine gefederte Aufhängung ersetzt werden musste. Der Zeitverlust an dieser Stelle war durchaus beträchtlich.

2.2. DAS VORGÄNGERMODELL - LESSONS LEARNED

Das Vorgängermodell - der Krikkit II - wurde im Ausmaß von fünf Stück bei der RoboCup-Weltmeisterschaft 2005 erstmals zum Einsatz gebracht. Seither konnte das Team ein umfangreiches Know-How im Umgang mit dieser Plattform aufbauen.

Da es leider keine detaillierten Aufzeichnungen über Anzahl und Natur der Ausfälle und Fehlfunktionen dieser Geräte gibt, lässt sich keine Ausfallkurve daraus ableiten. Berichte von langjährigen und ehemaligen Teammitgliedern deuten allerdings darauf hin, dass die höchste Verfügbarkeit rund um die Weltmeisterschaft 2009 erreicht wurde. Seither nahm die Zahl der Ausfälle wieder zu. Waren bei den Offenen Deutschen Meisterschaften 2010 im Durchschnitt mehr als zwei einsatzfähige Roboter am Feld, so war es ein Jahr später nicht einmal mehr einer, weswegen insgesamt vier Spiele nicht bestritten werden konnten.

Daneben lassen sich aus den gewonnenen Erfahrungen auch einige konzeptionelle Mängel identifizieren die in die Definition der Ziele für das Nachfolgemodell einfließen sollen.

2.2.1. DAS SYSTEM¹⁰

Beim Krikkit II handelt es sich um einen autonomen Roboter der zweiten Generation. Sein Fahrwerk besteht, wie in Abbildung 2.3 zu erkennen ist, aus drei so genannten Mecanum Wheels(1), die um jeweils 120 Grad zueinander verdreht angeordnet sind. Diese Anordnung erlaubt eine beliebige Bewegung in der Ebene.

Der Antrieb sitzt in einer massiven Blechwanne, deren Außenseite den Umfang des Roboters darstellt. Im Inneren dieser Wanne findet sich neben den Motoren (3) auch noch der Großteil der im Roboter verbauten Elektronik (3) wieder.

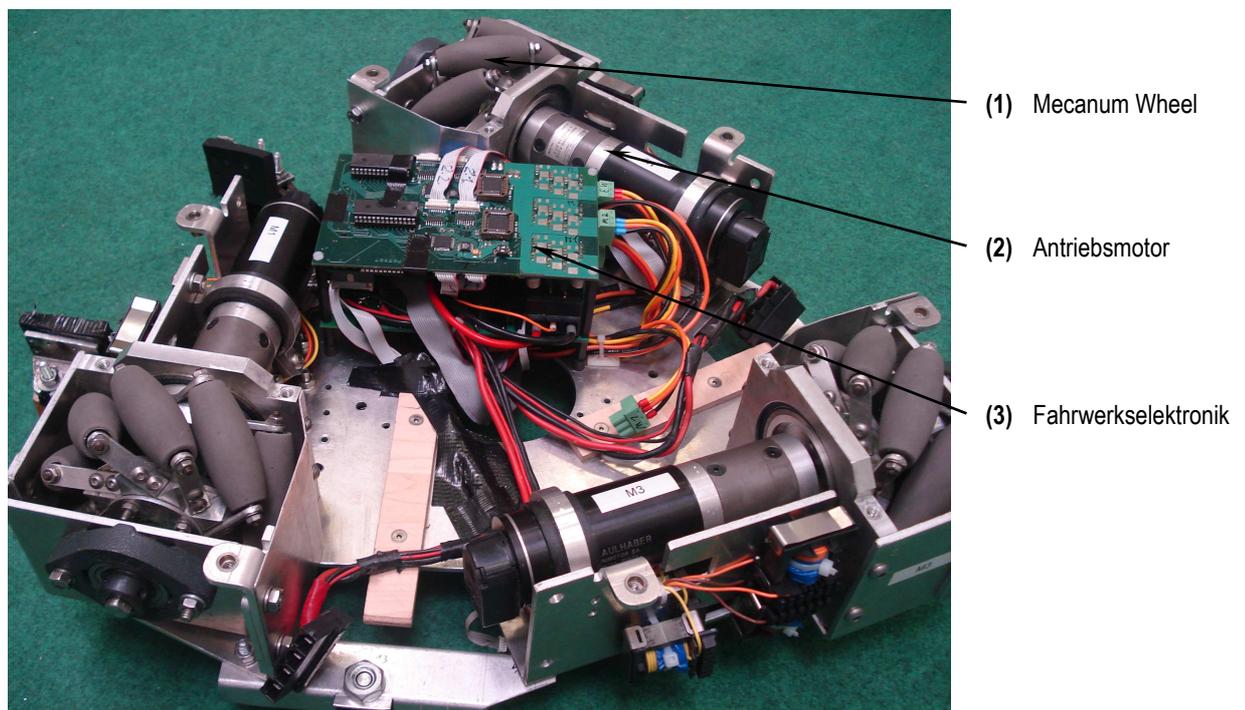


Abbildung 2. 3: Das Innenleben des Fahrwerks der Krikkit II- Klasse

Seit einer massiven Überholung und Modernisierung im Jahr 2009 kann dieser Bereich, der so genannte Unterbau, getrennt betrieben werden. Er stellt ein voll funktionsfähiges omnidirektionales Fahrwerk dar, das - mit den richtigen Fahrkommandos versorgt - selbstständig operieren kann.

Das Gegenstück, der Oberbau, beinhaltet neben dem pneumatischen Kicker samt Energieversorgung die Hardware für die höheren Softwarefunktionen des Roboters. So finden sich dort der PC, die PC-zu-Hardware-Schnittstellen und die omnidirektionale Kamera. Dieses Paket reicht aus, um an Software und Bilderkennung zu arbeiten, während das Fahrwerk an anderer Stelle benötigt wird.

Zwischen den beiden Komponenten befinden sich insgesamt drei Elastomerdämpfer, die die Einleitung von Schwingungen vom Unterbau in den Oberbau verhindern sollen.

¹⁰ Vgl. [BHF 2005]

Der zuvor schon erwähnte Kicker besitzt einen pneumatischen Aktor, der auf ein massives Stahlpendel schlägt, welches wiederum den Ball spielt. Eine Unterscheidung zwischen flachen und hohen Schüssen wird, soweit möglich, über die Öffnungszeit des verbauten Pneumatikventils realisiert.

2.2.2. ANALYSE DER KONSTRUKTION

Der Krikkit II beinhaltet eine Reihe von konstruktiven Lösungen, die im Ansatz und teils auch in der Ausführung durchaus gelungen sind und daher im Nachfolgemodell Anwendung finden können. An dieser Stelle ist z.B. die Kapselung in einen hardwarelastigen Unterbau und einen der Software gewidmeten Oberbau zu nennen. Auch die Abschirmung des Oberbaus mittels einer leichten aber dennoch stabilen Faserverbund-Hülle hat sich als vorteilhaft erwiesen. Die für eine Nachrüstung des Krikkit II entworfene Kameraaufhängung ist ebenfalls zu den gelungenen Komponenten zu zählen. Darüber hinaus lassen sich am Vorgängermodell jedoch einige Bereiche aufzeigen, die dringend einer Überarbeitung bedürfen. Um dieses vorhandene Verbesserungspotenzial strukturiert zu erarbeiten wird ein Vorgehensmodell in drei Stufen verwendet, wie es in Abbildung 2.4 zu sehen ist.

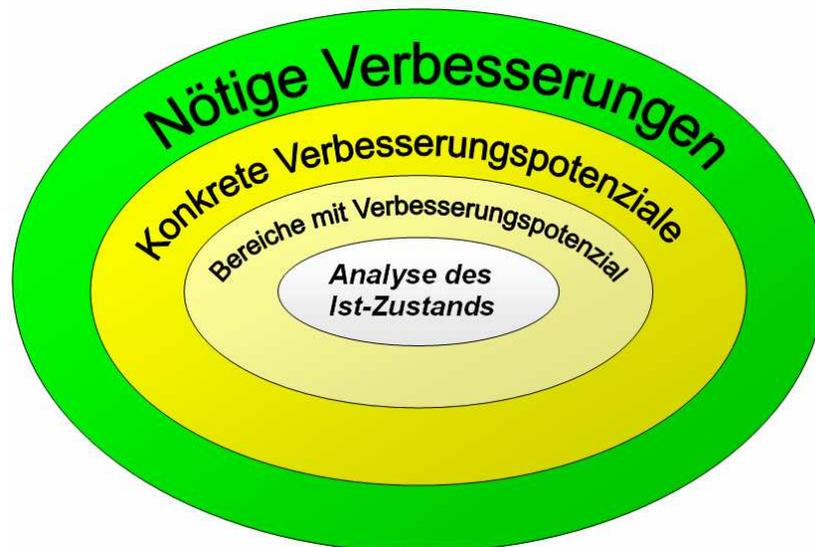


Abbildung 2. 4: Modell der Ist-Zustands-Analyse

Zuerst werden die Bereiche identifiziert, in denen ein derartiges Potential ersichtlich ist. In einem weiteren Schritt werden die konkreten Mängel erhoben und beschrieben. Anschließend folgt die Definition von Aufgabenbereichen, um die gefundenen Mängel zu beseitigen.

Baugruppen wie Kamera oder PC, ausbreiten. Darüber hinaus sind kaum Details über das reale Fahrverhalten bekannt. Maximale Beschleunigung, Richtungsabhängigkeit der Maximalgeschwindigkeit und Auswirkung von Gleitschlupf auf den Lagefehler des Roboters wurden weder jemals genau untersucht, noch werden sie von der künstlichen Intelligenz (KI) des Roboters berücksichtigt.

Der Kicker und die Ballführung bedürfen ebenfalls einer Überarbeitung. Wie in Folge noch erläutert werden wird, entsprechen sie nicht mehr dem in der Liga vorherrschenden Standard. Außerdem sind auch sie eine nicht zu unterschätzende Schwingungsanregung. Nach einem Schuss mit maximaler Intensität ist die Kamera, laut Beobachtung im Spiel, bis zu fünf Sekunden lang nicht in der Lage auswertbare Bilder aufzunehmen.

Die steigende Zahl an Fehlfunktionen rückte in den vergangenen Jahren die Wartbarkeit des Roboters stärker in den Mittelpunkt des Interesses. Das System ist sehr kompakt gestaltet und stark gekapselt. Um beispielsweise an die zentrale Elektronik zu kommen, müssen 26 Schrauben in drei Gewindegrößen gelöst werden. Es hat sich gezeigt, dass diese geringe Zugänglichkeit sehr nachteilig ist. Dies sind nur einige der erhobenen Verbesserungsmöglichkeiten.

2.2.3. BEWERTUNG DER MÖGLICHEN VERBESSERUNGEN

Da die verbesserungswürdigen Bereiche bei weitem zu zahlreich sind und den Rahmen einer Diplomarbeit sprengen, ist eine Reihung nötig, um die Aufgaben zu finden, die vorrangig sind. Als Bewertungsgrundlagen dienen hier zwei Kriterien:

- ✚ Wie wertvoll ist eine Neuerung für den Erfolg in der RoboCup-Middle-Size-League?
- ✚ Wie groß ist der zu erwartende zeitliche und finanzielle Aufwand?

Für die Beurteilung der einzelnen Projekte lassen sich keine quantifizierbaren Parameter finden, deshalb erfolgt sie subjektiv aus Erfahrung mit den eigenen- und Beobachtung der konkurrierenden Roboter.

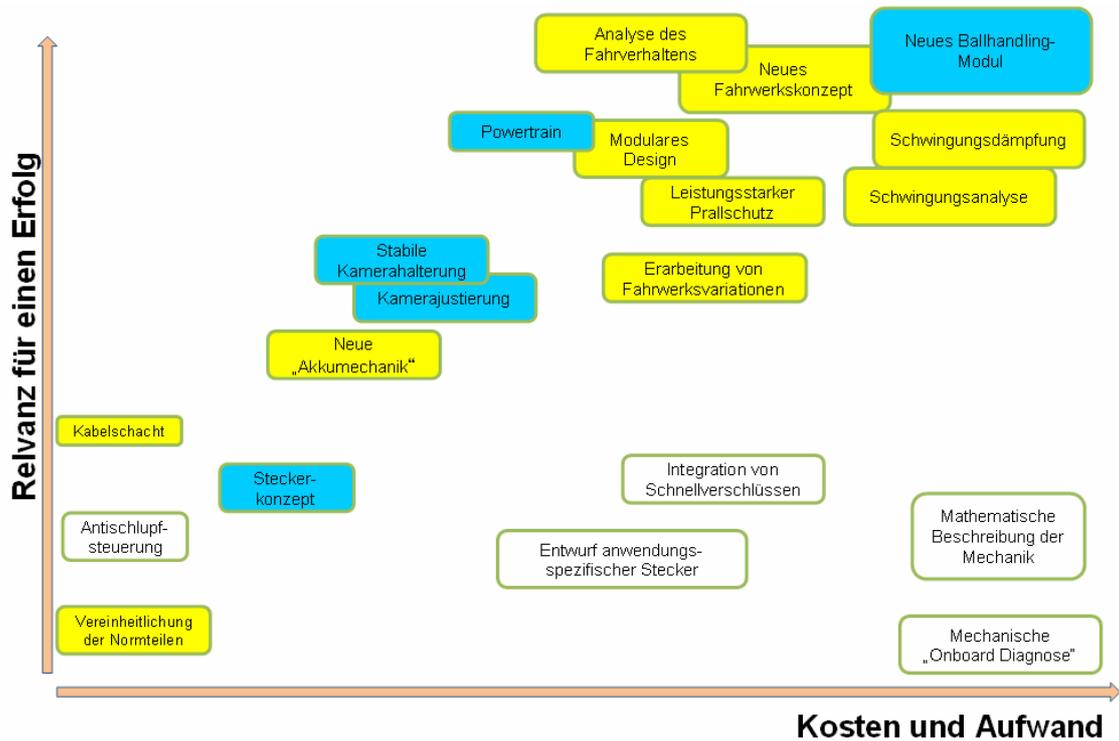


Abbildung 2. 6: Kosten-Nutzen-Analyse der möglichen Neuerungen

Wie sich in Abbildung 2.6 leicht erkennen lässt, sind die Maßnahmen im linken oberen Bereich des Feldes zu bevorzugen. Sie bieten ein großes Verbesserungspotenzial bei vergleichsweise niedrigen Kosten, während sich die Ansätze in der anderen Hälfte als weniger rentabel erweisen.

Die im Diagramm blau markierten Projekte werden bereits ganz oder teilweise an anderer Stelle bearbeitet, während die gelb markierten, ganz oder teilweise, zum Inhalt dieser Arbeit werden sollen.

2.3. AUFGABENSTELLUNG

Die Aufgabenstellung umfasst die Entwicklung eines mobilen, omnidirektionalen Roboters, der in erster Linie für den Einsatz in der RoboCup-MSL gedacht ist. Darüber hinaus soll er aber auch hinreichend flexibel gestaltet sein, um dem IST in diversen Projekten als Plattform für ihre Forschungsarbeit im Bereich autonomer Systeme zu dienen.

Eine grundsätzliche Charakterisierung und darauf aufbauend konkrete Ziele für die Neuentwicklung finden sich in diesem Kapitel.

2.3.1. POSITIONIERUNG DES ROBOTERS

Ein Roboter ist laut Definition ein flexibles, frei programmierbares Handhabungsgerät. Diese Beschreibung impliziert, dass der Einsatzzweck lediglich von der Programmierung abhängt, und dieselbe Hardware eine ganze Fülle von Aufgabe übernehmen kann.

Angesichts der zunehmenden Optimierung und der damit einhergehenden Spezialisierung der mechanischen und elektronischen Systeme an Robotern gilt diese Definition im Grunde nicht mehr. Selbst wenn man sich nur auf die Menge der mobilen Roboter beschränkt, können wichtige Parameter wie Größe, Robustheit oder Geländegängigkeit anwendungsspezifisch stark variieren. Daher ist es von besonderer Bedeutung, sich an dieser Stelle Gedanken darüber zu machen, wie die Gestaltung des Krikkit III grundsätzlich angelegt werden soll.

2.3.1.1. Detailreichtum vs. Einfachheit

Das Vorgängermodell ist ein Paradebeispiel für simple und zweckorientierte Konstruktionsweise. Das Resultat dieser Philosophie ist eine Mechanik, die in den vergangenen fünf Jahren weitestgehend zuverlässig funktioniert und kaum Ausfälle zu verzeichnen hatte.

Andererseits lässt sich aber auch nicht abstreiten, dass der mechanische Aufbau dem Vergleich mit den neueren Systemen der Konkurrenz an der Weltspitze in keiner Weise gewachsen ist. Diese Teams verfügen vielfach über Hilfsmittel, wie etwa eine angetriebene Ballführung („Aktive Ballführung“) oder Kicker die in verschiedene Richtung kicken können (Multi-Vektor-Kicker). Bei derartig aufwändigen Komponenten hat man zwar mit einer erhöhten Fehleranfälligkeit zu kämpfen, ihr Mehrwert am Spielfeld ist aber unverzichtbar um mit der Konkurrenz auf Augenhöhe zu bleiben.

Im Gegensatz zur bisherigen Strategie soll der Prototyp des Krikkit III deshalb mit einer ganzen Reihe neuer Komponenten ausgestattet werden, um zu prüfen, welche von ihnen sich für die Folgeversionen bewähren.

2.3.1.2. Leichtbau vs. Robustheit

Mit seinen 38,5 kg gehört die bisherige Plattform sicher nicht zu den Leichtgewichten der Liga. Grundsätzlich hat sich diese massige Bauweise aber bisher vor allem im Zweikampf und bei Kollisionen bewährt. Aus diesem Grund soll auch der Nachfolger eher als robuste Plattform ausgelegt werden.

Darüber hinaus wird aber zu untersuchen sein, wie sich die höhere Masse auf das Fahrverhalten und die Agilität des Geräts auswirkt.

2.3.1.3. Preiswert vs. hohe Performance

Das Projektbudget für den gesamten Roboter liegt bei etwa 14.000 €, wovon ca. 9200 € für die Mechanik zur Verfügung stehen. Darüber hinaus ist mit einer umfangreichen Unterstützung seitens der Hersteller und Fertigungspartner zu rechnen (nachträglichen Schätzungen zufolge konnte Sach- und Materialsponsoring im Wert von rund 20.000 € lukriert werden). Mit diesem Betrag liegt man international im unteren Mittelfeld. So kosten die neu entwickelten Roboter der TU-Kassel nach Auskunft des Teams ca. 15.000 €, während die Spieler der TU-Eindhoven nach eigenen Angaben selbst im *gebrauchten Zustand* für ca. 100.000 € zu haben sein wird.

Auch wenn dieser Vergleich zeigt, dass der Einsatz der vorhandenen Ressourcen wohl überlegt erfolgen muss, werden wirtschaftliche Aspekte bei der Auswahl technischer Lösungen nicht vordergründig sein.

2.3.1.4. Zugänglichkeit vs. Hochintegration

Die Frage nach dem Grad der Integration ist eng mit der Frage nach der genauen Anwendung des Roboters verbunden. Bei der Entwicklung eines auf seine Kernaufgabe optimierten und spezialisierten Roboters ist ein hoher Integrationsgrad sicher das Mittel der Wahl. Er erlaubt eine optimale Raumausnutzung und eine im Allgemeinen vorteilhaftere Massenverteilung. Der Preis den man dafür bezahlt, ist eine signifikante Verringerung der Zugänglichkeit, die sowohl Wartung als auch nachträgliche Modifikationen erschwert.

Bei der neuen Plattform soll genau der umgekehrte Weg eingeschlagen werden. Sie soll aus einzelnen abgegrenzten Modulen bestehen. Auf diese Weise wird einerseits der Austausch defekter Baugruppen erleichtert, und andererseits ein schnelles Umrüsten auf andere Aufgaben ermöglicht.

2.3.2. LASTENHEFT

Das konkrete Lastenheft ergibt sich aus der Analyse des Vorgängermodells unter „2.2 Das Vorgängermodell – Lessons Learned“ und der Positionierung des Roboters wie unter „2.3.1 Positionierung des Roboters“ vorgestellt. Außerdem wurden spezielle Wünsche der einzelnen Stakeholder (Software- und Elektronikentwickler, Wartungsteam, IST) eingearbeitet.

Wie sich im Projektverlauf gezeigt hat, ist ein starres Lastenheft bei einer Entwicklung dieses Grades an Neuheit nicht praktikabel. Vielmehr wurde es als Leitschiene für eine zielgerichtete Konstruktion verwendete und laufend neuen Erkenntnissen angepasst.

2.3.2.1. Anforderungen an die mechanische Gestaltung

- Der Roboter ist als Modulsystem zu gestalten, so dass einzelne Module leicht und ohne großen zeitlichen Aufwand gewechselt werden können.
- Der Kicker ist als eigenes Modul zu entwerfen. Arbeitsraum und Anschlusspunkte sind so auszuführen, dass dieses jederzeit gegen ein Servicemodul mit einem anderen Einsatzzweck als dem Fußballspielen ausgetauscht werden kann.
- Die Vielfalt der verwendeten Normteile, insbesondere Schrauben, ist im Sinne einer erleichterten Wartbarkeit zu reduzieren.
- Sowohl die Antriebseinheiten als auch der Kicker sind vom Rest der Struktur schwingungsmäßig zu entkoppeln.
- Der gesamte Roboter ist mit einer leichten, abnehmbaren Hülle zu umgeben, um die Komponenten im Innenraum vor Beschädigung zu schützen.
- Das Prinzip der Mecanum-Wheels für die Räder, sowie die Außengeometrie der dafür verwendeten Rollen, ist beizubehalten.
- Der feine Filz, der während der Spiele vom Teppichboden des Spielfelds abgerieben wird, stellt im Innenraum ein Problem dar. Das Fahrwerk ist so zu gestalten, dass ein Eindringen des Abriebs vermieden wird, *oder* dieser einfach wieder entfernt werden kann.

2.3.2.2. Anforderungen seitens der Elektronik

- Der Kabelbaum im Fahrwerk ist in einem separaten Kabelkanal zu führen.
- Die Verkleidung ist aus einem nicht leitenden Material zu fertigen, um eine WLAN-Verbindung zu ermöglichen.
- Für die dezentral angeordneten Elektronikkomponenten sind in den jeweiligen Modulen geeignete und geschützte Montageplätze vorzusehen.
- Für die Elektronikkomponenten, die keinem Modul zugeordnet sind, ist ein zentraler, hinreichend geschützter Bereich zu gestalten. Diese sogenannte E-Box ist als Modul anzusehen und muss dementsprechend als Einheit aus dem Roboter entfernt werden können.

2.3.2.3. Anforderungen seitens der Software und Bildauswertung

- Die Oberkante des Spiegels der omnidirektionalen Kamera ist auf einer Höhe von über 780 mm anzuordnen.
- PC und Omnivision sind soweit zu koppeln, dass sie gemeinsam aus dem Roboter entfernt werden können.
- Es ist ein geeigneter Ort für die spätere Montage einer gerichteten Kamera vorzusehen. (Korrigiert zu: *Die Kamera: „Sony-Eye-Toy“ ist in der Rolle einer gerichteten Kamera anzubringen.*)
- Es sind Anschlüsse für die folgenden Leitungen an einer von außen zugänglichen Stelle zu platzieren: VGA,, USB, LAN, CAN

2.3.2.4. Regelspezifische Anforderungen¹¹

Die RoboCup-Föderation stellt an die Roboter der MSL hinsichtlich Gestaltung und Verhalten detaillierte Anforderungen. Die für die Mechanik relevanten lauten:

- Der gesamte Roboter muss zu jedem Zeitpunkt des Spiels in einem gedachten Prisma mit einer quadratischen Grundfläche der Seitenlänge 520 mm und einer Höhe von 800 mm Platz finden.
- Die Masse des Roboters darf 40 kg nicht überschreiten.
- Der Roboter muss mit einer aufpralldämpfenden Verkleidung versehen sein.
- Die Ballführung des Roboters darf den Ball niemals zu mehr als einem Drittel umfassen.
- Ist der Ball in der Ballführung, darf er für max. vier Sekunden an einem natürlichen Rollen gehindert werden.
- Alle während dem Spiel von außen ersichtlichen Komponenten sind schwarz zu gestalten.

2.3.2.5. Nachträglich spezifizierte Anforderungen

- Es ist ein möglichst gleichmäßiges Beschleunigungsprofil ohne dominante Vorzugsrichtungen zu wählen.
- Um die Belastungen im Fall eines Zusammenstoßes mit einem gegnerischen Roboter gering zu halten, ist eine Gesamtmasse von über 35 kg anzustreben.

¹¹ Vgl. [RCF 2011]

2.4. BENCHMARKING

Gerade in einem schnelllebigen Forschungsbereich wie der Robotik ist es unerlässlich, die Mitbewerber im Auge zu behalten. Die Spiele des RoboCup bieten hierzu die ideale Gelegenheit.

Für diese Arbeit wurden im speziellen die Offenen Deutschen Meisterschaften 2010 und 2011 herangezogen. Auf diese Weise konnten vorab Anregungen gesammelt und im Jahr darauf der neu entwickelte Krikkit III mit den neuen Spielern der anderen Universitäten verglichen werden.

2.4.1. OMNIWHEEL

Was die Gestaltung der Räder angeht, hat sich in den letzten Jahren das Prinzip der 90° Omniwheels, wie in Abbildung 2.7 gezeigt, als Standard durchgesetzt. Diese zeichnen sich vor allem durch eine im Vergleich mit den in Graz verwendeten „Mecanum-Wheels“ bedeutend einfachere Konstruktion und einen kompakteren Aufbau aus. Beeindruckend ist auch die Bodenhaftung, die auf diesem Weg erreicht werden kann. Sie reicht so weit, dass die Räder gestrandeter Roboter eher den Rasen aufreißen, als ins Gleiten überzugehen.

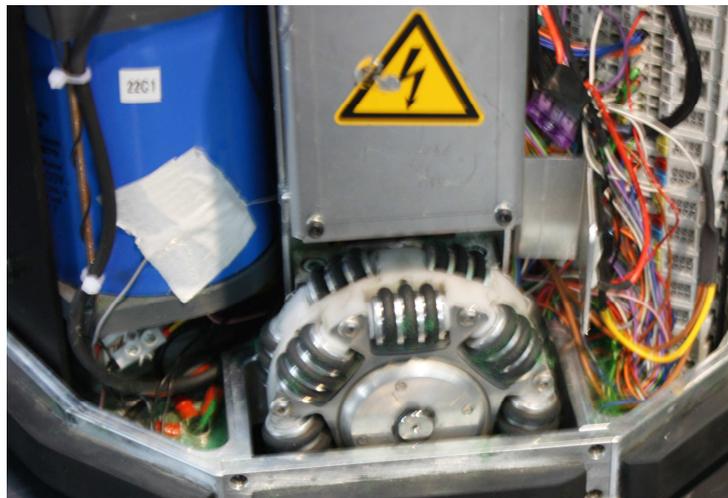


Abbildung 2. 7: Die 90°- Omniwheels der TU- Eindhofen

2.4.2. FAHRWERKE

Im punkto Fahrwerke zeichnet sich eine interessante Entwicklung ab! Mehr und mehr Teams steigen auf Fahrwerke mit vier statt wie bisher drei Omniwheels um. Diese Anordnung stellt die Entwickler, aufgrund ihrer geometrischen Überbestimmtheit, vor die Herausforderungen, einen gleichmäßigen Bodenkontakt aller vier Räder zu gewährleisten. Was die Arbeit der Mechanik erschwert, eröffnet der Elektronik gänzlich neue Möglichkeiten: Bei einer dreirädrigen Plattform kann aus den Drehzahlen aller drei Räder auf die Lageänderung geschlossen werden. Störgrößen wie Schlupf oder Messfehler gehen direkt in die Berechnung der Position ein. Dadurch summiert sich dieser Odometriefehler über die Zeit schnell auf, was diese Informationsquelle über längere Strecken nur sehr bedingt brauchbar macht.

Besteht das Fahrwerk jedoch aus 4 Rädern, dann ist eine Drehzahlinformation redundant und kann zur Reduktion des Odometriefehlers verwendet werden. Wie stark der dadurch erreichte Genauigkeitsgewinn wirklich ist, lässt sich an dieser Stelle schwer erkennen, laut Angaben der Kollegen des Teams aus Kassel ist er aber signifikant.

2.4.3. KICKER

Nimmt man die Kickmechanismen der Konkurrenz genauer unter die Lupe, so findet man hier in erster Linie elektrisch betriebene Solenoid-Kicker. Sie bestehen aus einem Spulenkörper in die, durch das in den Spulen erzeugte Magnetfeld, ferromagnetische Stößel gezogen werden. Nach diesem Prinzip aufgebaute Aktoren sind sehr präzise ansteuerbar, besitzen eine recht hohe Leistungsdichte und benötigen außer der am Roboter ohnehin vorhandenen Elektrizität keine weiteren (z.B. pneumatischen) Energiespeicher. Dies hat aber auch seinen Preis, denn um die benötigte Energiemenge (bis zu 100A bei 430V vgl. [MPL 2010]) bereitzustellen, ist eine ausgeklügelte elektronische Schaltung nötig. Darüber hinaus stellen derartige Spannungspegel am Roboter ein nur schwer zu kalkulierendes Risiko dar.

Abgesehen vom Antrieb beherrschen mittlerweile alle Mitbewerber sowohl hohe als auch flache Schüsse. Meist wird dies durch eine Veränderung der Kicker-Geometrie erreicht, sodass der Ball mehr oder weniger hoch getroffen wird [Kol 2011].

2.4.4. BALLFÜHRUNG

Auch wenn viele Teams dieses Werkzeug noch nicht unter Kontrolle haben, verfügten bei den German Open 2011 bereits alle Konkurrenten über eine sogenannte aktive Ballführung, wie sie in Abbildung 2.8 zu sehen ist. Dabei wird der Ball (1) nicht nur einfach an der Außenseite des Roboters geführt, sondern über angetriebene Rollen (2) in Bewegung versetzt. Mit diesem Hilfsmittel kann der Ball während des Abbremsens oder sogar im Rückwärtsfahren sicher in der Ballführung gehalten werden. Viele der Teams mussten aber feststellen, dass hier die Herausforderung in der Regelung der Rollen liegt, die offenbar nicht einfach zu implementieren ist.

Außerdem erwiesen sich diese Ballführungen als empfindliche Komponenten, die des Öfteren durch Zusammenstöße beschädigt wurden.

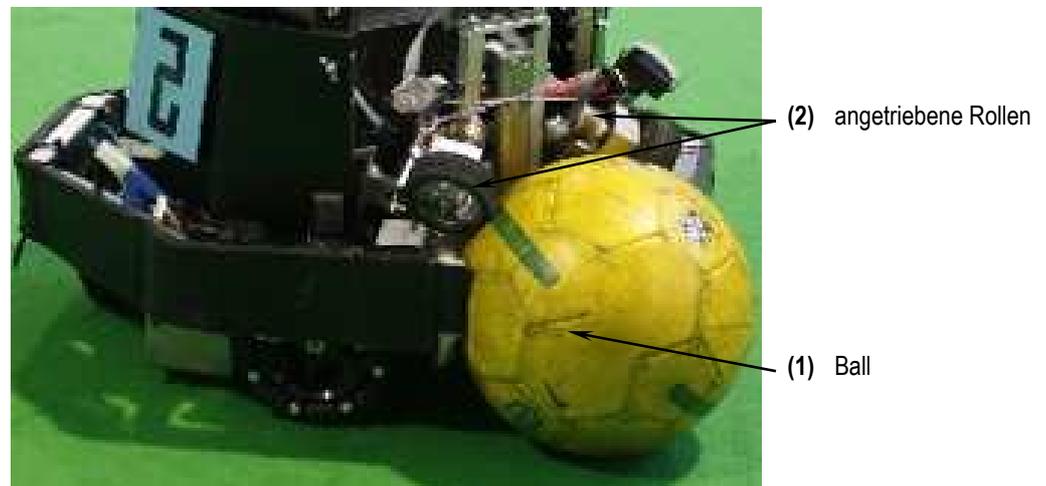


Abbildung 2. 8: Aktive Ballführung des Roboters der TU- Stuttgart

2.4.5. CONTAINMENT

Ein effektiver Schutz vor externer Krafteinwirkung hat offenbar bei den meisten Teams eine erstaunlich geringe Priorität. In vielen Fällen besitzen die Roboter nur eine stabile "Stoßstange", die direkt mit der Struktur des Roboters verbunden ist. Oberhalb der Ballhöhe sucht man Abschirmungen sogar meist vergebens. Zumindest im Laufe eines Bewerbs ergaben sich dadurch allerdings nur selten Beschädigungen an der Hardware. Wie sich die schweren Stöße langfristig auf sensible Komponenten wie Elektronik, Kamera, etc. auswirken, lässt sich an dieser Stelle jedoch nicht vorhersagen.

2.4.6. GESCHWINDIGKEIT

Das Maß der Dinge hinsichtlich der Geschwindigkeit dürfte 2011 der neue Roboter des RFC Stuttgart sein. Er bringt es, angetrieben von vier 200 W Motoren, nach Angaben des Teams (Quelle: [RFC 2011]) auf 5m/s und kann diese aufgrund hoher Beschleunigung am Feld auch ausspielen. Interessanterweise verfügen einige Konkurrenten über Plattformen, die ähnliche Geschwindigkeiten erreichen könnten, oftmals jedoch durch andere Bereiche wie etwa die Bildauswertung beschränkt werden.

2.4.7. MODULARITÄT¹²

Auch wenn die meisten Teams der MSL nach wie vor auf einen hohen Grad an Integration setzten, gibt es doch bereits einen Ansatz in Richtung modularen Aufbau. Die von der Universität Freiburg in Zusammenarbeit mit der Firma Molex entwickelte Plattform „open Tribot“ verfügt über ein abtrennbares Antriebsmodul. Ähnlich wie beim Krikkit III beinhaltet es sowohl Motor als auch Omniwheel, und kann im Schadensfall schnell gewechselt werden.



Abbildung 2. 9: Der "openTribot" der Universität Freiburg¹³

¹² Vgl. [UFR 2011]

¹³ Quelle [UFR 2011]

2.4.8. WERKSTOFFE

Bei der Wahl der Werkstoffe lässt sich ein zunehmender Trend zum Einsatz von Kunststoffen erkennen, und das nicht nur in untergeordneten Baugruppen. Beispielsweise setzt das Team der TU Kassel in der neuen Generation ihrer Roboter auf ein Omniwheel aus Polyoxymethylen (POM). Der zuvor bereits angesprochene Open Tribot wiederum wird von einer Hülle aus Lexan geschützt (vgl. [UFR 2011]).

Beide Ansätze sind relativ neu, und so lassen sich bei Abgabeschluss dieser Arbeit noch keine Aussagen über Erfolge und eventuelle Probleme tätigen.

Der Standardwerkstoff in der Liga ist immer noch Aluminium in diversen Legierungen. Darüber hinaus werden an hoch belasteten Stellen oftmals Bauteile aus Stahl und sogar Titan eingesetzt. Ein dabei weithin vernachlässigtes Thema ist das der elektrogalvanischen Korrosion bei leitender Verbindung verschiedenen Materialien.

2.5. MODULARITÄT

Modulare System finden in industriellen Anwendungen vor allem aus wartungstechnischen und ökonomischen Gründen immer weiter Verbreitung. So gesehen liegt der Schluss nahe, diese erfolgsversprechende Strategie auch auf das an sich sehr wartungsintensive System „Mobiler Roboter“ zu übertragen.

2.5.1. GRUNDGEDANKE UND NUTZEN

Der grundlegende Gedanke der Modularität besteht darin, Baugruppen entsprechend ihrer Funktionalität in räumlich wie logisch abgegrenzte Pakete zu unterteilen. Diese Einheiten sind optimalerweise in sich sehr kompakt und stark vernetzt, während sie nach außen hin nur eine geringe Anzahl an möglichst standardisierten Schnittstellen aufweisen. Die einzelnen Module sind meist schon für sich, wenn auch nur in eingeschränktem Maße, funktionsfähig. Eine erweiterte Modularität fordert darüber hinaus gleiche Schnittstellen für verschiedene Module. Dies erlaubt einerseits eine variable Anordnung der bestehenden Baugruppen, deren Lage nicht funktionskritisch ist, und andererseits eine Spezialisierung des Geräts durch die Auswahl der verwendeten Module.

Die Einführung von Standards ist zwar vielerorts von Vorteil, genormte Elemente sind aber naturgemäß auch immer ein Kompromiss, und in den einzelnen Problemstellungen maßgeschneiderten Lösungen oft unterlegen. Es ist also nicht von vornherein gesagt, dass das Konzept des modularen Aufbaus auch für die hier entworfenen Plattformen optimal ist. Die Vor- und Nachteile dieser Herangehensweise soll im Folgenden beleuchtet werden.

In der objektorientierten Programmierung werden die beiden Begriffe *Kohäsion* und *Kopplung* geprägt (vgl. [BK 2009]), die in dieser Arbeit auch in der Analyse modularer Systeme Anwendung finden sollen. Die Kohäsion beschreibt dabei die Vernetzung der einzelnen Bestandteile innerhalb eines Moduls. Unter Kopplung hingegen versteht man die Summe der Verbindungen und Abhängigkeiten über die Modulgrenzen hinweg. Zusammenfassend lässt sich also feststellen, dass sich gut gewählte Module durch hohe Kohäsion und geringe Kopplung auszeichnen.

2.5.1.1. Beschleunigte Wartbarkeit

Im Laufe der Weltmeisterschaft 2009, die noch gänzlich mit den Krikkit II Robotern bestritten wurde, zeigte sich eine große Fehleranfälligkeit gewisser Schlüsselkomponenten. Jeder Ausfall führte dabei zum Ausfall eines gesamten Spielers. Aus dieser Erkenntnis heraus wurden sie so modifiziert, dass jeder Unterbau (Fahrwerk und Ansteuerelektronik), mit jedem beliebigen Oberbau (PC und Vision-System) kombinierbar war. Folglich konnte aus zwei defekten Robotern ein funktionsfähiger zusammengesetzt werden.

Verfolgt man diese Strategie weiter und unterteilt die Plattformen in mehrere kleine Module, wäre es möglich, einzelne besonders fehleranfällige Module „auf Lager“ zu legen und defekte Roboter ohne großen Aufwand am Spielfeldrand zu reparieren.

Darüber hinaus lässt sich auf diese Weise das komplexe Problem „mobiler Roboter“ in eine Vielzahl kleiner, überschaubarer Problem unterteilen. Da die einzelnen Systeme somit leichter überblickbar und wartbar werden, ist auf diesem Weg bereits eine signifikante Verringerung der Ausfallsrate zu erwarten.

2.5.1.2. Vereinfachte Entwicklung

Um international konkurrenzfähig zu bleiben, ist eine ständige Weiterentwicklung des gesamten Systems, also auch der mechanischen Komponenten, zwingend nötig. Die Neufertigung mechanischer Bauteile ist allerdings sehr aufwändig und kostenintensiv. Daher muss versucht werden, Änderungen an der Mechanik so zu gestalten, dass der überwiegende Teil der Roboterhardware davon unbeeinträchtigt bleibt.

Ein modulares Design bietet hier klare Vorteile. Zeigt ein Modul Schwächen und Entwicklungspotential, so kann es überarbeitet werden. Während des gesamten Entwicklungsprozesses sind die Modulgrenzen fest, benachbarte Module sind daher, per Definition, nicht betroffen. Existiert schließlich ein Prototyp des verbesserten Moduls kann er problemlos eingesetzt und direkt im Roboter getestet werden.

Neben einer verkürzten Entwicklungszeit ist hier vor allem mit verringerten Kosten bei der Weiterentwicklung mechanischer Komponenten zu rechnen, da nur die Teile innerhalb des Moduls neu gefertigt werden. In Anbetracht der Tatsache, dass vor allem finanzielle Gründe eine Verbesserung der Hardware bis dato verhindert haben sollte dieser Punkt nicht unterschätzt werden.

Was aus Sicht des Gesamtsystems vorteilhaft erscheint, wird aus Sicht des einzelnen Moduls zum Nachteil. Zeigen sich die Modulgrenzen als unumstößlich, wird die Gestaltungsfreiheit bei der Neuentwicklung signifikant eingeschränkt. Auf diese Weise müssen unter Umständen technisch vorteilhafte Lösungen verworfen werden, weil sie in den engen Grenzen des Moduls nicht realisierbar sind. Aus diesem Blickwinkel ist eine durchdachte Abgrenzung der Module essenziell.

2.5.1.3. Rekonfigurierbarkeit

Rekonfigurierbare Robotersysteme, also Roboterarbeitsplätze, deren Vorrichtungen und Werkzeuge an verschiedene ähnliche aber nicht idente Arbeitsgänge angepasst werden können sind derzeit vor allem in der Automobilindustrie ein aktuelles Forschungsfeld. Die Idee besteht hierbei darin, eine vorhandene Vorrichtung an verschiedene Fahrzeugmodelle anpassen zu können (vgl. [Kov 2008]).

Einer ähnlichen Situation sehen sich auch die Spieler eines RoboCup- Teams gegenüber. Jede Position stellt spezielle Anforderungen. So muss sich ein Tormann beispielsweise in Querrichtung sehr schnell bewegen können, um in kürzester Zeit von einem Ende des Tor zum anderen zu gelangen, während der Kicker stets auf den sich nähernden Angreifer gerichtet bleibt. Ein Angreifer hingegen kennt nur eine Richtung, nämlich auf das gegnerische Tor zu. Entsprechend ist eine hohe Agilität in Vorwärtsrichtung für ihn entscheidend. Ein modularer Aufbau des Fahrwerks würde hier die Möglichkeit bieten, mit verschiedenen Variation der Omniwheels die Vorzugsrichtungen entsprechend der Bedürfnisse auf den jeweiligen Positionen zu ändern. Somit könnte aus einem sehr defensiv eingestellten Team in kürzester Zeit ein oder zwei Spieler auf Sturmspitzen umkonfiguriert werden.

2.5.1.4. Redundanz

Oftmals ergeben sich Situationen in denen die Funktionalität einer Baugruppe von verschiedenen benachbarten Komponenten genutzt wird. Diese Synergieeffekte verringern den Aufwand und die Kosten, da redundante Systeme eingespart werden können. Im Fall einer Modulbauweise ist hier jedoch darauf zu achten, dass eine solche gemeinsame Nutzung zu keiner unerwünschten Vernetzung zwischen den einzelnen Modulen führt.

Als gutes Beispiel dafür sei die Ansteuerelektronik für die Antriebsmotoren zu nennen. Sie benötigen eine weitere Logikeinheit, welche aus der vorgegebenen Fahrtrichtung die Einzeldrehzahlen für die Motoren errechnet. Da aber jedes Powertrain-Modul seine eigene Elektronik an Bord trägt, muss die leistungsintensive Rechnung jetzt auf jedem Modul separat durchgeführt werden. Zwei Drittel der so ermittelten Daten entstehen als „Nebenprodukt“ und können nicht genutzt werden.

Redundante Systeme fordern aber nicht nur einen höheren Aufwand, der Wegfall von zentral genutzten Komponenten bietet auch eine erhöhte Ausfallsicherheit. Fällt ein System aus, so ist der Schaden nur begrenzt. Die anderen Teilbereiche bleiben unberührt. Im zuvor angeführten Beispiel bedeutet dies, dass bei Ausfall einer Motorelektronik der gesamte Roboter sein omnidirektionales Fahrverhalten einbüßt, aber trotzdem mobil bleibt.

2.5.1.5. 2.5.1.5 Conclusio

Zusammenfassend ist anzuführen, dass die Entscheidung für oder gegen eine modulare Gestaltung vor allem von den Parametern der späteren Anwendung des Produkts abhängig ist. Bei einem System wie dem hier zu entwickelnden Roboter, welches sich durch kurze Wartungsintervalle (im Extremfall bis zu 15 Minuten) und eine hohe Anzahl an zu erwartenden Modifikationen auszeichnet, ist ein beträchtlicher Mehrwert zu erwarten. Folglich repräsentiert die Modularität als eine durchaus interessante Strategie.

2.5.2. ABGRENZUNG DER FUNKTIONALITÄTEN

Der Erfolg eines Modulsystems steht und fällt mit der Aufteilung der Module. Besonders die Vielfalt der Aufgaben und Funktionalität eines MSL-Roboters machen die Abgrenzung schwierig. Ein systematisches Vorgehen ist deshalb umso wichtiger.

Als erstes gilt es die Funktionen und Komponenten, die das fertige Gerät benötigt, in einem Brainstorming zu sammeln, wie das in Abbildung 2.10 bereits geschehen ist. Dabei werden die jeweiligen Einträge so gruppiert, dass Elemente, die einander in ihrer Funktion ähnlich oder räumlich nahe sind auch im Brainstorming beieinander liegen. Dies erleichtert das spätere Eintragen der Modulgrenzen.

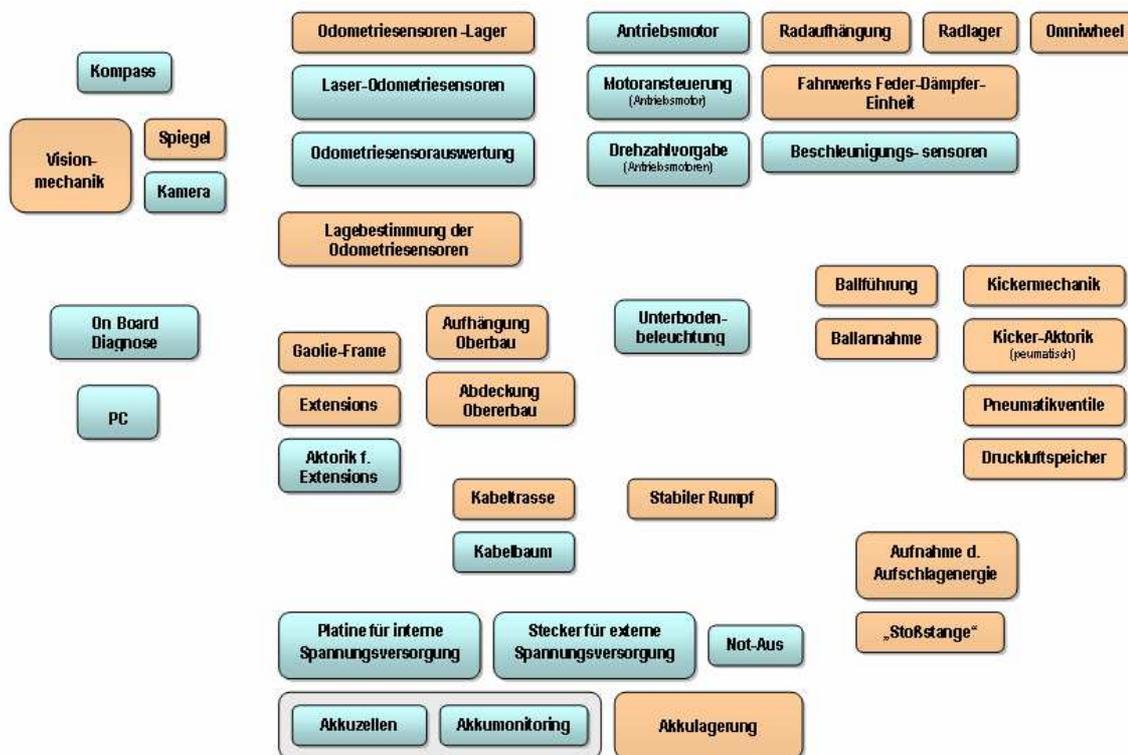


Abbildung 2. 10: Brainstorming der benötigten Funktionen und Baugruppen am Roboter

Anschließend werden die Verbindungen, zwischen den Einträgen, ganz gleich ob mechanische, logische oder elektrische, eingetragen. Nicht markiert werden Verbindungen, die ähnlich einem Bus, ohnehin zu jedem Modul geführt werden können. In diesem Fall sind das der CAN-Bus, sowie Spannungsversorgung und Masseleitung. In Abbildung 2.11 lassen sich bereits Bereiche erkennen, die intern sehr stark vernetzt sind, aber nur wenige Verbindungen nach außen besitzen.

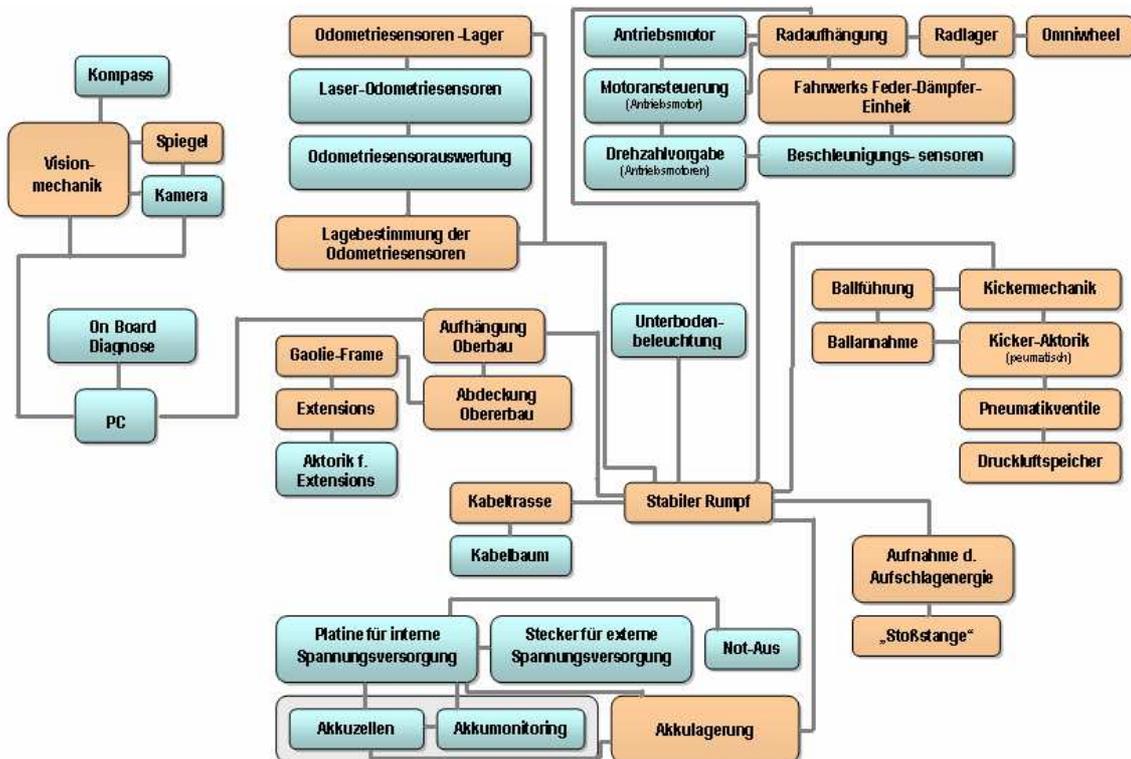


Abbildung 2. 11: Verbindungen der Funktionen und Baugruppen am Roboter

Zum Schluss werden die Abgrenzungen der einzelnen Module so gezogen, dass möglichst wenige der Verbindungen über die Modulgrenzen verlaufen. Dieses Schema dient - wie alle ähnlichen Vorgehensweisen - nur der Visualisierung bestehender Sachverhalte. Man darf sich keinesfalls nötigen lassen, wider besseres Wissen Modulgrenzen zu ziehen, nur weil die Methode es so „verlangt“. Dass eine Lösung hierbei niemals ideal, sondern immer ein Kompromiss ist, liegt in der Natur der Sache. Abbildung 2.12 lässt bereits die später realisierte Modulstruktur erkenne.

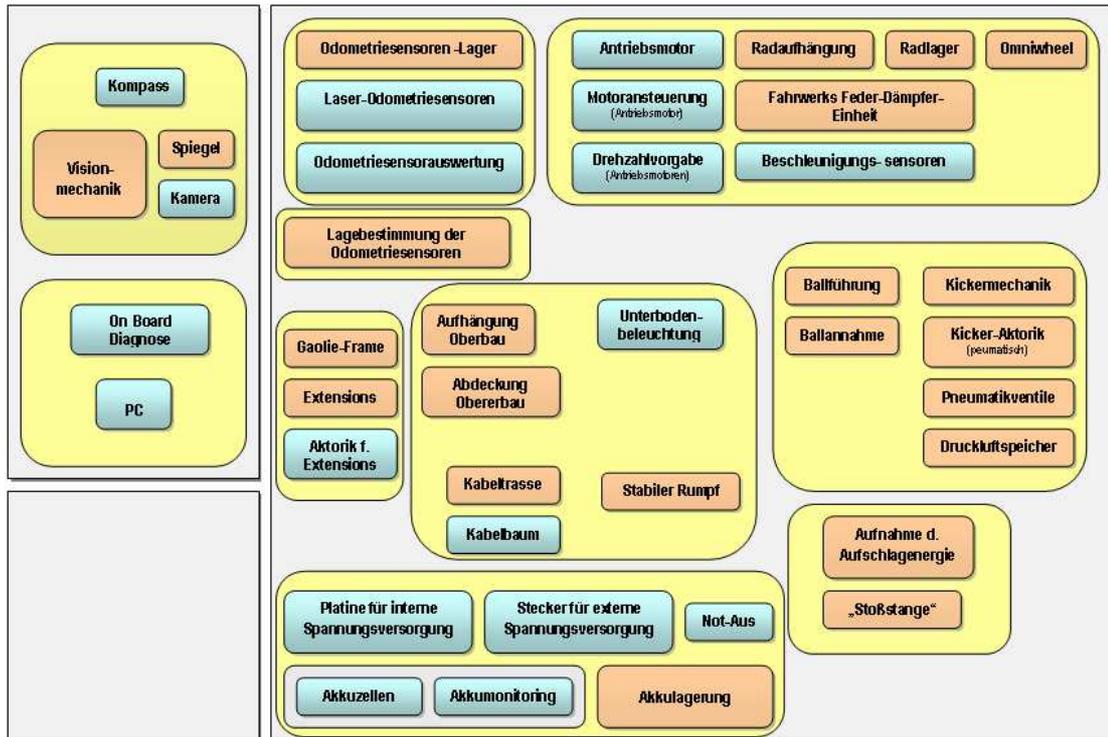


Abbildung 2. 12: Gruppierung der Funktionen am Roboter zu bestimmten Modulen

2.5.3. MODULARE ARCHITEKTUR

Nach Abschluss des zuvor beschriebenen Prozesses steht das Konzept des modularen Aufbaus für den Roboter fest. Es soll im Folgenden kurz vorgestellt werden.

Das Model Krikkit III besteht aus insgesamt zwölf (im Spezialfall des Torhüters aus dreizehn) Modulen zehn verschiedener Typen. Darüber hinaus bleibt die bewährte Aufteilung in Oberbau und Unterbau erhalten.

Im Oberbau finden sich *Kamera-* und *PC-Modul*. Diese beiden Baugruppen gemeinsam sind ausreichend, um die höheren Software-Funktionen wie Bilderkennung und Spielstrategie zu testen und zu verbessern.

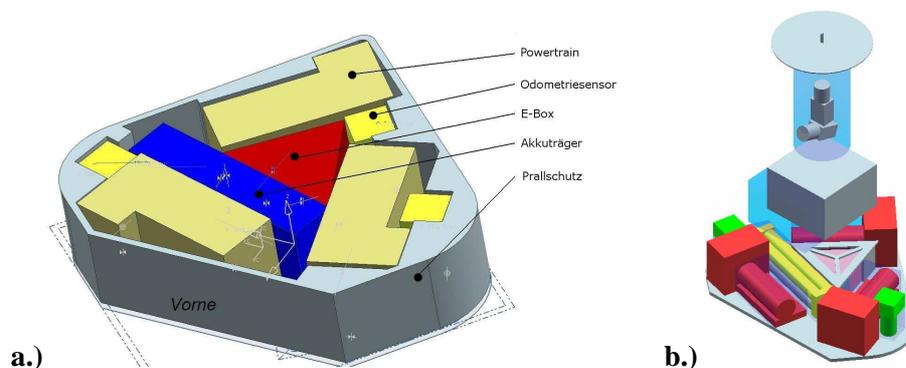


Abbildung 2. 13: Die Anordnung der Module in einem frühen (a) und fortgeschrittenen (b) Stadium

Der Unterbau beinhaltet neben dem **Frame**, also einer Rahmenkonstruktion, noch zahlreiche weitere Module. Hier ist natürlich das **Ballhandling-Modul** zu erwähnen, das die Führung des Balls und den Kick übernimmt. Außerdem werden gleich drei **Powertrain-Module**, jeweils inklusive Omniwheel und Motor, verbaut. Der **Prallschutz** soll die Wucht des Aufschlags bei einem Zusammenstoß mindern. Die beiden Hilfssensorfelder bieten Platz für je einen zweiachsige Laser-**Odomtriesensor** oder einen anderen Sensor, der für aktuelle Forschungsaufgaben gerade benötigt wird. Die Energieversorgung des gesamten Roboters wird vom **Akku-Modul** sichergestellt, unabhängig davon ob die Energie wirklich aus einem Akku oder von einer externen Spannungsquelle kommt. Alle Elektronikkomponenten, die nicht direkt auf den zuvor genannten Modulen Platz finden werden in der so genannten **E-Box** untergebracht.

Wie bereits erwähnt, wird der Torhüter mit einem zusätzlichen Modul, dem **Goalieframe** ausgestattet. Es hat die Aufgabe, einen möglichst großen Bereich des Tors zu abzudecken.

2.6. DIE KONSTRUKTION

Die bisher vorgestellten Arbeitsschritte decken im Großen und Ganzen die Bereiche der Vor- und Hauptstudie ab. Im Folgenden soll etwas näher auf die, im Rahmen der Detailstudien an den einzelnen Modulen entwickelten, Konstruktionen eingegangen werden.

2.6.1. FRAME

Der Rahmen stellt das Skelett des Roboters dar. Er bildet die Grundstruktur, auf der alle Module montiert sind. Darüber hinaus beherbergt er den Kabelbaum, der zu allen Baugruppen verläuft. Die Gestaltung dieses Moduls hat maßgeblichen Einfluss auf die Zugänglichkeit zu den verschiedenen Elementen. Bei der Entwicklung wurde weitestgehend der Weg gewählt, die funktionalen Einheiten wie Kicker oder Powertrain zu entwickeln und den Rahmen ihren Bedürfnissen anzupassen.

2.6.1.1. Grundgedanke und Aufgabe

Dem Rahmen kommt vor allem die Aufgabe zu, die Einbaulagen der einzelnen Baugruppen im Raum festzulegen. Die gewünschte Steifigkeit dieser Aufhängung variiert dabei von Modul zu Modul. Während die Lagerung des Prallschutzes sehr starr ausgeführt werden muss um sicherzustellen, dass das Kraft-Weg-Verhalten des Schilds vom Schockabsorber definiert wird (siehe Kapitel „2.6.5 Prallschutz“), ist eine weiche Aufhängung der Kamera vorteilhaft, um eine geringe Eigenfrequenz zu erreichen.

Die Gestaltung des Rahmens ist außerdem ein wichtiger Faktor bei Fragen der Zugänglichkeit zu tiefer im Inneren des Roboters verborgenen Baugruppen. Hier sei auf die Zweitaufgabe der Plattform verwiesen. In der Funktion als Forschungsplattform wird es des Öfteren nötig sein, Zugang zu innen liegenden Einheiten zu ermöglichen. Es muss also ein Kompromiss zwischen stabiler Bauweise und guter Wartbarkeit gefunden werden.

2.6.1.2. Variantenkonstruktion

Bricht man die Aufgabe der Baugruppe auf einen elementaren Ansatz herunter, so geht es darum, eine mechanische Verbindung variabler Steifigkeit zwischen den Anschlusspunkten der einzelnen Module zu schaffen. Dieser Aufgabe kann mit verschiedenen Ansätzen erreicht werden.

Strebenbauweise

Bei einer Strebenkonstruktion, wie beispielsweise im Kranbau üblich, werden die markanten Punkte der Konstruktion, in diesem Fall die Anschlusspunkte der Module, über Balken und Stab direkt verbunden. Eine entsprechende Prinzipskizze findet sich in Abbildung 2.14.a.).

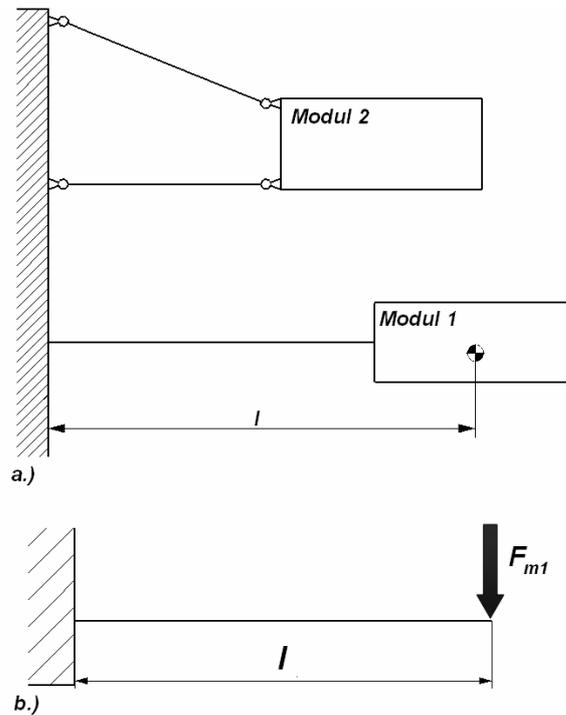


Abbildung 2. 14: Prinzipskizze der Strebenbauweise

Greift man den Balken, der zu Modul 1 führt, exemplarisch heraus, wie das in Abbildung 2.14b gezeigt ist, so lässt sich dessen Verformung zufolge Querkraft F_{m1} über die Differentialgleichung der Biegelinie¹⁴ beschreiben.

$$f := \frac{F_{m1} \cdot l^3}{3 \cdot E \cdot I} \quad \text{Gl. 2.1}$$

Wie sich zeigt, steht hier eine ganze Reihe an beeinflussbaren Variablen zur Verfügung. Durch Wahl verschiedener Werkstoffe kann beispielsweise Einfluss auf den E-Modul genommen werden. Es sei hier aber erwähnt, dass oftmals höherfeste Werkstoffe auch eine höhere Dichte aufweisen, was in Summe zu einem höheren Gewicht führen kann. Abbildung 2.15 zeigt einen Vergleich der Durchbiegungen geometrisch identer Stäbe bei Verwendung verschiedener Materialien, bezogen

¹⁴ Quelle[Dub 1997] SC-20, Tabelle 5a

auf die Durchbiegung von Stahl. Das Ergebnis ist wenig überraschend: Stahl zeigt aufgrund seines hohen E-Moduls die geringste Durchbiegung, gefolgt von Kohlefaserverbund (CFK), Aluminium und Glasfaserverbund (GFK).

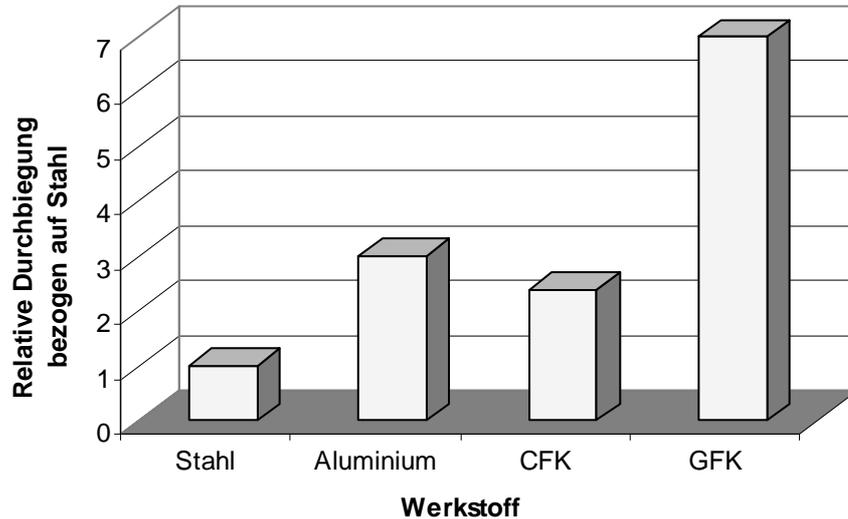


Abbildung 2. 15: Vergleich der elastischen Verformungen verschiedener Werkstoffe¹⁵

Diese Aussage ist allerdings nur dann relevant, wenn geometrische Zwänge die Ausdehnung der Verbindungselemente begrenzen. Ansonsten ist eher das Gewicht als begrenzender Faktor zu nennen. Abbildung 2.16 vergleicht die Masse von Stäben mit kreisrundem Querschnitt, deren Durchmesser jeweils so gewählt ist, dass sie zufolge derselben Kraft dieselbe Durchbiegung erfahren.

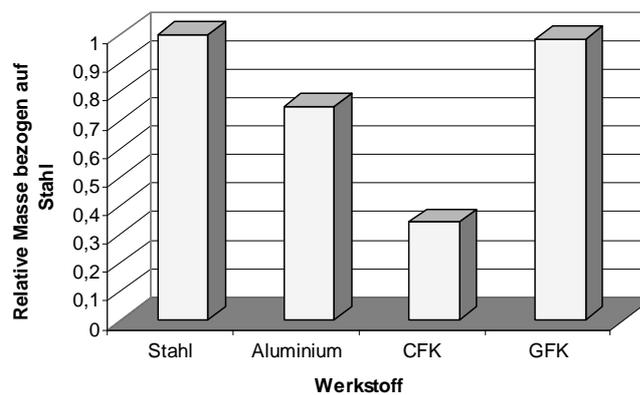


Abbildung 2. 16: Vergleich der Massen von Biegestäben gleicher Steifigkeit¹⁶

¹⁵ Werkstoffkennwerte aus [Mil 2009] S. 168

¹⁶ Werkstoffkennwerte aus [Mil 2009] S. 168

Erst hier offenbaren sich die Vorzüge von CFK und Aluminium, die bei gleicher Steifigkeit deutlich leichter bauen als eine vergleichbare Stahlkonstruktion.

Ein weiterer Parameter ist die Wahl des Balkenquerschnitts, der das Flächenträgheitsmoment I beeinflusst. Dieses wird allgemein beschrieben durch:

$$I_x := \int y^2 dA$$

Gl.2.2

wobei y den Normalabstand zur Bezugsachse und A die Querschnittsfläche beschreibt. Hier zeigt sich, dass der Abstand y mit der zweiten Potenz eingeht. Abbildung 2.17 vergleicht die Trägheitsmomente von Stabquerschnitten gleicher Querschnittsfläche. Auch hier besteht bei einer Strebenkonstruktion völlige Gestaltungsfreiheit.

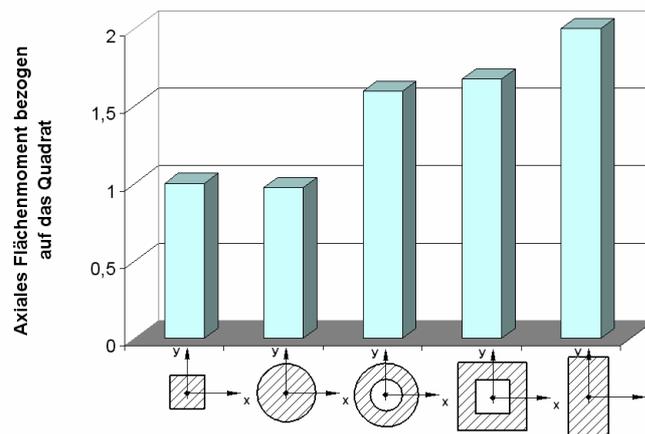


Abbildung 2. 17: Vergleich der Flächenmomente verschiedener Balkenquerschnitte¹⁷

Es zeigt sich also, dass durch entsprechende Wahl des Strebenquerschnitts und Materials das Potenzial zu einer nennenswerten Gewichtsersparnis besteht.

Eine Spezialform der Strebenbauweise sind Fachwerke, bei denen nur Stäbe zum Einsatz kommen, die an beiden Enden gelenkig angebunden sind. Auf diesem Wege können statische Überbestimmtheit und daraus resultierende innere Spannungen weitestgehend vermieden werden. In realen Systemen weisen Gelenke ein oft nicht zu vernachlässigendes Gelenkspiel auf, dessen Folgen auf die Stabilität des Systems berücksichtigt werden müssen.

¹⁷ Flächenträgheitsmomente aus [Bög 1999] S. 383 Tafel II.1

Plattenbauweise

Die Plattenbauweise zeichnet sich durch eine massive Grundplatte aus, auf der die Module angebracht werden. Der Kraftfluss verläuft durch diese Platte, weshalb sie ausreichend steif gestaltet werden muss, um der höchsten denkbaren Belastung stand zu halten. Besonders das Thema Biegesteifigkeit ist hier problematisch. Abstrahiert man die Platte als ebenen Balken, der auf zwei Lagerstellen, den Rädern, aufliegt, wird die Durchbiegung beschrieben als:

$$f := \frac{F \cdot l^3}{48 \cdot E \cdot I} \quad \text{Gl. 2.3}$$

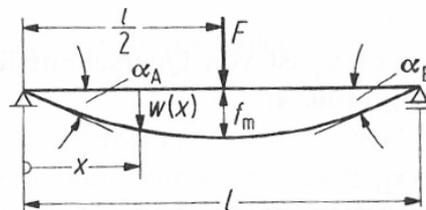


Abbildung 2. 18: Ersatzmodell der Grundplatte als Balken¹⁸

Der Radabstand **l** wird seitens der gewünschten Fahrdynamik vorgegeben und die äußere Kraft **F** ist ohnehin nicht zu beeinflussen. So bleiben als Freiheitsgrade nur noch der E-Modul des Werkstoffs und das Flächenträgheitsmoment **I**. Geht man von einem quadratischen Querschnitt aus, ergibt sich **I** wie folgt:

$$I_x := \frac{b \cdot h^3}{12} \quad \text{Gl.2.4}$$

Da **h** aber vergleichsweise klein ist, präsentiert sich ein derartiger Aufbau als eher weich. Abhilfe würde ein Aufbau schaffen, der nicht nur aus einer, sondern aus mehreren Schichten besteht. Unterstellt man einen symmetrischen Querschnitt, wie in Abbildung 2.19 gezeigt, ergibt sich das Flächenträgheitsmoment in Summe zu:

$$I_{x2} := 2 \cdot \left(\frac{b \cdot h^3}{12} + b \cdot h \cdot s^2 \right) \quad \text{Gl. 2.5}$$

¹⁸ Quelle[Dub 1997] SC-20, Tabelle 5a

¹⁹ Vgl. [Bög 1999]

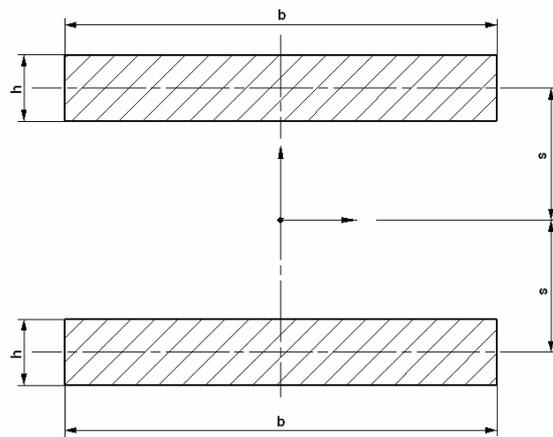


Abbildung 2. 19: Approximierter Querschnitt einer zweischichtigen Struktur

Die Zugänglichkeit zum Roboterinneren ist durch die Grundplatte, die zumindest eine Zugriffsrichtung weitestgehend blockiert, eingeschränkt. Ausnahmen in der Grundplatte, um diesem Hindernis entgegenzuwirken, sind gegen festigkeitstechnische Überlegungen abzuwägen. Der größte Vorteil der Plattenbauweise im Vergleich zur Strebenbauweise stellt der zu erwartende, geringere Aufwand in Auslegung und Fertigung dar. Darüber hinaus kann er an wechselnde Anschlusspunkte im Allgemeinen leichter angepasst werden, da diese konstruktiv meist als leicht zu ersetzende Bohrungen ausgeführt sind.

Rahmenloser Aufbau

Der Ansatz des rahmenlosen Aufbaus stellt das Frame-Modul an sich in Frage. Grundsätzlich wäre es denkbar, ein Modulsystem so zu gestalten, dass jedes Modul direkt ans nächste angebunden ist. Was die Vernetzung der Module angeht, zeigt sich, dass die Kopplung der Module untereinander durch diese Maßnahme erhöht. Andererseits kann auf diese Art auf den ausgesprochen stark gekoppelten Rahmen verzichtet werde.

Nachdem der Roboter neben funktionalen Baugruppen immer noch eine, mechanische Struktur benötigt, muss diese in die einzelnen Module ausgelagert werden. Es ist also eine Aufteilung in strukturell tragende, also solche, die ein Bestandteil des strukturellen Aufbaus des Roboters sind, und strukturell nicht tragende Komponenten, sinnvoll. Strukturell tragende Module sind dabei unverzichtbar, um einen kompletten Roboter zu besitzen.

Mit Blick auf die modulare Struktur negativ zu nennen ist vor allem die Tatsache, dass eine Aufgabe, nämlich die räumliche Fixierung der Module untereinander auf eine größere Anzahl von Modulen aufgeteilt wird. Somit entsteht eine zusätzliche Kopplung.

2.6.1.3. Konstruktive Lösung

Die Anordnung der funktionalen Module sowie die Forderung nach einer Trennung von Oberbau und Unterbau führen zu einem Aufbau des Rahmens in vier Schichten, in denen alle zuvor angeführten Prinzipien zum Einsatz kommen.

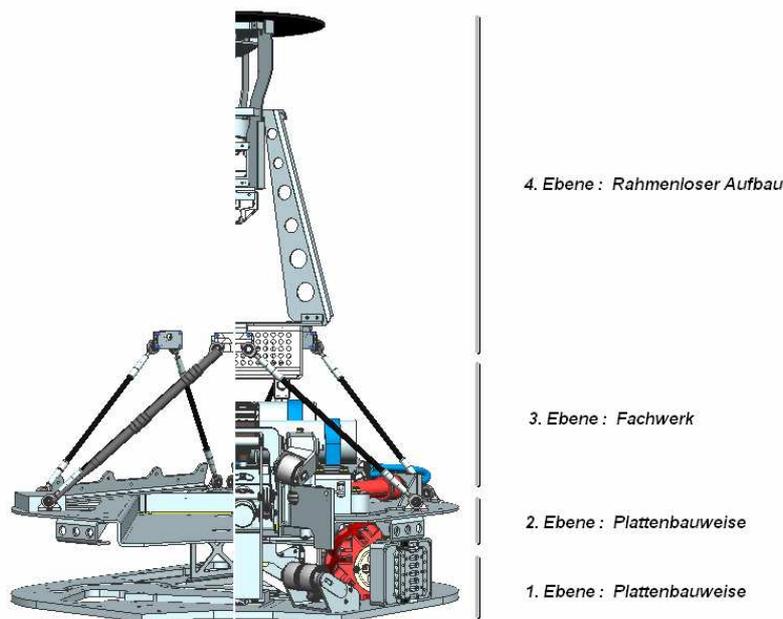


Abbildung 2. 20: Aufbau des Rahmens

Die Grundlage des Fahrwerks stellt eine massive Aluminiumplatte dar. Sie ist, vor allem in Kombination mit der zweiten Ebene, ausreichend steif um trotz zahlreicher Ausnehmungen die Lage der befestigten Module auch bei den höchsten auftretenden Belastungen zu garantieren. Außerdem ist sie mit 10 mm ausreichend dick, um Module direkt in die Grundplatte zu verschrauben. Sollten sich diese Anschlusspunkte im Lauf der Prototypenentwicklung oder Verwendung ändern, so können ohne großen Aufwand neue Bohrungen an den gewünschten Positionen angefertigt werden. Eine lang diskutierte Alternative wäre hier eine Stahlplatte. Sie würde (laut den Gleichungen 2.1 und 2.3) schon bei einer Stärke von 7mm die gleiche Steifigkeit aufweisen. Auch das höhere Gewicht dieser Bauart wäre bei einem derart tief gelegenen Element akzeptabel. Als problematisch könnte sich die elektrogalvanische Korrosion zwischen Aluminium und Stahl erweisen. Da nicht geklärt werden konnte, wie schlagend diese Problem unter den im RoboCup üblichen Bedingungen wirklich ist, wurde entschieden, bei einem derart zentralen Element wie der Grundplatte kein Risiko einzugehen.

Über dieser ersten Ebene findet man eine zweite Schicht in Plattenbauweise. Die dort verwendete Grundplatte ist weitaus dünner. Sie ist lediglich für die Aufnahme des Service-Moduls bzw. des Kickers gedacht. Die dritte Ebene stellt die Verbindung zwischen Fahrwerk (Unterbau) und PC-Träger (Oberbau) her. Da der Kicker den größten Teil der Grundplatte in der zweiten Ebene abdeckt, ist eine Lösung mit geringem Platzbedarf gefragt. Dazu kommen die große zu überbrückende Höhe und der hoch liegende Einbauort. Massenansammlungen in dieser Höhe verlagern den Schwerpunkt der gesamten Plattform stark nach oben, was sich äußerst nachteilig auf die Fahrdynamik auswirkt. Aus diesem Grund ist hier auch eine möglichst leichte Bauform gefragt. Die Wahl ist dabei auf eine Fachwerkskonstruktion gefallen. Die so genannte Steward-Gough-Plattform (vgl. [GfS 2008]) besteht aus insgesamt sechs Stäben. Dadurch ist die Lage des PC-Trägers im Raum eindeutig definiert. Zu Justierzwecken kann die Länge eines jeden einzelnen Stabs unabhängig von den anderen verstellt werden. Durch die parallele Kinematik können so die Lage und Orientierung des PCs jederzeit angepasst werden. Als Material kommt ein Kohlefaserverbund zum Einsatz. Wie in Abbildung 2.16 zu sehen ist, zeigt dieses Material ein ausgezeichnetes Verhältnis von Steifigkeit zu Gewicht. Eine steife Aufhängung ist aber kein uneingeschränktes Ziel.

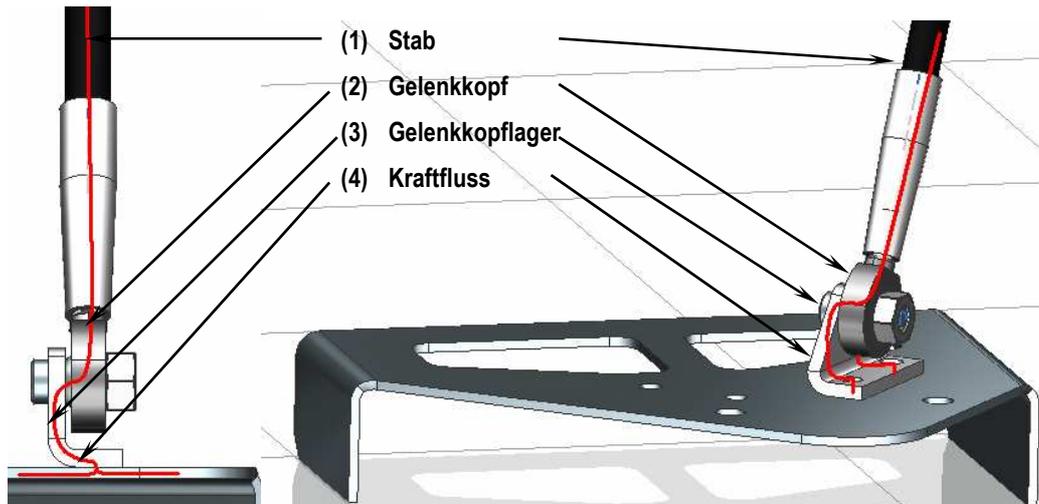


Abbildung 2. 21.: Kraftfluss in der Anlenkung eines Stabes der Stewart-Gough-Plattform

Greift man die Anlenkung der einzelnen Stäbe (1), wie sie in Abbildung 2.21 gezeigt wird, heraus so sieht man, dass die Stäbe an deren unterem Ende mit Gelenkköpfen (2) versehen sind, die in den Gelenkkopflagern montiert sind. Auf diese Weise sind die Freiheitsgrade garantiert, die von der Kinematik der Plattform gefordert werden. Verfolgt man den Kraftfluss (4), so erkennt man, dass dieser im Bereich der Lagerung eine große Umlenkung erfährt. Das Gelenkkopflager (3) ist bewusst weich gestaltet und wirkt als eine Art Feder, deren Federsteifigkeit über die genaue Geometrie der Lager modelliert werden kann. Durch Modifikation dieser fertigungstechnisch einfachen Teile könnte in einem Folgeprojekt das Schwingverhalten des Oberbaus in allen sechs Freiheitsgraden separat eingestellt werden.

Im obersten Sektor befinden sich PC und Kamera. Da zur Weiterentwicklung der Software meist beide Module nötig sind, besteht hier eine durch äußere Gegebenheiten bedingte hohe Kopplung. Eine zusätzliche Vernetzung der beiden durch einen rahmenlosen Aufbau in dieser Schicht fällt daher nicht mehr stark ins Gewicht. Der Vorteil, den Rahmen nicht künstlich bis zum Vision-Modul zu verlängern zu müssen, überwiegt.

2.6.2. VISION

Das Omnivision-System, also die Kombination aus Kamera (2) und konvexem Spiegel (1), ermöglicht einen 360° Blick rund um den Roboter. Da eine digitale Kamera immer über eine begrenzte Anzahl an Bildpunkten verfügt, geht ein derartig weites Sichtfeld immer auf Kosten der Auflösung. Je weiter Objekte vom Roboter entfernt sind, desto schwieriger ist es, sie präzise zu erkennen. Abgesehen davon sind auf Grund der Spiegelgeometrie Objekte in einer Höhe von mehr als 800 mm außerhalb des Blickfelds. Dieser Nachteil macht vor allem hohe Schüsse zu einem gefährlichen Strategieelement.

Essenziell für ein klares Bild ist hier ein definierter und stabiler Abstand zwischen Kamera und Spiegel. Darüber hinaus ist die gesamte Baugruppe so gut wie möglich vor hochfrequenten Vibrationen zu schützen, da diese die Bildqualität beeinträchtigen.

Neben der Omnicam ist das Modul mit einer zweiten Kamera (3) bestückt. Diese ist nach vorne gerichtet. Sie kann auch hoch fliegende und weiter entfernte Objekte in ihrem Blickfeld zuverlässig erkennen.

Grundlegende Theorie und Auslegung dieses Moduls findet sich in der Projektarbeit [Tho 2011]. Wie bereits in Kapitel „2.6.1 Frame“ ausgeführt, verfügt das Modul über eine direkte Anbindung zum PC-Modul (4) .

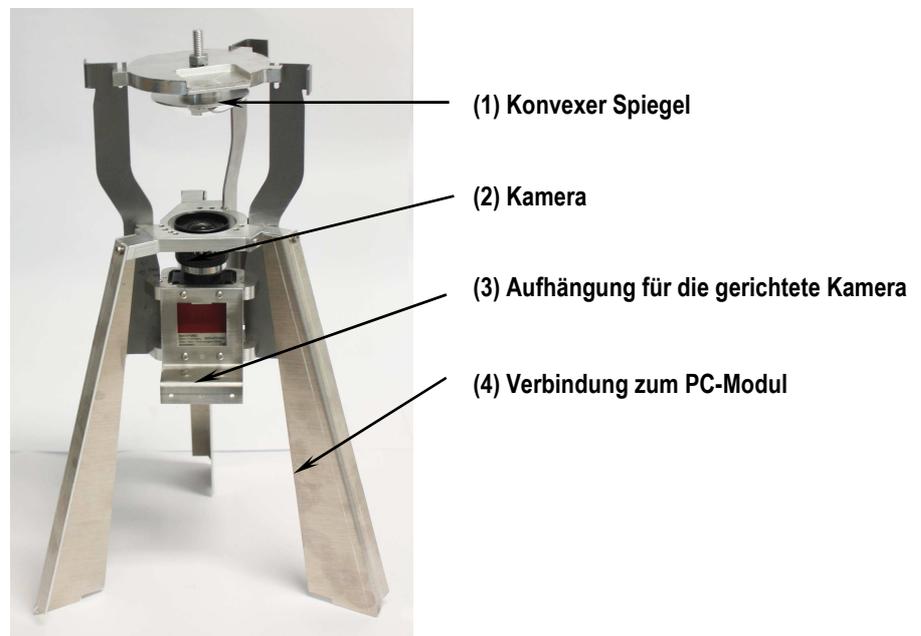


Abbildung 2. 22: Das Vision-Modul

2.6.3. POWERTRAIN

Das Powertrain-Modul beinhaltet den gesamten Antriebsstrang, vom Motor bis zum Omniwheel. Außerdem ist es der Sitz der Motoransteuerung. Als Schnittstellen zum Rest des Roboters sind so nur noch die mechanische Anbindung, sowie die Energieversorgung und der CAN- Bus zu nennen.

2.6.3.1. Ausgangssituation

Das Modul wurde im Laufe der Entwicklungsphase ausgegliedert und in Form eines eigenen Projekts bearbeitet [Rat 2011] Ergebnis dieser Arbeit ist das Modul, wie es in Abbildung 2.23 zu sehen ist.

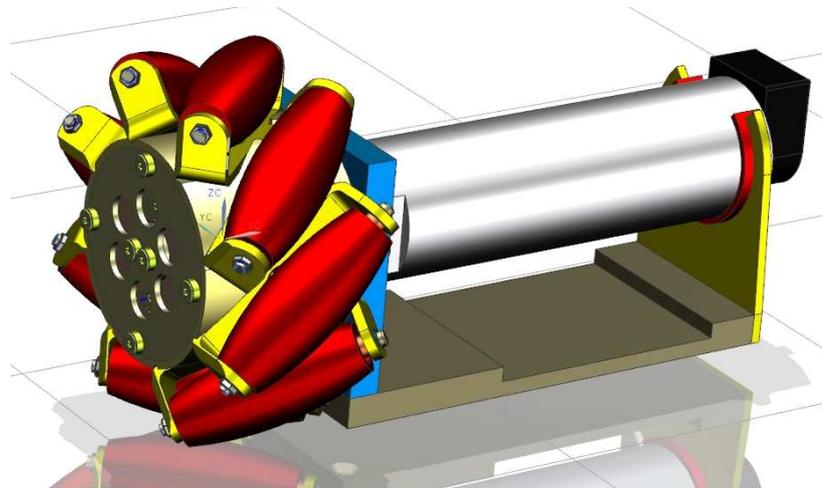


Abbildung 2. 23: CAD-Modell des Powertrain Moduls, wie es im Projekt [Rat 2011] beschreiben wird²⁰

Während der Weiterentwicklung wurden hier zwei Verbesserungspotenziale entdeckt. Zum Ersten wird in derselben Quelle eine weitere Bauform des Omniwheels dargestellt. Dieses besitzt einen Grundkörper, der aus nur einem Teil besteht. Aus fertigungstechnischen Überlegungen wird diese technisch deutlich leistungsfähigere Variante aber verworfen. Eine genauere Analyse der verfügbaren Fertigungskapazitäten ergab jedoch, dass die Herstellung einer derartigen Konstruktion sowohl technisch als auch finanziell tragbar wäre. Aus diesem Grund ist das später verbaute Modul mit einem Omniwheel nach Abbildung 2.24 ausgerüstet.

²⁰ Quelle [Rat 2011]

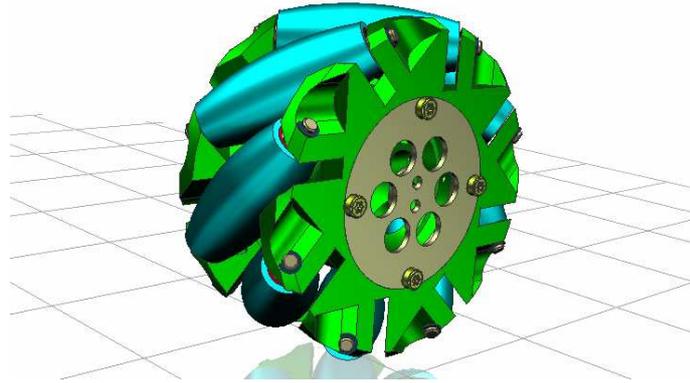


Abbildung 2. 24: CAD- Modell des verbauten Mecanum-Wheels²¹

Darüber hinaus wurden, parallel zur Abwicklung des Projekts, Schwingungsmessungen am Fahrwerk des Krikkit II durchgeführt (siehe Kapitel „3.4 Das Fahrwerk“). Diese zeigen eine deutliche Schwingungsanregung durch die Räder, deren Auswirkungen aufgrund des steifen Aufbaus im gesamten Roboter messbar sind. Um dem zu begegnen, ist eine Einzerradaufhängung zwingend nötig. Da zum Zeitpunkt dieser Erkenntnis das Roboterkonzept schon festgelegt und benachbarte Module bereits in der Phase der Haupt- und Detailstudie waren, musste der gegebene Bauraum unter allen Umständen eingehalten werden. Außerdem war es wegen des engen Zeitplans wünschenswert, den größten Teil der im Projekt „Powertrain“ erarbeiteten Konstruktion beizubehalten.

2.6.3.2. Auslegungsgrundlagen

Die in Kapitel „3.3.3. Das reale Mecanum Wheel“ ersichtliche Vermessung des Rundlaufs eines Mecanum-Wheels des Vorgängermodells legt die Vermutung nahe, dass ein Federweg des Rades von weniger als **+1 mm** völlig ausreichend ist.

Die Radaufstandskräfte bewegen sich dabei je nach Beschleunigungssituation zwischen **100 N** und **150 N**. Es ist daher wünschenswert, dass es bei einer derartigen Schwankung der Kraft zu keinen nennenswerten Verfahrwegen in der Aufhängung kommt.

²¹ Quelle [Rat 2011]

Diese Forderungen könnten aufgrund des nachträglichen Einbaus problematisch werden, denn der Bauraum des Moduls ist im Vergleich zu seiner Länge in der Höhe eher gedrunken. Außerdem ist in der näheren Umgebung des Rades, das als Krafterleitung fungiert, kaum Platz vorhanden.

Parallelkinematik

Eine Parallelkinematik basiert in erster Linie auf einem Gelenkviereck wie es in Abbildung 2.26 zu sehen ist, bei dem die jeweils gegenüberliegenden Elemente, gleich lang sind. Hält man eine Kante fest, bewegt sich die gegenüberliegende auf einer Kreisbahn, behält jedoch ihre Ausrichtung, parallel zum stehenden Element bei. Ähnliche Mechanismen werden seit langem bei Einzerradaufhängungen für PKW eingesetzt. Der Unterschied im KFZ-Bau ist, dass das Gelenkviereck hier kein Parallelogramm ist.

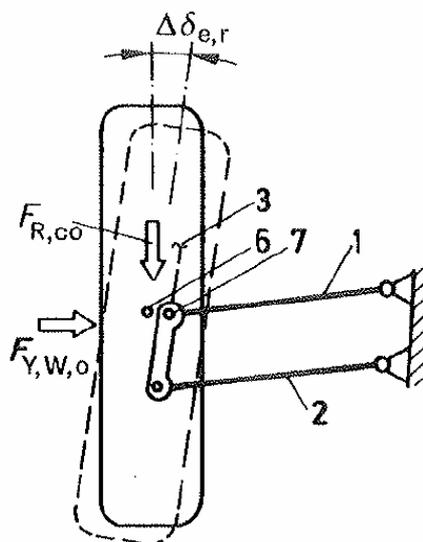


Abbildung 2. 26 Einzerradaufhängung mit Parallelkinematik²⁴

Sorgt man dafür, dass die beiden Stäbe 1 und 2 im Vergleich zu den anderen beiden Elementen hinreichend lang sind, so kann die Bahn des Rades bei kleinen Winkeln mit guter Näherung als vertikale Translation approximiert werden. Auch der voraussichtliche Platzbedarf deckt sich gut mit dem noch freien Bauraum.

Der Ansatz zeigt jedoch auch eine Schwachstelle. Das ebene Ersatzsystem beinhaltet vier, die reale Konstruktion wohl eher acht Drehgelenke. In der Praxis stellt jedes von ihnen eine Lockerstelle dar, die das Schwingverhalten auf kaum vorhersehbare Weise beeinflusst. Abhilfe würde an dieser Stelle der Einsatz spielfreier Festkörpergelenke, entsprechend Abbildung 2.27, schaffen.

²⁴ Quelle [RB 2000] S. 212, Abbildung 3.80

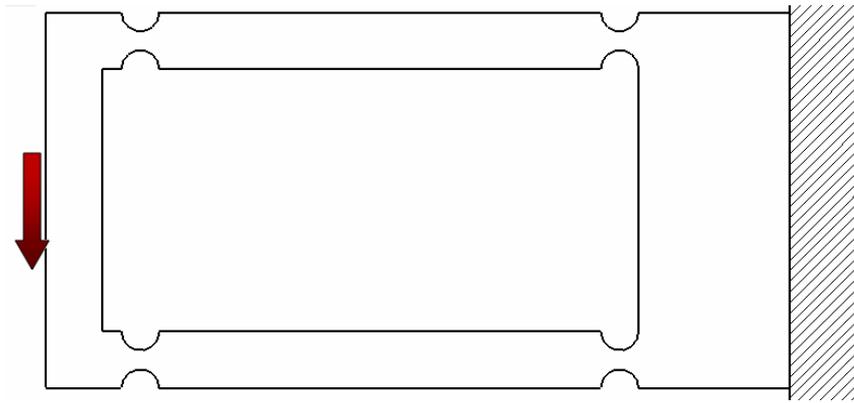


Abbildung 2. 27: Parallelkineamtk auf der Basis von Festkörpergelenken

Die vier bewussten Querschnittsverengungen fungieren dabei durch ihre reduzierte Biegesteifigkeit als Gelenke, da jedoch keine beweglichen Teile verwendet werden, entsteht kein Lagerspiel. Darüber hinaus wirken die Einkerbungen aufgrund ihrer natürlichen Elastizität auch als Drehfedern. Der Fertigungsaufwand einer solchen Lösung ist ebenfalls dramatisch geringer.

Die Herausforderung liegt hier in der Auslegung der Querschnittsverengungen. Sie müssen so gestaltet sein, dass sich in Summe die gewünschte Federsteifigkeit einstellt, sie aber auch bei Dauerbelastung nicht versagen.

Schwinge

Die Schwinge bedeutet eine weitere Vereinfachung der Anforderungen. Ähnlich der Parallelkinematik wird auch hier die Translation durch eine Rotation mit großem Radius approximiert. Entgegen dem vorherigen Ansatz wird dabei die Radachse nicht parallel zum Boden gehalten, sondern steht stets radial auf die Bahnkurve. Dieser Umstand ist bei normalen Rädern nicht optimal, bei Omniwheels aber unter Umständen noch weitaus schädlicher. Es ist daher unbedingt darauf zu achten, dass nur kleine Winkel überstrichen werden. Für den Aufbau spricht vor allem der geringe konstruktive Aufwand. Das ebene Ersatzschaltbild kommt mit nur einem Drehgelenk aus.

Auch für diesen Ansatz gibt es ein Pendant in der Fahrzeugtechnik. Sogenannte Eingelenkpendelachsen, wie in Abbildung 2.28 gezeigt, werden heute nur noch in der Nutzfahrzeugtechnik eingesetzt. Auch hier erweist sich die Schrägstellung der Radachse als nachteilig.

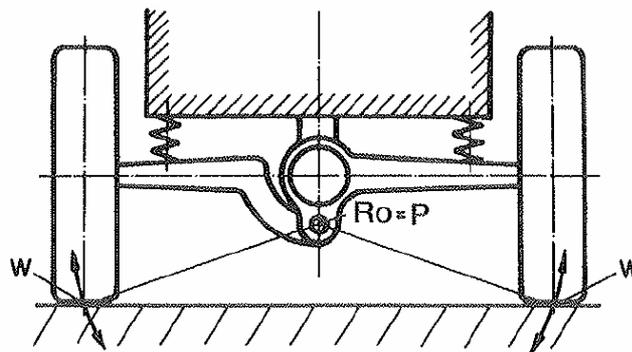


Abbildung 2. 28: Eingelenkpendelachse²⁵

²⁵ Quelle [RB 2000] S. 182, Abbildung 3.35

2.6.3.4. Konstruktion

Abgesehen von der Radaufhängung ist die in der Arbeit [Rat 2011] entwickelte Konstruktion in den wesentlichen Zügen übernommen worden. Für die Aufhängung selbst wurde, in erster Linie aufgrund des einfachen Aufbaus, der sich im bestehenden Bauraum gut unterbringen lässt, eine Schwingenbauweise gewählt.

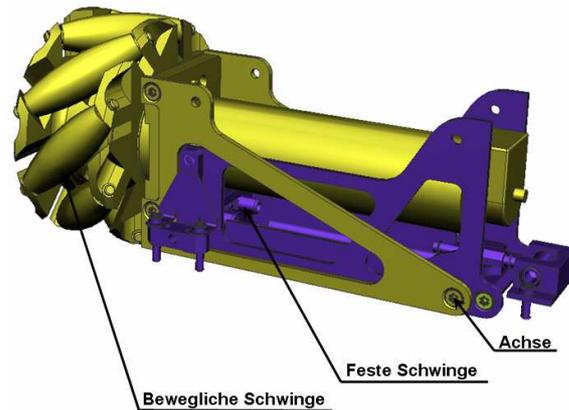


Abbildung 2. 29: CAD des Krikkit III Powertrain Moduls

Abbildung 2.29 zeigt die gewählte Konstruktion. Über die Achse im hinteren Teil des Moduls sind bewegliche und feste Schwinge miteinander verbunden. Der in blau gehaltene Teil ist fest mit dem Rahmen verbunden, während die bewegliche Schwinge den Unebenheiten in Boden und Omniwheel folgen kann. Die Relativbewegung der beiden Strukturen zueinander wird durch die beiden Längsstabilisatoren, die parallel zum Motor liegen, teilweise behindert.

Da Auslegung und Test der verschiedenen möglichen Bauarten dieses Elements im Umfang des hier beschriebenen Projekts keinen Platz mehr finden, wurden Anschlusspunkte und Bauräume so gestaltet, dass verschiedenste Lösungen verbaut werden können.

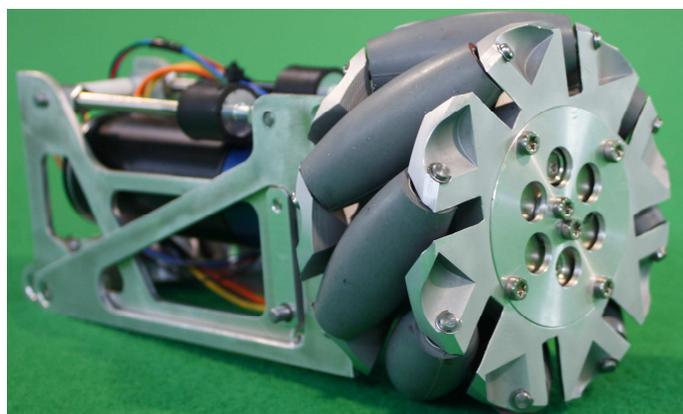


Abbildung 2. 30: Das Powertrainmodul

2.6.3.5. Bewertung und Analyse

Aufgrund der großen Anzahl an Funktionen, die hier auf engstem Raum untergebracht werden müssen, war von Anfang an Montier- und Demontierbarkeit eine der großen Unbekannten. Wie sich jedoch in einigen, teils unfreiwilligen, Versuchen zeigte, lässt sich die Baugruppe ohne große Schwierigkeiten zusammensetzen und im Anschluss auch, soweit für Wartungszwecke nötig, wieder zerlegen.

Eine detaillierte Analyse der ausführlichen Leistungstests am Modul findet sich in Kapitel „3. Das Fahrwerk“.

2.6.4. SERVICEMODUL: BALLHANDLING²⁶

Das zentrale Modul des Roboters ist das Service-Modul, als jener Teil der die Werkzeuge für die Ausführung der eigentlichen Aufgabe besitzt. Im Fall des fußballspielenden Roboters ist dies das in Abbildung 2.31 gezeigte Ballhandlingmodul. Es beinhaltet die nötige Aktorik, Mechanik und Elektronik für Ballannahme, Ballführung und Schuss.

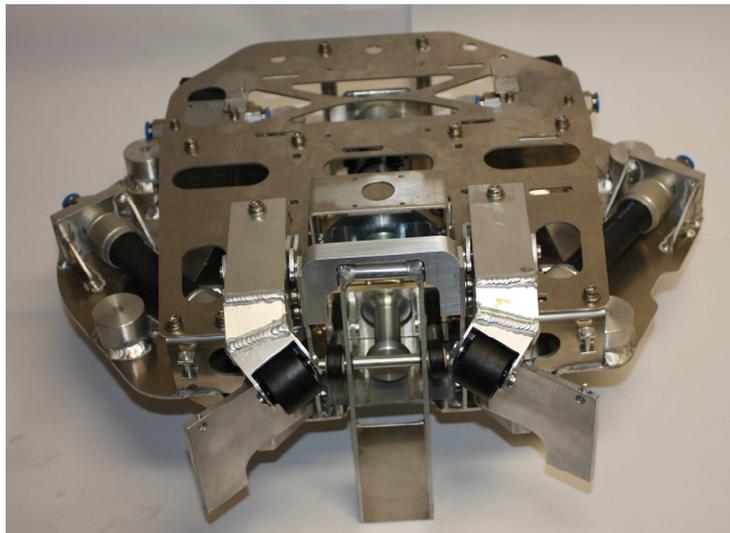


Abbildung 2. 31: Der Kicker

Beim Entwurf des Moduls wurde in besonderem Maße Wert darauf gelegt, klare Schnittstellen und eine geringe Kopplung zu erreichen, denn von allen Modulen am Roboter ist hier die Wahrscheinlichkeit am größten, dass es durch ein grundsätzlich andersartiges ersetzt wird.

Eine detaillierte Beschreibung von Entwicklung und Konstruktion des Krikkit III Ballhandlingmoduls findet sich in der Diplomarbeit [Kol 2011].

²⁶ Vgl. [Kol 2011]

2.6.5. PRALLSCHUTZ

Das Spielfeld der RoboCup-MSL kann eine ausgesprochen raue Umgebung für ein sensibles mechanisches oder elektrisches System sein. Kollisionen zwischen Robotern mit hohen Geschwindigkeiten stehen an der Tagesordnung.

Um die Auswirkung dieser Effekte auf die empfindlichen Systeme im Inneren des Roboters so gering wie möglich zu halten, ist er im Bereich des Fahrwerks mit einer schützenden Abschirmung, dem Prallschutz, umgeben.

2.6.5.1. Grundgedanke und Aufgabe

Obgleich das Leitsystem mit Hilfe der „Obstacle Avoidance“ seitens der Software versuchen sollte, Zusammenstöße zu vermeiden, geschehen diese doch regelmäßig. Neben softwareseitigen Fehlberechnungen und unvorhersehbaren Manövern gegnerischer Roboter, sind es vor allem spieltaktische Überlegungen, die durchwegs heftige Berührungen zwischen Robotern provozieren. Erschwerend kommt hinzu, dass der Aufprallschutz funktionsbedingt an Orten montiert werden muss, die auch für andere Module von Interesse sind. Dementsprechend eng bemessen ist der zur Verfügung stehende Bauraum.

Dem Prallschutz als Baugruppe kommen dabei zwei abgegrenzte Aufgaben zu. Zuerst muss das Eindringen roboterfremder Körper in das Innere des Roboters verhindert werden. Es ist aus Platz- und Gewichtsgründen nicht machbar, jede Komponente und jedes Modul schadensresistent zu gestalten. Stattdessen kommt es zu einer Aufgabentrennung: Es wird ein innerer Bereich geformt, der durch das Schild des Prallschutzes abgeschirmt wird, was zur Folge hat, dass die dort angesiedelten Baugruppen nicht für einen direkten Zusammenstoß ausgelegt werden müssen.

Davon unabhängig erfährt die Plattform bei jedem Zusammenstoß eine Beschleunigungsspitze \mathbf{a} , der in erster Näherung jedes Modul ausgesetzt ist, in Abhängigkeit von dessen Masse \mathbf{m} , nach dem Newtonschen Axiom eine Massenkraft F :

$$F := m \cdot a \qquad \text{Gl. 2.7}$$

Die Aufgabe eines zweiten Elements, des Schockabsorbers besteht darin, die auftretende Beschleunigung während des Abbremsvorgangs gering zu halten.

2.6.5.2. Auslegungsgrundlagen

Gesicherte Lastkollektive und Anforderungsprofile für eine derartige Auslegung sind schwer zu generieren. Die maximal auftretenden Kräfte hängen beispielsweise von der Entwicklung der Massen und Geschwindigkeiten der Roboter in der MSL, sowie vom Verlauf der Regelanpassungen über die kommenden fünf Jahre ab. Die erforderlichen Lastspielzahlen sind eine Funktion der zukünftigen Spieldynamik, aber auch der Entwicklung der gesamten Liga, denn mehr Teams bedeuten mehr Spiel, was unweigerlich zu mehr Zusammenstößen führen würde. Hochrechnungen schwanken hier zwischen 250 und 2500 schweren Einschlägen. Nichtsdestotrotz ist es nötig, ein Szenario zu wählen, aus dem heraus Lastannahmen generiert werden können:

Es wird, entsprechend dem Reglement der RoboCup MLS vom Jahr 2011²⁷, von einem Roboter mit einer Gesamtmasse von $m = 40 \text{ kg}$ ausgegangen. Diese Masse bewegt sich mit einer Geschwindigkeit von $v = 2 \text{ m/s}$, einem Maß, dessen Erreichen in den nächsten Jahren realistisch ist. Entsprechend der Formel für die kinetischen Energie E_{kin} :

$$E_{\text{kin}} := \frac{m \cdot v^2}{2} \quad \text{Gl. 2.8}$$

Besitzt die Plattform damit eine kinetische Energie von 80 J, die im Falle einer Kollision mit einem zweiten Roboter gleicher Bauform, Masse und Schwerpunktlage aber antiparallelen Geschwindigkeitsvektors komplett abzubauen ist. Als Verformungsweg steht hier nur die Deformation des Prallschutzes am Roboter zur Verfügung. Aus platztechnischen Erwägungen wird diese Knautsch-Zone auf 10 mm beschränkt.

Bei fünf Jahren prognostizierte Nutzungsdauer und einem Turnier mit ca. 10 Spielen pro Jahr ergibt sich eine geforderte Lebensdauer von 50 Spielen. Qualitative Beobachtungen der Spielweise anderer Mannschaften zufolge muss durchschnittlich in jedem Spiel mit drei derartigen Aufschlägen gerechnet werden. Dazu kommen ca. zehn Aufschläge halber Last. Zusammengefasst ergibt sich so ein Lastkollektiv wie in Abbildung 2.32 dargestellt. Da die auftretenden Kräfte von der Wirkungsweise des Schockabsorbers abhängen, beinhaltet das Kollektiv die aufzunehmende kinetische Energie.

²⁷ Vgl. [RCF 2011]

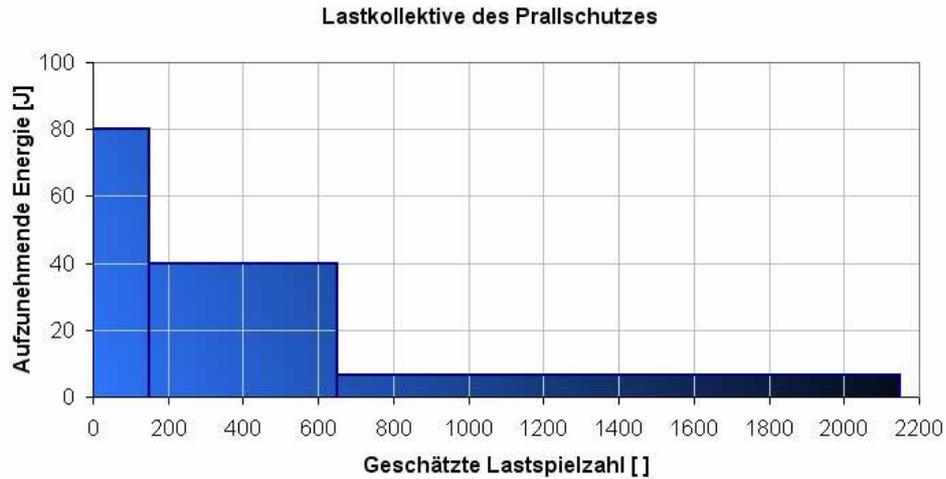


Abbildung 2.32: Lastkollektiv des Prallschutzes

2.6.5.3. Schild

Zusammengefasst hat das Schild die Aufgabe, den Kraftfluss vom Auftreffpunkt des Hindernisses zu den nächstgelegenen Schockabsorbern zu lenken. Es muss dabei relativ zum Fahrwerk beweglich angeordnet sein, um die Knautsch-Zone optimal ausnutzen zu können. Nach der Anzahl der Schilderelemente lassen sich die drei in Abbildung 2.33 dargestellten Systeme der Abschirmung generieren:

-  Einzelschild (a)
-  Sektorenschild (b)
-  Mehrbereichsschild (c)

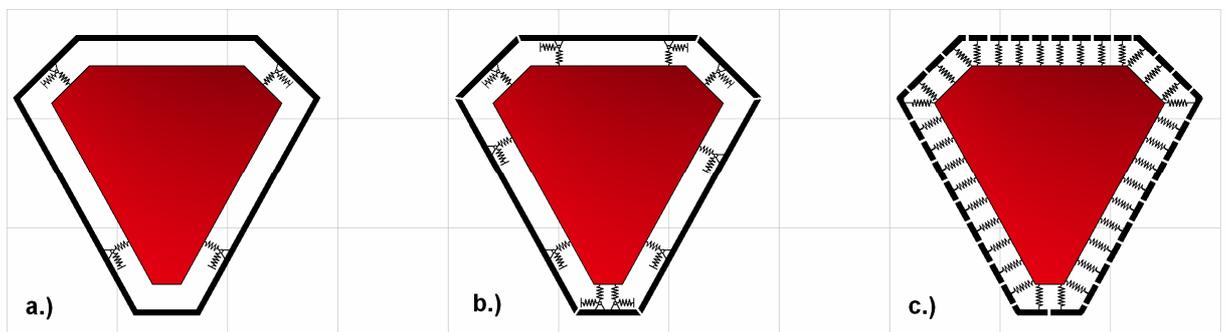


Abbildung 2.33: Prinzipielle Schildvarianten

Einzelchild

Das Einzelchild, wie in Abbildung 2.34 dargestellt, besteht, wie der Name schon andeutet, aus nur einem einzigen Teil. Ein Aufschlag an einer beliebigen Stelle wird, eine entsprechende Steifigkeit des Schilds (2) vorausgesetzt, zu verschiedenen Teilen auf alle Absorber (1) aufgeteilt. Die Krafteinleitung in den Rahmen erfolgt an unterschiedlichen Orten, was die lokale Belastung minimiert. Ein solches Prinzip funktioniert aber nur dann, wenn das Schild in der Lage ist, die auftretenden Kräfte (4) an alle Absorber weiterzugeben. Da letztere vom Aufschlagpunkt und von einander recht weit entfernt liegen, verläuft der Kraftfluss (5) durch den gesamten Schild. Dessen Struktur ist damit unter Umständen einer hohen Biegebelastung ausgesetzt.

Darüber hinaus müssen Schockabsorber, die ein Einzelchild stützen, mit einer Bewegung des Kraftangriffspunkts in beiden Richtungen der Ebene umgehen können, da abhängig vom Aufschlagpunkt auch das Schild in jede Richtung ausweichen können muss. Dabei soll jede der Einheiten die nötige Bewegung des Schild zwar geometrisch erlauben, ohne dabei Schaden zu nehmen, ihr aber zugleich auch einen Widerstand entgegensetzen. Mit der gelenkigen Aufhängung einer reinen **Druckfeder** ist es dabei nicht getan. Simulationen zeigen, dass das Schild bei einem solchen System dazu neigt, dem Hindernis durch eine Drehbewegung auszuweichen, bis es am Rahmen anstößt. Die Folge ist ein ungefederter Aufschlag.

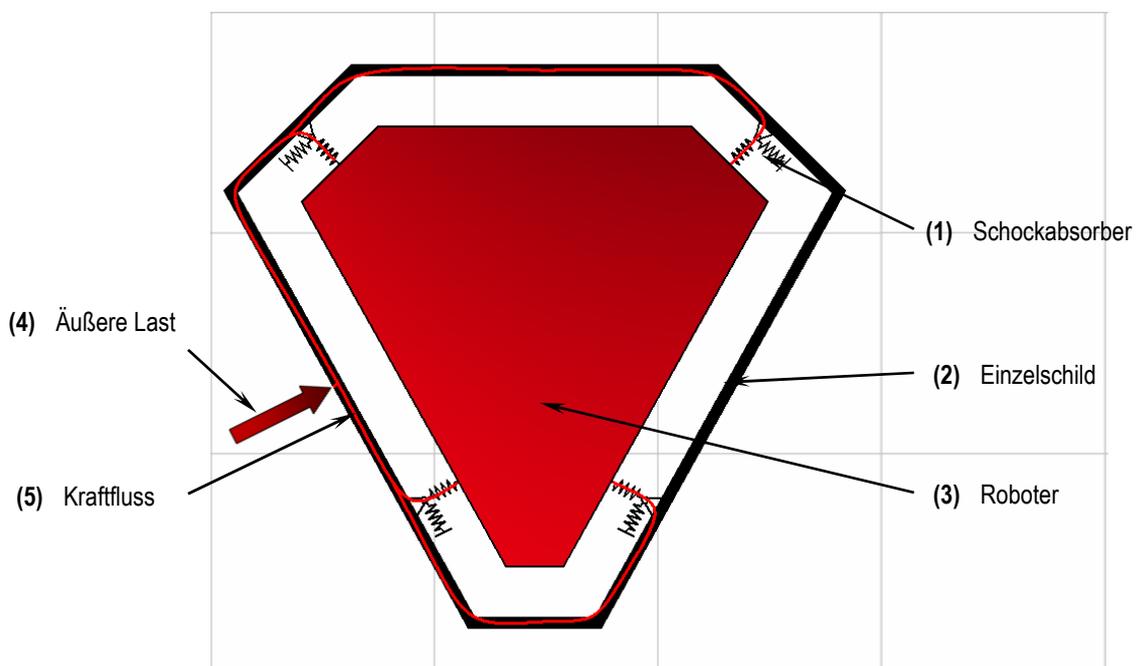


Abbildung 2. 34: Prinzipskizze der Schildkonfiguration "Einzelchild"

Sektorenschild

Bei einem Sektorenschild wird der Umfang in getrennte Sektoren unterteilt. Jeder dieser Teilbereiche wird von einem eigenen Schildelemente (2) geschützt. Dieses System zeichnet sich vor allem durch eine gute Zugänglichkeit und Flexibilität aus. Jeder Schildsektor kann separat entfernt werden, um den Zugang zu den darunter liegenden Baugruppen freizugeben. Bei entsprechend guter Unterteilung der Sektoren werden die Schildelemente so kompakt, dass jeder Aufschlagpunkt der äußeren Kraft (4) zwangsläufig in der Nähe eines Absorbers (1) liegt. Der Kraftfluss (5) verläuft also nur durch den betroffenen Teilbereich. Die verringerte Größe der Einzelschilder macht sie auch in der Fertigung einfacher, vor allem dann, wenn man sie so gestaltet, dass mehrere Sektoren mit baugleichen Abschirmungen versehen sind, da diese auf Vorrat gehalten und im Schadensfall einfacher ersetzt werden könnten. Eine besondere Herausforderung verspricht der Stoß zwischen zwei Schildsektoren zu werden. Da beide nachgiebig sind, besteht die Möglichkeit, dass sich hier ein Spalt öffnet. Wird dieser von einem gegnerischen Roboter unglücklich getroffen, könnte dieser die Abschirmung durchdringen und Komponenten im Inneren beschädigen oder durch Fehlbelastung eines der Schildelemente aus dem Roboter (3) reißen. Abbildung 2.35 zeigt den prinzipiellen Aufbau eines Sektorenschilds.

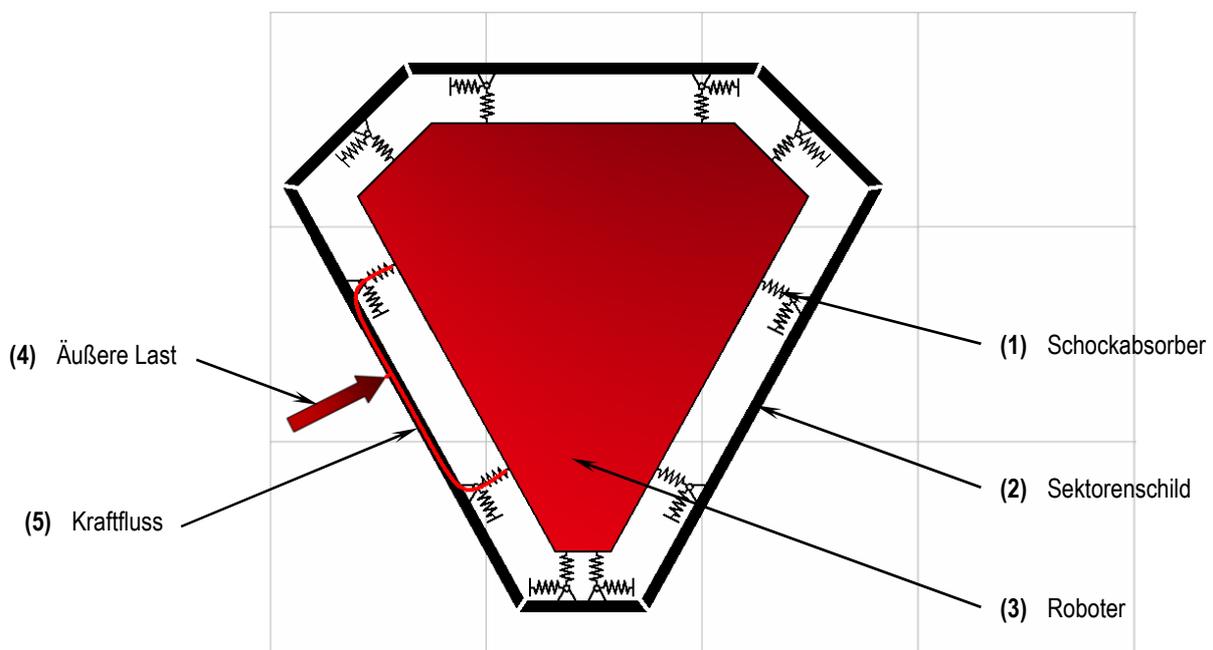


Abbildung 2. 35: Prinzipskizze der Schildkonfiguration "Sektorenschild"

Mehrbereichsschild

Geht man vom System des Sektorenschild aus und erhöht die Anzahl der Bereiche beliebig, so erhält man das in Abbildung 2.36 skizzierte Mehrbereichsschild. Jedes Schildelement (2) deckt dabei nur noch den Bereich direkt vor dem Absorber (1) ab, was bedeutet, dass der Aufschlagpunkt (4) von hinten direkt vom entsprechenden Absorber abgestützt wird. Es kommt folglich zu keiner Umlenkung des Kraftflusses (5). Um dem Problem der klaffenden Stoßstellen zu entkommen, können die Enden der Einzelschilder über biegeschlaffe Gelenke miteinander verbunden werden. Die Verschiebung eines Elements wirkt sich dabei zwar auf die unmittelbar benachbarten Teile aus, baut sich aber über den Umfang rasch ab.

Verfolgt man diesen Ansatz bis zu einem Aufbau mit differenziell kleinen Schildelementen weiter, so gelangt man zu einem geschlossenen, biegeweichen Schild, das über den gesamten Umfang, beispielsweise mittels Elastomerfeder, abgestützt wird.

Die Krafteinleitung in den Rahmen hängt hier von der Geometrie des eindringenden Körpers ab. Wird das Fahrwerk von der Ecke eines gegnerischen Roboters getroffen, ist mit einer lokal sehr hohen Belastungsspitze zu rechnen. Um diesem Effekt teilweise entgegenzuwirken, kann die Biegesteifigkeit des Schilds wieder erhöht werden, um eine breitere Verteilung der Last zu erreichen.

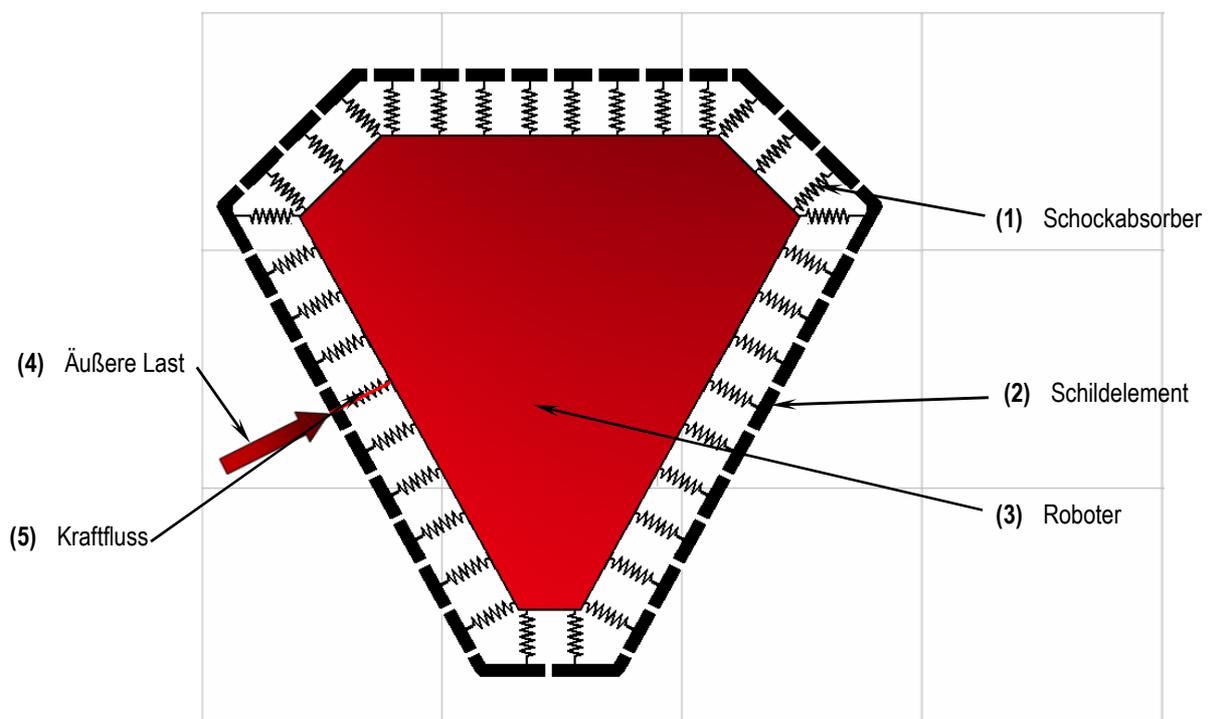


Abbildung 2. 36: Prinzipskizze der Schildkonfiguration "Mehrbereichsschild"

2.6.5.4. Schockabsorber

Beim Schockabsorber handelt es sich um eine Feder-Dämpfer-Einheit nach Abbildung. 2.37 a.), welche in der Lage ist, die beim Zusammenstoß mit einem Hindernis frei werdende kinetische Energie aufzunehmen. Im Idealfall wird diese direkt in Wärme umgewandelt. Bevor das Prinzip des Absorbers diskutiert wird, soll an dieser Stellen noch die Frage nach dem gewünschten Kraft-Weg-Verlauf gestellt werden, wobei hier der Fokus der Betrachtung auf der Feder im Ersatzschaltbild liegt. Der Einfluss des Dämpfers soll an dieser Stelle vorerst vernachlässigt werden.

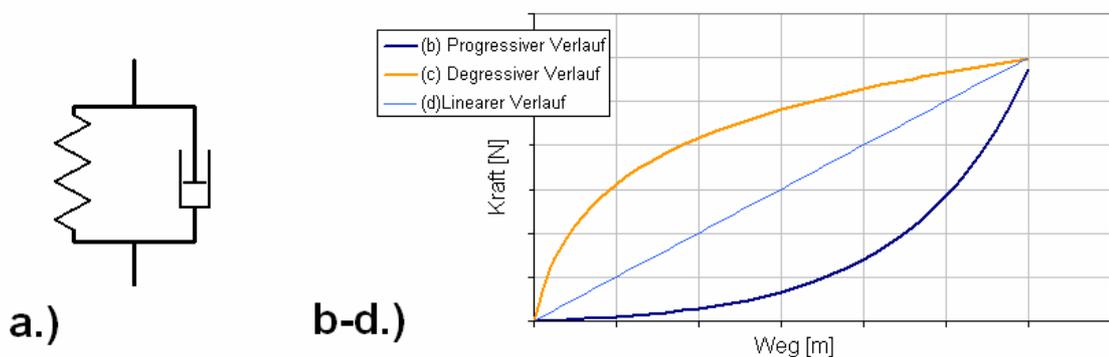


Abbildung 2. 37: Feder-Dämpfersystem (a) und verschiedene Arten von Federkennlinien (b-d)

Das zu betrachtende Kriterium wird an dieser Stelle die Energie sein, die während des Einfederns aufgenommen werden kann. Diese definiert sich aus dem Zusammenhang:

$$E_{\text{pot}} := \int F ds \tag{Gl 2.9}$$

Wobei **F** die aktuelle Federkraft und **s** den Federweg repräsentieren. Ein Vergleich mit dem Diagramm in Abbildung 2.37 b-d.) zeigt, dass dies genau die Fläche unter der Kurve beschreibt. Es ist dabei jenes System zu favorisieren, das die Energie des Aufschlags bei einer minimalen Spitzenkraft aufnehmen kann.

Abbildung. 2.37 b.) zeigt einen progressiven Verlauf der Kraft über dem Weg. Federn mit einer solchen Charakteristik sind in der Lage, auf kurzem Weg große Kräfte freizusetzen. Ihre Vorteile zeigen sich in sehr leichten und sehr schweren Kollisionen. Bei leichten Berührungen erlauben sie aufgrund der geringen Anfangssteifigkeit ein vergleichsweise starkes Einfedern. Die Folge ist ein sanftes Verzögern. Mit ansteigendem Weg wird die Kraftzunahme über der Verformung aber

immer größer. Gegen Ende des Verformungsweges muss die Reaktionskraft ausgesprochen hohe Werte annehmen, um die freie Energie aufnehmen zu können. Wird die Feder in Richtung Überlast betrieben, ist die wirkende Kraft bereits so groß, dass auf kürzestem Wege hohe Energiemengen aufgenommen werden können.

Absorber mit degressiver Charakteristik nach Abbildung 2.37c.) erhöhen die Reaktionskraft am Beginn der Deformation sehr rasch, um die Steigung im weiteren Verlauf stark zu reduzieren. Diese Form bietet den Vorteil, große Energien bei geringer Spitzenkraft absorbieren zu können. Die Vorzüge einer degressiven Kennlinie zeigen sich hauptsächlich bei stärkeren Aufschlägen, da nur hier die Maximalkraftlimitierung zum Tragen kommt. Auf leichten Kontakt reagieren derartige Elemente unnötig hart, da die Reaktionskraft bereits bei kleinen Energieeinträgen erheblich ansteigt.

Lineare Kennlinien stellen einen Mittelweg zwischen den beiden Extremvarianten progressiv und degressiv dar. Mechanismen mit einem derartigen Verhalten zeigen sich bei geringen Deformationen weicher als degressive Absorber, können aber bei vergleichbarer Spitzenkraft mehr Energie speichern als progressive.

Ruft man sich das ursprüngliche Ziel der Schockabsorber, empfindliche Bauteile vor überhöhten Beschleunigungen zu schützen, in Erinnerung, so ist das in erster Linie durch eine Beschränkung der Reaktionskraft zwischen Roboter und Hindernis zu erreichen. Mit anderen Worten soll die kinetische Energie des Fahrwerks abgebaut werden, ohne dass diese Reaktionskraft jemals ein gewisses Limit überschreitet. Dieses Anforderungsprofil beschreibt eher das Verhalten einer progressiven Feder.

Was zu klären bleibt, ist das Überlastverhalten. Der Absorber hat niemals mehr als 10 mm Federweg zur Verfügung auch dann nicht, wenn er auf ein Hindernis stößt, dass sich deutlich schneller als mit den im Lastkollektiv angenommenen 2 m/s bewegt. Um dieser Anforderung gerecht zu werden, soll der Verlauf gegen Ende des Federwegs auf eine progressive Kennlinie umschwenken, um ggf. eine deutlich über der Norm liegende Reaktionskraft erzeugen zu können.

Aufschlagmildernde Bauteile sind sehr gut beherrschte Maschinenelemente. Entsprechend groß ist die Auswahl der möglichen Prinzipien. Lediglich der geringe Bauraum in Längsrichtung und die Zusatzforderung, auch Kräfte in Querrichtung aufnehmen zu können, stellen eine gewisse Herausforderungen dar. Im Folgenden sollen einige dieser Elemente auf ihre Tauglichkeit hin geprüft werden.

Tellerfeder

Das Standardelement zur Generierung degressiver Federkennlinien ist zweifellos die Tellerfeder. Aufgrund ihrer Geometrie hat sie selbst bereits eine degressive Charakteristik. Darüber hinaus lassen sie sich nahezu beliebig kombinieren, wodurch die Kennlinie des gesamten Blocks weiter modifiziert werden kann. Für die Anwendung im Schockabsorber würde sich eine Anordnung, wie in 2.38.d dargestellt, anbieten.

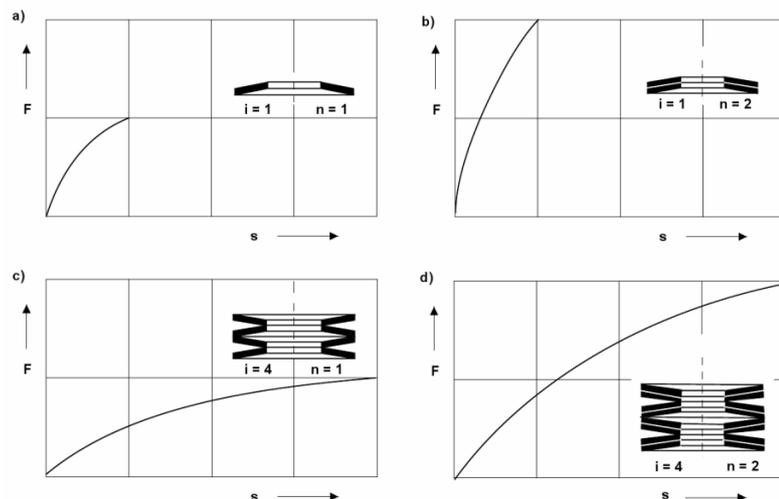


Abbildung 2.38: Federkennlinien von Tellerfedern und der Kombinationen²⁸

Die in Serie geschalteten Stufen verstärken den degressiven Einfluss, was zu einer erhöhten Energieaufnahme bei gleicher Maximalkraft führt. Die Parallelschaltung mehrerer Tellerfedern innerhalb einer Stufe steigert nicht nur die Steifigkeit des Pakets, sie sorgt auch für vermehrte Dämpfung, da sich während der Kompression die Flächen der Federn unter hohen Normalkräften relativ zueinander bewegen. Ein Teil der aufgenommenen Energie wird als Reibwärme abgegeben. Auch aus wirtschaftlicher Sicht zeigt diese Lösung viele Vorteile. Tellerfedern sind Massenware, sie haben nur einen geringen Preis und sind leicht zu beschaffen.

Lediglich ihre Anwendung zur Abstützung eines Einzelschilds stellt eine Herausforderung dar. Tellerfederpakete sind reine Druckfedern, die weder für ziehende noch für quer liegende Beanspruchungen gedacht sind. Es wäre hier also eine Aufgabentrennung nötig, wobei je ein Federpaket für die Längs- und zwei für die Querrichtung verbaut werden müssten. Jeder Federstapel wäre dabei an beiden Enden gelenkig zu lagern, um bei einer Bewegung des Schilds Querkräfte zu vermeiden.

²⁸ Quelle [MS 2007]

Gasdruckfeder²⁹

Das Herzstück einer Gasdruckfeder ist ein hermetisch dichter, mit Gas gefüllter Raum. Bei einer Kompression der Feder wird der Gasraum verkleinert, was zu einem Druckanstieg führt. Dies verursacht wiederum einen Kraftanstieg. Die Charakteristik ist maßgeblich von der Dynamik der Bewegung abhängig. Als Folge der Verdichtung kommt es zu einem Temperaturanstieg. Wird die Kraft langsam eingeleitet, wird dieser Temperaturanstieg durch einen Wärmetransport über die Systemgrenzen kompensiert. Genau diese Wärmemenge entspricht der, dem System durch Dämpfung entzogenen Energie. Erfolgt die Krafteinleitung mit hoher Dynamik, wie das im Prallschutz der Fall ist, kann der Energiefluss über die Systemgrenzen aufgrund der kurzen Zeitdauer vernachlässigt werden. Die Zustandsänderung kann als isentrope Kompression approximiert werden und folgt dem Zusammenhang:

$$p_1 \cdot V_1^\kappa := p_0 \cdot V_0^\kappa \quad \text{Gl.2.10}$$

Wobei p_0 und p_1 für den statischen Überdruck vor und nach der Kompression, und V_0 und V_1 für das Volumen vor und nach der Kompression stehen. κ bezeichnet den Isentropenexponenten und ist vom Gas abhängig.

Unterstellt man eine konstante Angriffsfläche A für den Druck, so ergibt sich die Federkraft F aus:

$$p_1 \cdot V_1^\kappa := p_0 \cdot V_0^\kappa \quad \text{Gl. 2.11}$$

Wie sich daraus schon erkennen lässt, zeigen derartige Federn ein grundsätzlich progressives Verhalten, wie in Abbildung 2.39 am Beispiel der für den Rundlaufprüfstand (Kapitel „3.3 Mecanum Wheels“) verwendeten Feder, dargestellt.

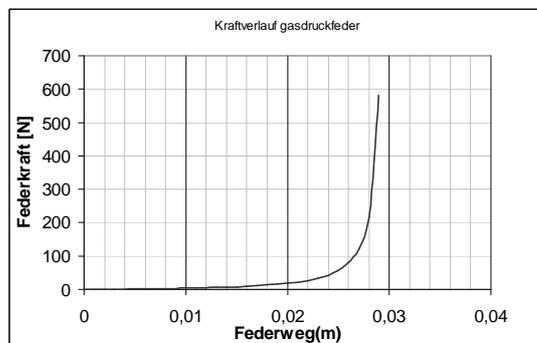


Abbildung 2. 39: Federkennlinie einer Gasdruckfeder

²⁹ Quelle [Bau 2008] S.18

Darüber hinaus sind Gasdruckfedern deutlich teurer als vergleichbare Tellerfederpakete. Bei einer Verwendung mit einem Einzelschild tritt dasselbe Problem wie schon zuvor bei den Tellerfedern beschrieben auf. Auch hier müsste eine richtungsabhängige Aufgabenteilung vorgenommen werden.

Als großes Potential ist hier zu nennen, dass das Kraft-Wegverhalten über den Vorspanndruck im Gasraum eingestellt werden kann. Die Tatsache, dass im Bereich des Kickers ohnehin ein Druckluftspeicher mit einem Ladedruck von ca. 200 bar vorhanden ist, würde eine Echtzeitanpassung des Prallschutzes erlauben. Diese Steuerbarkeit ermöglicht, bei zugegeben hohem Aufwand, eine Beeinflussung des Schockabsorbers bis hin zu einer rechnergesteuerten Federkennlinie. Bei einem derartigen Szenario müssten Federweg und Federinnendruck (als Maß für die Reaktionskraft) gemessen werden. Über einen separaten Controller und ein pneumatisches Ventil könnte dann der Druck dem Weg entsprechend gesteuert werden. Neben dem großen konstruktiven und regelungstechnischen Aufwand liegt die Herausforderung einer solchen Lösung wohl vor allem in der Ansprechzeit des benötigten Pneumatikventils.

Elastomerfedern³⁰

Elastomerfedern sind heute vielseitige Federelemente, die in unzähligen Bauformen angeboten werden. Je nach Gestaltung und Material sind sie mit progressiven, näherungsweise linearen oder degressiven Kennlinien sowie deren Kombinationen verfügbar, wie aus Abbildung 2.40 ersichtlich.

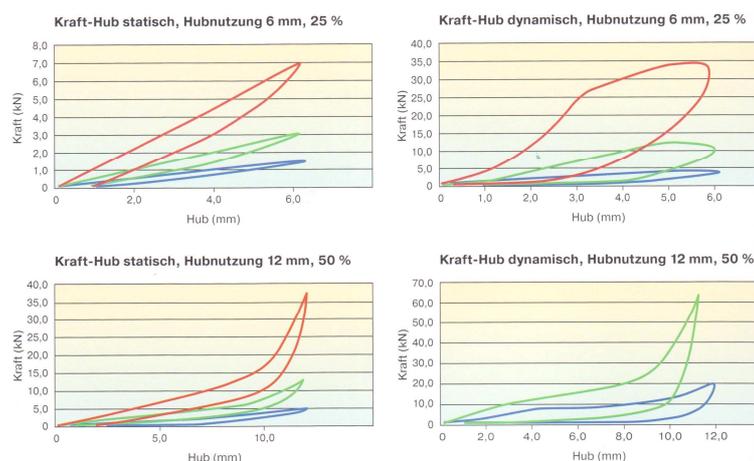


Abbildung 2. 40: Federkennlinien verschiedener Elastomerelemente

³⁰ Vg. [ACE 2009]

Bei Federelementen, die zusätzlich über Reibung dämpfen, ist die Reaktionskraft lediglich von der Verformung abhängig. Bei gleichem Eindringen erfährt ein langsam aufschlagendes Hindernis die gleiche Kraft wie ein schnell auftreffendes. Im Endeffekt unterscheiden sich die Kollisionen lediglich durch die Eindringtiefe. Optimal wäre hingegen ein umgekehrtes Verhalten bei dem jeder Fremdkörper den gleichen Verzögerungsweg hat, und nur so stark verzögert wird wie nötig, um ein unzulässiges Eindringen zu verhindern. Elastomeren zeigen ein Verhalten, das in diese Richtung geht. Der geschwindigkeitsproportionale Dämpfer im Voigt-Kelvin Ersatzschaltbild, wie in Abbildung 2.41 gezeigt, setzt Hindernissen mit einer hohen Relativgeschwindigkeit einen großen Widerstand entgegen. Dadurch steigt die Reaktionskraft als Funktion der Verformungsgeschwindigkeit.

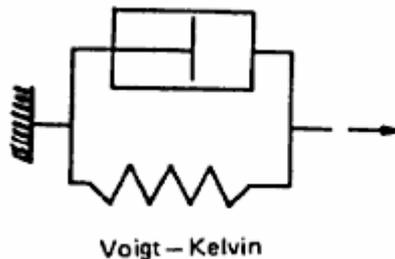


Abbildung 2. 41: Voigt-Kelvin Ersatzsystem für Elastomerfeder³¹

Ist der Abbremsvorgang jedoch abgeschlossen, wird eben dieses Verhalten zum Problem. Der geschwindigkeitsproportionale Anteil ist auch beim Rückformen wirksam. Die Stoßdämpferplatte aus dem Hause ACE, deren Kennlinien sich in Abbildung 2.40 finden, benötigen eine Rückstellzeit von vier bis fünf Sekunden. Während dieser Zeit ist das Fahrwerk aber gänzlich oder teilweise ungeschützt.

³¹ Quelle [GS 2003]

Schraubenfeder³²

Schraubenfedern alleine besitzen, von Spezialbauweisen abgesehen, eine weitestgehend lineare Federkennlinie und haben eine im Vergleich zu den zuvor beschriebenen Prinzipien geringe innere Dämpfung. Die Federkraft F ergibt sich abhängig vom Federweg s und der Federkonstanten c aus:

$$F := c \cdot s \qquad \text{Gl. 2.12}$$

Als Vorteil ist neben ihrem geringen Preis und der hohen Verfügbarkeit vor allem eine teilweise Toleranz gegen eine von außen aufgezwungene Durchbiegung zu nennen. Ein Biegemoment oder eine Querkraft aufnehmen kann aber auch diese Federform nicht.

Federmechanismus

Neben dem Federprinzip an sich kann, auch ein vorgeschaltener Zwangslauf das Verhalten des Schockabsorbers beeinflussen. Die Funktionsweise ist dabei wie in Abbildung 2.42 schematisch dargestellt. Dem Transformationsmechanismus wird an seiner Primärseite ein Weg aufgeprägt. Dieser Bewegung folgt die Sekundärseite, nach einem nichtlinearen Zusammenhang. Die in diesem Beispiel lineare Feder generiert eine Kraft, die dem sekundärseitigen Weg proportional ist. In Summe ergibt sich ein nichtlinearer Kraft-Weg-Verlauf unter Verwendung der linearen Feder.

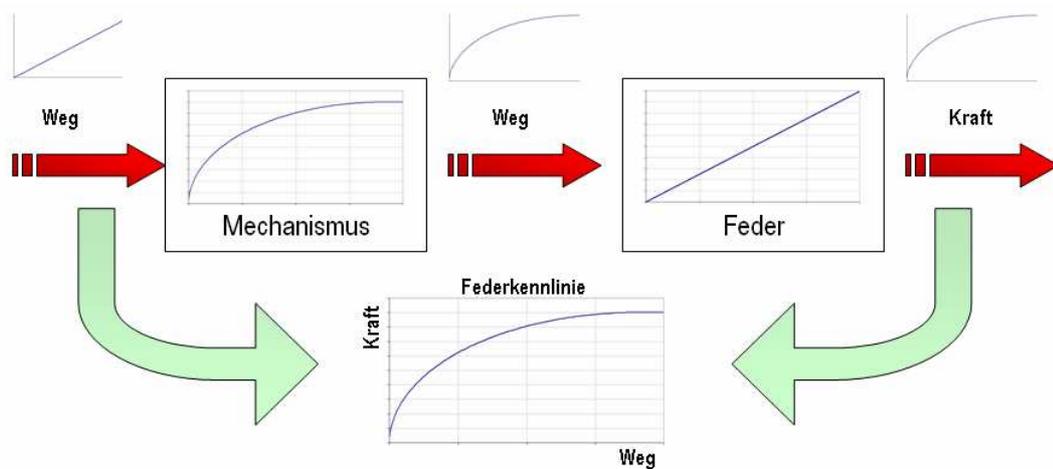


Abbildung 2. 42: Prinzip des Federmechanismus zur Beeinflussung der Federkennlinie

³² Vgl. [Dec 2000] S276 ff.

Ein einfacher und bekannter Mechanismus, der ein solches Verhalten zeigt, ist der Kniehebel nach Abbildung 2.43 a.). Der Zusammenhang zwischen primärseitiger und sekundärseitiger Bewegung ist, wie in Abbildung 2.43 b.), ersichtlich, stark degressiv. Unter Verwendung einer linearen Feder ergibt sich hier in Summe eine degressive Kennlinie.

Die im Mechanismus auftretende Reibung wirkt dabei dämpfend. Sie muss zwar mit Blick auf abrasiven Verschleiß begrenzt werden, ist aber grundsätzlich erwünscht. Dieser Gedankengang ist dabei nicht auf lineare Federn beschränkt.

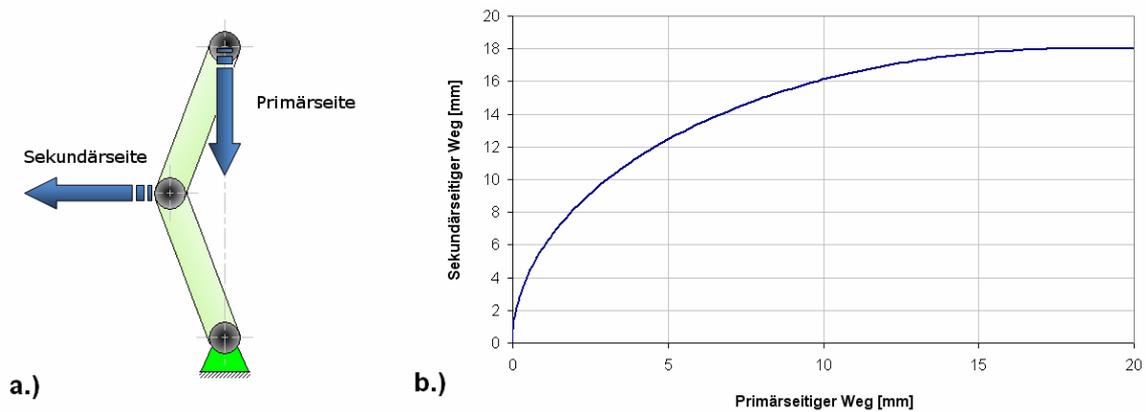


Abbildung 2. 43: Kniehebelprinzip (a) sowie Wegrelation(b) zwischen Primär- und Sekundärseite

Wie sich aus den geometrischen Gegebenheiten leicht zeigen lässt, ergibt sich der Zusammenhang zwischen dem primärseitigen Verfahrweg s_p und dem sekundärseitigen Verfahrweg s_s in Abhängigkeit von den gleichen Hebellänge s zu:

$$s_s := \sqrt{s_p \cdot s + s^2} \quad \text{Gl. 2.13}$$

2.6.5.5. Morphologischer Kasten

Zusammengefasst kann man also sagen, dass der Prallschutz zwei Aufgaben zu erfüllen hat für die sich jeweils mehrere vielversprechende Lösungsansätze bieten. Der morphologische Kasten in Abbildung 2.44 zeigt die Ausgangssituation. Es gilt nun eine Gesamtlösung als Kombination je eines Lösungsansatzes für jede Teilaufgabe zu wählen.

Baugruppe					
Schild	Einzelschild		Sektorenschild	Mehrbereichsschild	
Schockabsorber	Tellerfeder	Gasdruckfeder	Federmechanismus	Schraubenfeder	Elastomerfeder

Abbildung 2. 44: Morphologischer Kasten zum Entwurf des Prallschutzes

Um optimale Sicherheit zu garantieren und gleichzeitig erschütterungsarme Aufschlagdämpfung zu gewährleisten, wird ein zweistufiges System aufgebaut. In erster Linie werden Kollisionen von einem Einzelschild aufgenommen und über einen Federmechanismus auf Basis des Kniehebelprinzips abgefangen. Erweisen sich Einschläge als so schwer, dass der erste Bereich sie nicht alleine bewältigen kann, greift auf den letzten 3 mm des zulässigen Verfahrenswegs das Sekundärsystem helfend ein. Bei derartigen Lasten kann das Schild nicht mehr als steif angenommen werden, es handelt sich also eher um ein Kleinbereichsschild, das über ein Elastomerband abgestützt ist. Die Belastung wird auf diese Weise direkt in die Grundplatte eingeleitet, eine Überlastung der primären Schockabsorber wird verhindert.

2.6.5.6. Die konstruktive Lösung

Der Schockabsorber besteht, wie in Abbildung 2.45 gezeigt, aus zwei Kniehebeln, die am gemeinsamen Lagerpunkt (1) und am Krafteinleitpunkt (2) miteinander verbunden sind. Von den Federlagern (5) und (6) aus werden die beiden freien Ecken (3) und (4) des entstehenden Gelenkvierecks über Federpakete abgestützt. Wie in Kapitel „2.6.5.4 Schockabsorber“ bereits ausgeführt, hängt die Bewegung des Krafteinleitpunkts mit der Stauchung der Feder über eine nichtlineare Beziehung zusammen.

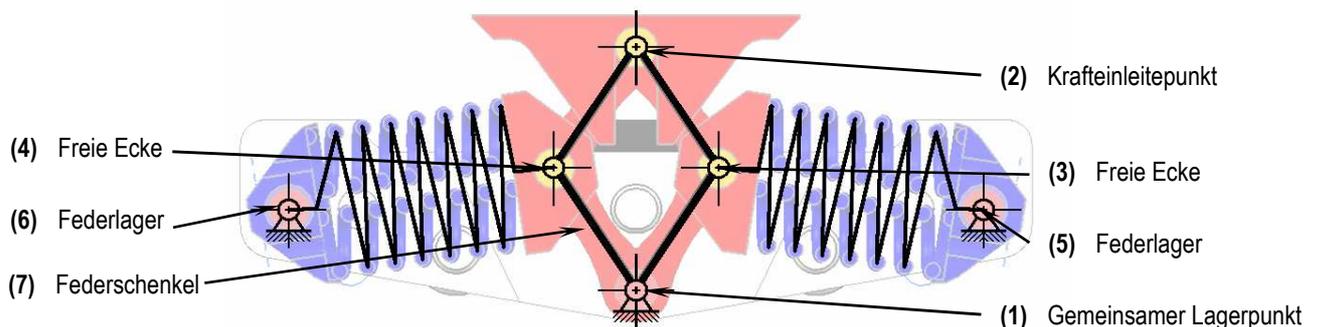


Abbildung 2.45: Funktionsweise des Schockabsorbers

Bei Verwendung eines Einzelschilds muss der Absorber sowohl mit drückenden Belastungen entlang seiner Symmetrieachse, als auch mit Querbelastungen umgehen können.

Liegt eine äußere Kraft auf einer Wirkungslinie, die durch Krafteinleitpunkt und Lagerpunkt verläuft, spricht man von einer rein drückenden Belastung. In diesem Fall wandern die beiden freien Eckpunkte des Gelenkvierecks entlang einer Kreisbahn auseinander. Dies führt zu einer Kompression der beiden Druckfederpakete.

Wird das Schild durch tangentielle Kräfte belastet, zeigte es in ausführlichen Simulationen die Tendenz, ihnen durch eine Drehbewegung auszuweichen. Auf diese Art werden die durch die Druckbelastung gestauchten Federn wieder entspannt. Ein solches Verhalten kann am einfachsten dadurch unterbunden werden, dass die Absorber auch Belastungen in Querrichtung aufnehmen können. Wird er in diese Richtung belastet, verschiebt sich die Aufteilung der Federkräfte. Das Federpaket in Richtung der Querkraft wird verstärkt belastet. Dieses Phänomen kann so weit gehen, dass eine Seite komplett unbelastet ist. Das Gelenkviereck wird in dieser Situation, abhängig von der Druckkraft, wieder länger. Besonders bei reiner Querbelastung fehlt die Druckkraft, um ein Überstrecken der Mechanik zu verhindern. In einer solchen Situation ist eine Abstützung am Schild nötig. Um dies zu gewährleisten, ist der Absorber nicht im entspannten Zustand montiert, sondern um ca. 10% vorgespannt.

Um die Federrate den Erfahrungen am Spielfeld anzupassen, kann das Federpaket mit einer variablen Anzahl von Federn ausgestattet werden. Da dennoch symmetrische Zustände zu garantieren sind, wird die Anzahl der Schraubenfedern in Gruppen zu je 4 Federn variiert. Es sind also Konfigurationen von 8, 12, 16, 20 oder 24 Federn möglich.

2.6.5.7. Simulation

Um das genaue Verhalten des Schockabsorbers vorherzusagen und Optimierungen in der Geometrie vorzunehmen, wurden die geometrischen und mechanischen Zusammenhänge einer Simulation unterzogen.

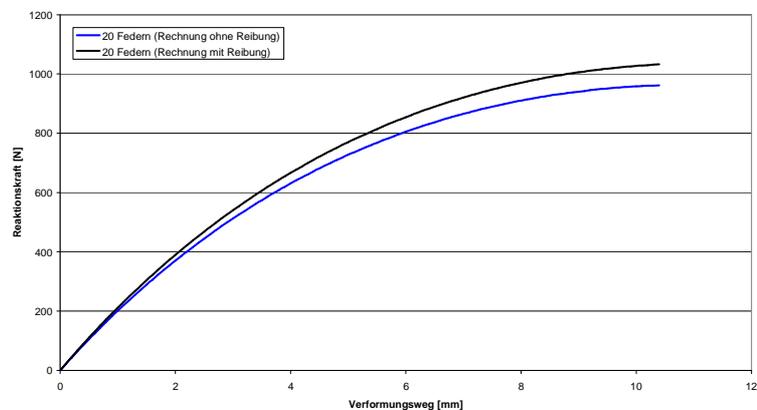


Abbildung 2. 46: Simulationsergebnis des Kraft-Wegverlaufs eines Schockabsorbers

Die genauen Reibzustände sind nur schwer zu ermitteln. Aus diesem Grund werden zwei Extremzustände angenommen, einer für ein reibfreies und einer für ein reibungsbehaftetes System mit einem Reibfaktor Aluminium auf Stahl von 0,2. Die reale Situation sollte sich zwischen diesen beiden Extremen befinden.

Als überraschend großer Einflussfaktor zeigt sich hier die entspannte Länge der Federn. Die Erklärung für dieses Phänomen ist in der Kinematik des Gelenkvierecks zu finden. Je geringer die Länge ist, desto weiter liegen die beiden freien Ecken (Abbildung 45 (3) und (4)) auseinander. Wie aus Abbildung. 2.43 b.) ersichtlich, ist die Änderung der Steigung im Zusammenhang zwischen Primärseite (Krafteinleitungspunkt) und Sekundärseite (Angriffspunkt des Federpakets) umso größer, je näher die freien Ecken beieinander sind. Je schlanker der Mechanismus in der Ruhelage ist, desto degressiver ist somit seine Kennlinie. Auf diese Art kann also der in der Kennlinien in Abbildung 2.43 b.) genutzte Bereich verschoben werden.

Ein ähnlicher Effekt wird durch eine Verkürzung der Federschenkel erzielt. Durch die reduzierte Hebellänge wird bei gleicher, druckbedingter Bewegung des Kraftangriffspunkts vom Federschenkel ein größerer Winkel überstrichen. Auch hier lässt sich als Folge eine verstärkt

degressive Kennlinie zeigen. Es wird jedoch nicht nur ein verschobener, sondern auch ein größerer Bereich der Kennlinie genutzt. Es sei hier jedoch darauf hingewiesen, dass eine derartige Variation eine Verringerung des maximalen Hubs zur Folge hat.

2.6.5.8. Validierung der Federkennlinie

Um die im Simulationsmodell getroffenen Annahmen zu überprüfen und das Produkt in der Realität auf seine Funktionstüchtigkeit zu testen, wurde ein Schockabsorber im Federprüfstand des Instituts für Maschinenelemente einem Komponententest unterzogen.

Abbildung 2.47 zeigt den Vergleich der gemessenen Federkennlinie eines mit 24 Federn bestückten Absorbers im Vergleich mit den, aus der Simulation erhaltenen, Verläufen für ein reibungsfreies und ein mit Reibfaktor 0,2 angenommenes System.

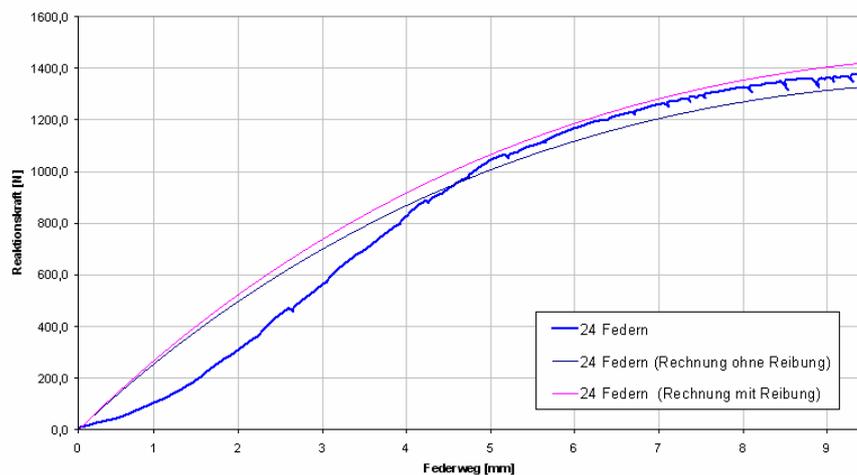


Abbildung 2. 47: Reale Federkennlinie des Schockabsorbers, im Vergleich mit dem Simulationsergebnis

Wie das Diagramm unschwer erkennen lässt, stimmen der gemessene und der mittels Simulation ermittelte Verlauf in der rechten Hälfte gut überein. Der Verlauf der realen Kurve ist allerdings zu Beginn flacher als vorhergesagt. Als Erklärung bieten sich hier zwei Effekte an. Aufgrund von Fertigungstoleranzen und Montagefehlern haben die Federn eine unterschiedliche entspannte Länge, wie sich aus Abbildung 2.48 unschwer erkennen lässt.



Abbildung 2. 48: Federträger mit Federn unterschiedlicher entspannter Länge

So liegen in der Ruhelage nur einige der Federn an. Im Verlauf des Einfederns werden diese bereits komprimiert, während die anderen Schraubenfedern erst nach und nach in Eingriff kommen. Darüber hinaus ist auch die Kennlinie der eingesetzten Schraubenfedern nicht exakt linear, wie die gemessenen Federkennlinien in Abbildung. 2.49 ansatzweise erkennen lassen.

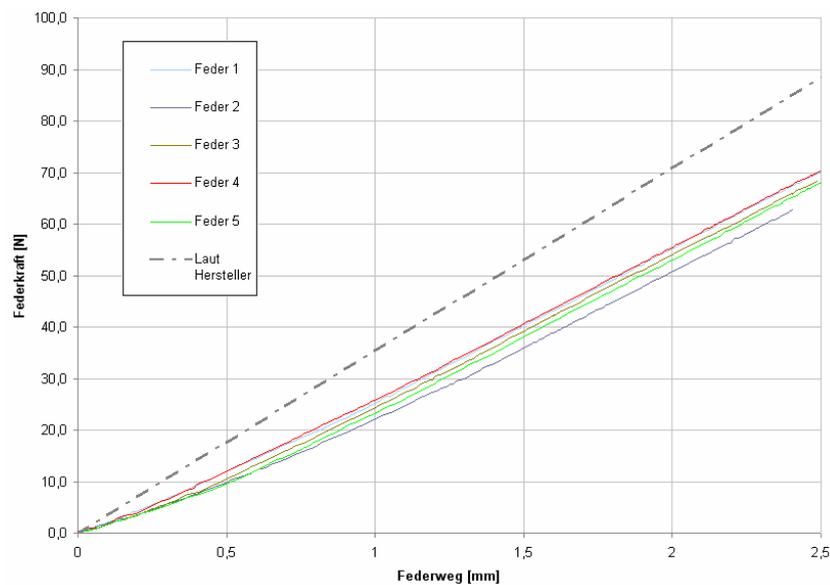


Abbildung 2. 49: Federkennlinie der eingesetzten Schraubenfedern

Der Grund ist in den Enden der Feder zu finden. Um eine ebene Anschlussfläche zu gewährleisten, wird hier die Steigung sukzessive reduziert³³. Schon bei geringer Deformation gehen daher die ersten Windungen auf Block. Die Federsteifigkeit c der Schraubenfeder ergibt sich aus:

³³ Vgl. [Jue 2011]

$$c := \frac{G \cdot d^4}{8 \cdot D^3 \cdot n}$$

Gl. 2.14³⁴

Wobei **G** der Schubmodul des Federwerkstoffs, **d** der Durchmesser des Federdrahts, **D** der mittlere Durchmesser der Spirale und **n** die besprochene Anzahl der federnden Windungen ist. Gehen nun Windungen auf Block, sind sie nicht mehr federnd und **n** verringert sich. Die Federsteifigkeit steigt.

Die in Abbildung 2.49 zu beobachtende Streuung in der Federrate, sowie deren Abweichung vom angegebenen Wert dürften das Resultat einer Abweichung der Drahtdurchmesser sein.

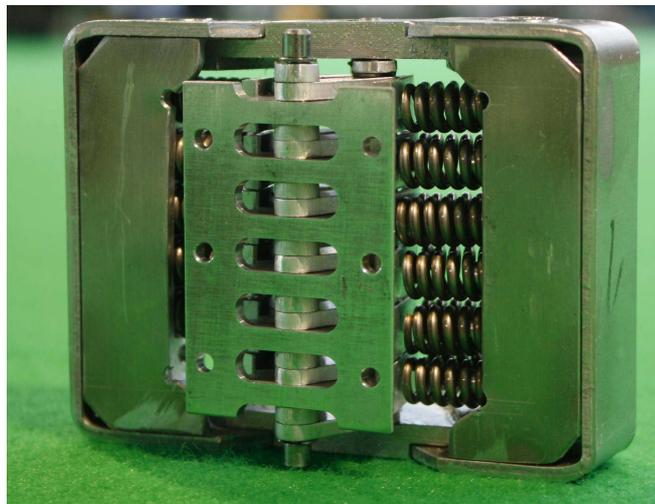


Abbildung 2. 50: Der Schockabsorber

³⁴ Quelle [Dec 2000] S. 288, Gleichung 14.22

2.6.5.9. Validierung der Energiebetrachtungen

Die ursprüngliche Herangehensweise bei der Entwicklung des Absorbers war es, einen Mechanismus zu entwerfen, der bei beschränkter Reaktionskraft ein Maximum an Energie aufnehmen und einen möglichst großen Anteil davon direkt in andere Energieformen umwandeln kann. Deshalb soll auch die Energieaufnahme des Absorbers untersucht werden. Abbildung 2.51 zeigt die Hysterese des Kraft-Weg-Verlaufs.

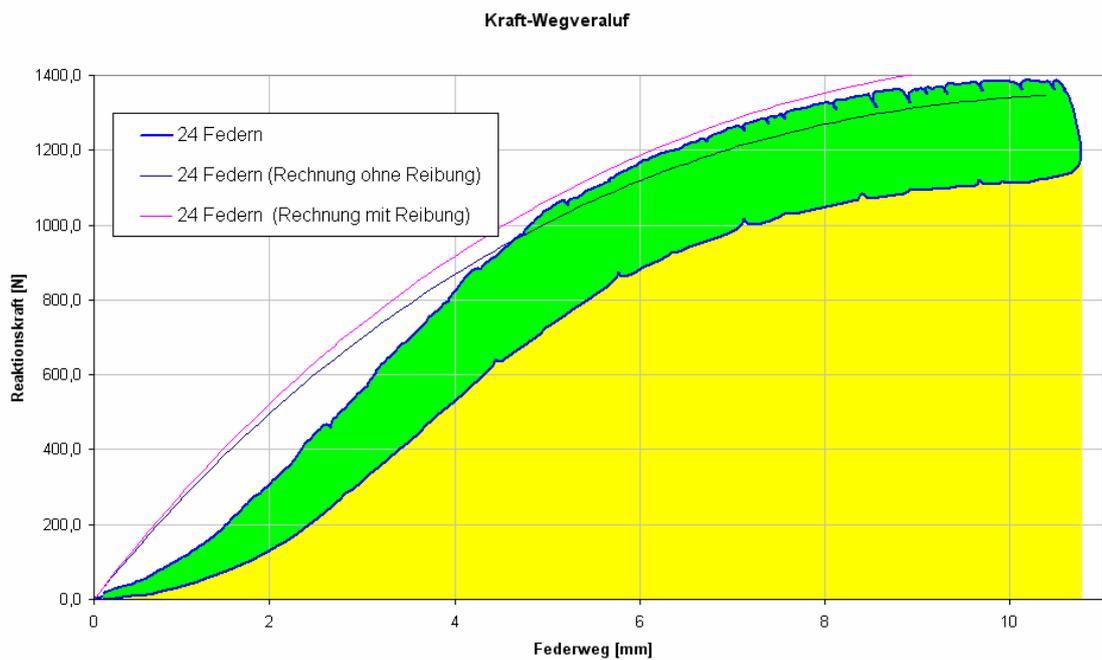


Abbildung 2. 51: Energiebetrachtungen am Schickabsorber.

Die grüne und die gelbe Fläche repräsentieren die Energie, die bei einer Kollision vom Schockabsorber aufgenommen wird. Durch die Abflachung des Verlaufs bei steigender Verformung kann, trotz beschränkter maximaler Federkraft, eine hohe Energiemenge absorbiert werden. Im Vergleich zu einer linearen Feder führt dieses Verhalten bei selber Verformung und Reaktionskraft zu einem 35% höheren Energieinhalt. Wie schon zuvor erwähnt ergibt sich dieser aus:

$$E_{\text{ein}} := \int_0^{f_{\text{max}}} F_{\text{ein}} df \quad \text{Gl. 2.15}$$

Wobei f der Federweg, f_{max} der größte Federweg und F_{ein} die Kraft während des Einfederns ist.

Kehrt der Schild in die Ruhelage zurück, wird potenzielle Energie entsprechend der gelben Fläche wieder abgegeben. Sie bewirkt neben einer Beschleunigung des Schilds eine Vorspannung des gegenüberliegenden Absorbers. Die abgegebene Energie ergibt sich aus:

$$E_{\text{aus}} := \int_{F_{\text{max}}}^0 F_{\text{aus}} df \quad \text{Gl.2.16}$$

Es ist zu beachten, dass sich F_{aus} und F_{ein} im Betrag unterscheiden! Die Energie, welche von der grünen Fläche repräsentiert wird, entsteht aus der Differenz der beiden. Sie wird in Wärme umgewandelt, also dem System entzogen. Abgesehen davon ist eine Dämpfung durch die Bewegung des Schilds in der Luft zu erwarten. Wie sich leicht erkennen lässt, ist das Verhältnis zwischen gespeicherter und gedämpfter Energie ein wichtiges Maß für die Schwingneigung des Systems. Aufgrund der Komplexität in der Ermittlung des Luftwiderstands des Schilds, wurden hierzu keine Berechnungen angestellt, Prinzipversuche zeigen jedoch, dass nach einem Aufschlag die Vibrationen des Schildes weder optisch noch akustisch wahrnehmbar sind.

2.6.6. ODOMETRIE-SENSOREINHEIT

Eine der revolutionären Neuerungen des Krikkit III seitens der Elektronik soll ein Sensor werden der, ähnlich der Funktion einer Lasermaus, den Boden abtastet und auf diesem Weg die Lageänderung des Roboters präzise erfassen kann. Auch wenn das System bei Abschluss dieser Arbeit noch im Stadium einer Machbarkeitsstudie steckt, muss es beim Entwurf des Fahrwerks natürlich mit berücksichtigt werde. Es sei hier aus Gründen der Vollständigkeit erwähnt.

2.6.7. AKKUTRÄGER

Der Akkuträger stellt die Energieversorgung des gesamten Systems sicher. Im Offline-Betrieb beinhaltet das Modul zwei leistungsstarke Nickel-Metalhydrid-Akkus. Ist die dadurch erreichte Mobilität nicht nötig, kann der Roboter auch über ein externes Kabel mit Strom versorgt werden. Die verbaute Elektronik entscheidet selbständig, welche der beiden Quellen verwendet wird und versorgt daraus die beiden Bordnetze.

2.6.7.1. Grundgedanke und Aufgabe

Aus mechanischer Sicht besteht die Aufgabe des Akkuträgers in erster Linie darin, die Akkus im Betrieb sicher zu verwahren. Besonderes Augenmerk ist dabei auf eine Lagerung zu legen, die in der Lage ist, die beiden Batterien der Masse $m = 1,6$ kg auch bei starken Erschütterungen sicher zu verwahren. Geht man dabei von einem Fall aus, bei dem sich der Roboter mit einer Geschwindigkeit v bewegt, so ist die im Akku gespeicherte kinetische Energie:

$$E_{\text{kin}} := \frac{m \cdot v^2}{2} \quad \text{Gl.2.17}$$

Erfährt der Roboter eine Verzögerung, so muss die Halterung eine Reaktionskraft F aufbringen. Es ist dabei natürlich wünschenswert, die Akkulagerung weich zu gestalten um den Betrag dieser Kraft gering zu halten. Unterstellt man in erster Näherung einen konstanten Kraftverlauf, so wird die kinematische Energie in potentielle Energie umgewandelt.

$$E_{\text{pot}} := F \cdot s \quad \text{Gl. 2.18}$$

Hier offenbart sich aber ein Problem. Aufgrund des geringen Platzangebots steht nur ein sehr begrenzter Verformungsweg s zur Verfügung. Es ist also wünschenswert, dass die Lagerung ausreichend steif gestaltet ist, um entsprechend hohe Kräfte bei geringer Verformung aufbringen zu können.

Dabei muss eine hinreichende Zugänglichkeit gewahrt werden, um ein komfortables und sicheres Wechseln der Batterien zu ermöglichen. Das Tauschen der Akkus wird sich in weiterer Folge als die wahre Herausforderung dieses Moduls erweisen.

2.6.7.2. Der Akku

Da kommerziell erhältliche Akkus entweder die nötige Leistungsdichte und Intelligenz nicht bieten oder aus wirtschaftlichen Gründen nicht in Frage kommen, sind die im Roboter verwendeten Ladungsträger Eigenentwicklungen. Ihre Formgebung ist weitestgehend der im Modellbau üblichen Bauform entlehnt. Es handelt sich dabei um zwei parallele Stäbe aus jeweils 5 Zellen (1). Wenngleich der Rest der Akkugestaltung durchaus Gestaltungsspielraum lässt, so gilt diese Anordnung als fixe Vorgabe. Die Zellen werden mit einer Folienschicht umhüllt. In den so entstehenden Freiraum finden Temperatursensoren (2) Platz, die einerseits als Sicherheitselement dienen, um ein Selbstentzünden zu verhindern, und zum Anderen wichtige Informationen für den Ladeprozess zur Verfügung stellen. Darüber hinaus muss an einer beliebigen, jedoch ausreichend geschützten Stelle am Akku die zugehörige Elektronik, das so genannte *Smart Batterie System* (3), untergebracht werden.

Diese Anordnung zeichnet sich vor allem durch einen geringen Bauraum und einen simplen Aufbau aus, ist aber in der Handhabung sehr schwierig. Es finden sich kaum Stellen an denen große Kräfte eingeleitet werden können, ohne Gefahr zu laufen, Zellen zu beschädigen. Darüber hinaus muss der ganze Stab vor, aus Massenkräften resultierenden, Biege- und Torsionsbelastung geschützt werden, um eine Auseinanderbrechen zu vermeiden. In jedem Fall muss der Akku deshalb in alle Richtungen flächig unterstützt werden und kann nicht, ähnlich einem Bohrmaschinenakku, an nur einer oder zwei Stellen fixiert werden.

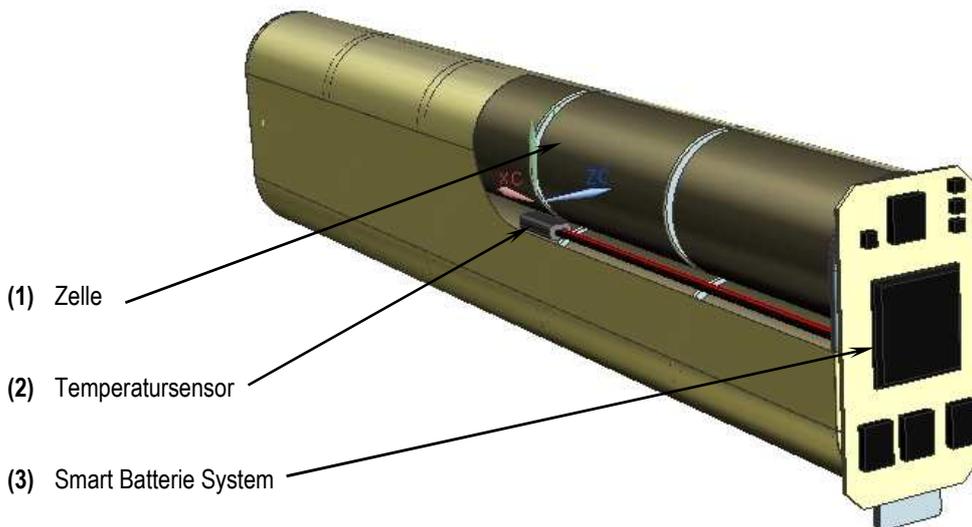


Abbildung 2. 52: CAD- Modell des verwendeten Akkus

2.6.7.3. Variantenkonstruktion

Wie bereits vorweggenommen, liegt die größte Herausforderung dabei im Einschieben bzw. Entnehmen der Akkus. Wird dieses Problem systematisch betrachtet, lassen sich grundsätzlich drei Richtungen unterscheiden, entlang derer der Akku an seinen Bestimmungsort gebracht werden kann.

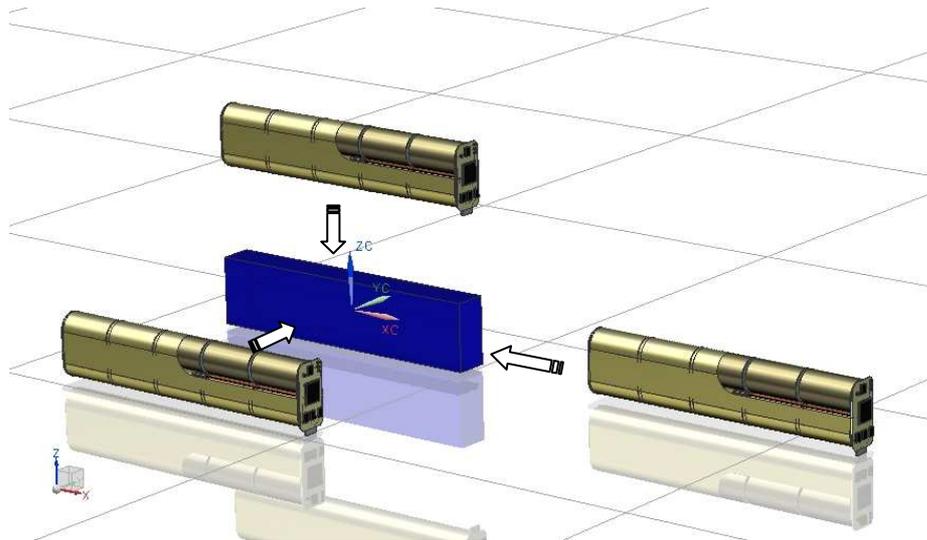


Abbildung 2. 53: Mögliche Einbaurichtungen der Akkus

Die Orientierung des in blau dargestellten Akku-Einbauraums ist in Abbildung 2.53 zufällig gewählt. Würde sie verändert, hätte das auf die möglichen Szenarien allerdings kaum Einfluss, weshalb ohne Beschränkung der Allgemeinheit in der Folge nur die drei Fälle Einschieben (Einbringen entlang der längsten Lagerraum-Seite), Quermontage (Entlang der Y-Achse) und Einstecken von oben (entlang der Z-Achse) behandelt werden.

Einschieben

Das signifikante Element des Einschiebevorgangs ist, dass der Akku durch die kleinste Seitenfläche in den Montageraum eingebracht wird. An die Zugänglichkeit der anderen Seiten werden keine Ansprüche gestellt, sie können also im Inneren des Roboters liegen. Daher ist diese Variante im Bezug auf den nötigen Bauraum im Roboter von Vorteil.

Als nachteilig erweist sich die damit verbundene schwierige Zugänglichkeit zur Batterie. Sie muss entlang einer nennenswerten Strecke in der Führung des Akkuträgers gleiten, was zu Reibungs- und Abriebproblemen und der Gefahr des Verkantens im Schacht führt. Darüber hinaus können überstehende Teile, wie etwa die Akku-Elektronik, leicht abgeschert werden.

Ist die Zelle erst einmal im Akkuträger fixiert, ist nur noch die schmalste Seite zu sehen, was eine zusätzliche Herausforderung beim Entnehmen darstellt.

Quermontage.

Die Quermontage zeigt in den Schwachpunkten des Einschiebens Vorteile. Da eine weit größere Fläche des Montageraums zugänglich ist, verspricht das Einbringen des Akkus deutlich einfacher zu werden. Auch beim Fixieren des Akkus in der Einbaulage bieten sich hier eher Lösungen an, da man eine ganze Längsseite des Akkus als Angriffsfläche für Verschluss- und Spannelemente zur Verfügung hat.

Einstecken von oben

Ein Einstecken von oben, also entlang der roboterfesten Z-Achse, stellt eine besondere Herausforderung dar, da die Oberseite des Roboters stets durch das Service-Modul bzw. den Kicker abgedeckt ist. Hier sind zwei Variationen des Szenarios denkbar. Zum einen könnten die Zellen, ähnlich dem Powertrain- oder E-Box-Modul, entlang der Z-Achse von unten eingefügt werden. Da die Akkus aber vergleichsweise oft (im Spielbetrieb ein bis zwei Mal pro Spiel) gewechselt werden müssen, wird die Handhabung des Roboters bei diesem Ansatz unnötig verkompliziert. Darüber hinaus müsste eine weitere Ausnehmung in der Grundplatte vorgesehen werden.

Andererseits wäre eine Konstruktion ähnlich einer Küchenlade denkbar. Ein Schlitten könnte, ähnlich dem Einschieben entlang der kleinsten Seitenfläche, aus dem Lagervolumen gezogen werden. Während die Zelle fixiert wird, wären bis zu fünf Seiten zugänglich. Der Schlitten selbst könnte über Führungselemente und einen Verriegelungsmechanismus verfügen, um schnell und einfach wieder im Modul verankert werden zu können. Der Preis, den man für zusätzlichen Bedienungskomfort bezahlt, ist voraussichtlich ein größerer Platzbedarf und eine konstruktiv aufwändigere Lösung.

2.6.7.4. Konstruktive Lösung

Aus den zur Verfügung stehenden Lösungsansätzen wurde das Einschleiben als unter den gegebenen Umständen vielversprechendster Zugang gewählt, da er einen geringen Platzbedarf am Umfang des Roboters hat und einen mechanisch einfachen Aufbau erlaubt. Die eingangs schon erwähnte Reibungsproblematik beim Einbauen des Akkus bleibt während der Konstruktion ein Unsicherheitsfaktor, der sich erst mit einem Test am Prototyp ausräumen lässt.

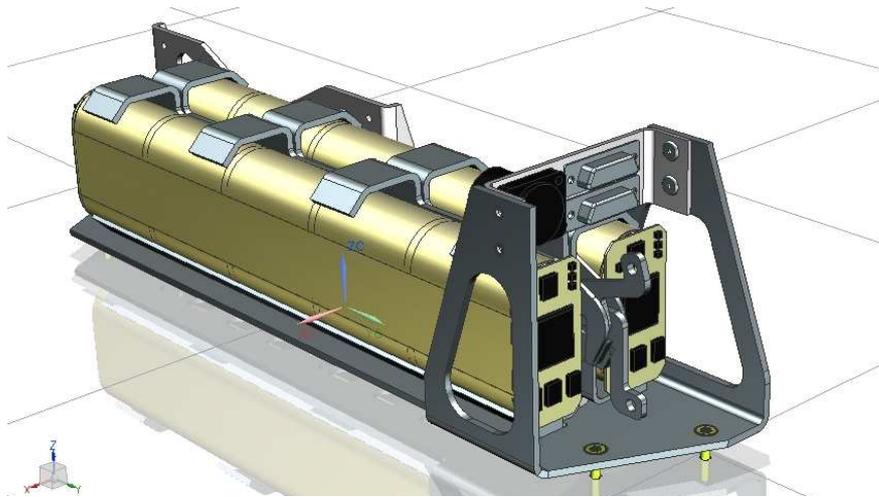


Abbildung 2. 54: CAD-Modell des Akkuträger-Moduls

Das Modul besteht neben der Akku-Elektronik und einer Konsole mit den Buchsen für Akkustecker und externe Spannungsversorgung vor allem aus zwei spiegelbildlichen Akkuschächten.

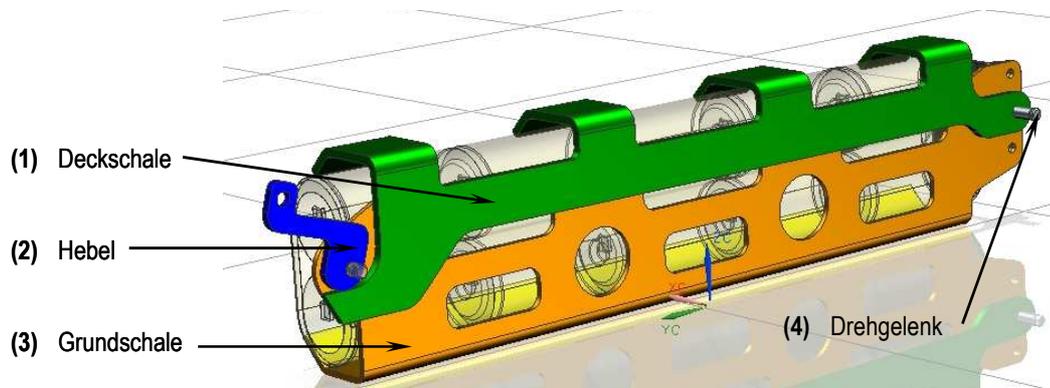


Abbildung 2. 55: Aufbau des Akkuschachts

Jeder dieser Schächte besteht, wie in Abbildung 2.55 ersichtlich, aus zwei Hälften, einer Grund- und einer Deckschal. Die Grundschaale (3) ist fix mit der Grundplatte verbunden, während sich die Deckschaale (1) um ein Drehgelenk (4) drehen lässt. Der Raum zwischen den beiden Schalen ist so bemessen, dass ein Akku bequem Platz findet. Ist der Akku im Schacht untergebracht, wird die Deckschaale mittels des Exzenterhebels (2) gegen die Batterie gedrückt. In seiner Endposition hat der Hebel den sigulären Punkt bereits überschritten und verriegelt sich damit selbst.

2.6.7.5. Bewertung und Analyse

Der Mechanismus zeigt sich im Praxistest soweit als durchaus praktikabel und zuverlässig. Das befürchtete Verklemmen oder Verkanten konnte nicht festgestellt werden. Auch die beim Einschieben zu überwindenden Reibkräfte halten sich in Grenzen.

Dafür offenbarten sich bei der Handhabung Schwierigkeiten an anderer Stelle. Wie schon bei der ursprünglichen Analyse des Einschubvorgangs angedeutet, bleibt im montierten Zustand nur noch die Stirnseite des Akkus zugänglich. Abbildung 2.52 zeigt aber, dass genau an dieser Stelle die mechanisch empfindliche „Smart Batterie“-Elektronik sitzt. Es bleibt also keine Fläche, über die man den Ladungsträger tiefer in den Schacht schieben könnte, ohne Schaden zu verursachen. Es wird daher erforderlich sein, einen anderen Ort für die Platine zu finden, oder sie mechanisch stabil zu kapseln. Das Herausziehen ist hingegen unproblematisch. Die Batterie wird einfach mit einem flexiblen Griff -ähnlich dem Tragegriff eines Einkaufssacks- ergänzt, an dem gezogen werden kann.



Abbildung 2. 56: Der Akkutträger

2.6.8. E-BOX

Hinter dem klingenden Name E-Box verbirgt sich nicht viel mehr als ein geschützter Bereich für die zentrale, also keinem Modul zugeordnete, Elektronik. Sie zählt, vor allem aus Sicht des Maschinenbaus, sicher nicht zu den Kernkomponenten der Plattform, soll aber der Vollständigkeit halber hier trotzdem kurz erläutert werden.

2.6.8.1. Grundgedanke und Aufgabe

Aus Sicht der Elektronik ist eine der wichtigsten Lehren, die aus der Analyse des Krikkit II gezogen werden können, dass Platinen an geschützten und gut zugänglichen Stellen unterzubringen sind. Ein zentraler „Platinenstapel“ wie im Vorgängermodell ist nicht anzustreben! Mit der Einführung der Modularität löst sich dieses Problem weitestgehend von selbst, da die erforderlichen elektronischen Baugruppen ohnehin in den jeweiligen Modulen untergebracht werden. Gesondert zu betrachten sind nur die Platinen, die nicht eindeutig einem Modul zugeordnet werden können. Um für sie einen adäquaten Einbauort zu schaffen, besteht zur E-Box keine Alternative.

Da Form und Lage keinen Einfluss auf die Leistungsfähigkeit des Roboters haben, wurde dieses Element in den Bauraum eingepasst, der nach Anordnung der Module höherer Priorität noch verfügbar war.

2.6.8.2. Konstruktive Lösung

Die E-Box hat die Form eines gleichseitigen Dreiecks. Sie besteht aus einer Aluminiumgrundplatte, auf die eine abnehmbare Kunststoffhülle aufgesetzt ist. Wenngleich die Lage des Moduls in punkto Raumausnutzung und Schutz optimal ist, so lassen sich, was die Zugänglichkeit angeht, einige Schwierigkeiten erkennen. Da es rundherum mit anderen Modulen umgeben ist, bleibt nur ein Zugang von oben oder unten. Im Betrieb liegt über dem Unterbau das jeweilige Service-Modul, folglich kann das Modul nur durch eine entsprechende Ausnehmung in der Grundplatte aus dem Roboter entfernt werden.

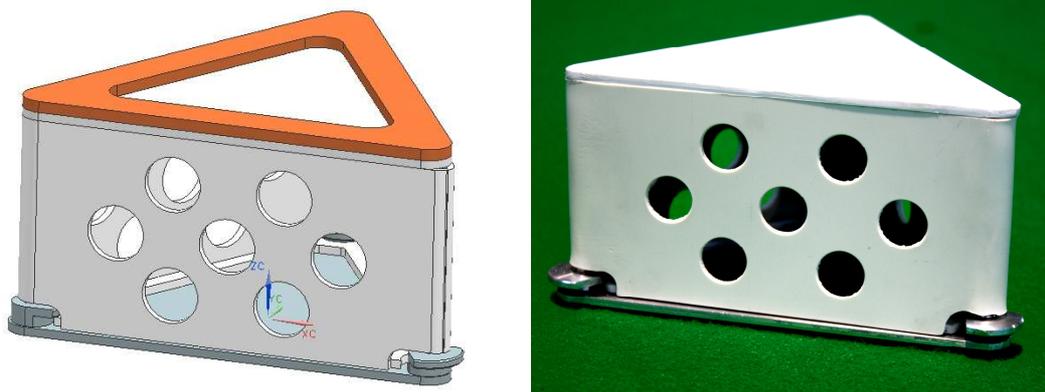


Abbildung 2.57: Die E-Box

2.6.8.3. Bewertung und Analyse

Erfahrungen mit der E-Box zu sammeln, gestaltet sich recht schwierig, da in Folge von Konzeptumstellungen seitens der Elektronik derzeit keine Platinen verbaut sind, die in diesem Modul untergebracht werden müssten. Es sei an dieser Stelle aber nochmals betont, dass der Krikkit III ohnehin von Anfang an als Forschungsplattform ausgelegt war, die immer wieder mit diversen Zusatzkomponenten, auch elektronischer Natur, erweitert werden sollte. Aus diesem Blickwinkel betrachtet ist anzunehmen, dass sich die E-Box künftig noch als wertvolle Investition erweisen wird.

2.6.9. PC-TRÄGER

Der PC-Träger beinhaltet neben dem namensgebenden PC auch die Onboarddiagnose- Platine, die dem Benutzer einen groben Überblick über den Zustand des Roboters gibt.

2.6.9.1. Grundgedanke und Aufgabe

Auch wenn der PC von keinerlei maschinenbaulicher Relevanz ist, so stellt seine Anordnung doch eine weit reichende Entscheidung dar.

Das „Gehirn“ des Roboters gehört zweifellos zu seinen empfindlichen und schützenswerten Bauteilen. Aus diesem Grund empfiehlt es sich, diese sicher in dessen Innerem zu verstauen. Andererseits sind am PC einige Anschlüsse (PS2;VGA,...) zu finden, die in Wartungsphasen immer wieder benötigt werden. Es ist also auch eine einfache Zugänglichkeit erforderlich. In seiner ursprünglichen Bauform hat der Computer samt Gehäuse und Netzteil eine Masse und mehr als 2 kg. Um die dynamischen Eigenschaften zu optimieren, ist es wiederum unerlässlich, ihn so tief wie möglich anzuordnen. Wie in Kapitel „2.5 Modularität“ schon angedeutet, zeigen Bildgewinnung und Bildverarbeitung eine hohe Kopplung. Um diesem Umstand Rechnung zu tragen, muss der PC wiederum beinahe an der Spitze des gesamten Systems angeordnet werden.

Wie sich zeigt, ist es nicht möglich eine aus jeder Blickrichtung optimale Anordnung zu wählen. Schlussendlich wurde in Übereinstimmung mit dem Lastenheft entschieden, dass eine Einheit aus PC und Vision einen dermaßen großen Entwicklungsvorteil bietet, dass die daraus resultierenden Nachteile in Kauf genommen werden können.

2.6.9.2. Konstruktive Lösung

Beim PC-Träger handelt es sich um eine ausgesprochen simple Konstruktion. Der Computer wird, derzeit noch im Originalgehäuse aus Stahl, von unten an ein Blechprofil geschraubt. Löst man die Riegel an den drei Ecken, so kann die zuvor erwähnte Einheit aus PC und Vision abgenommen werden.

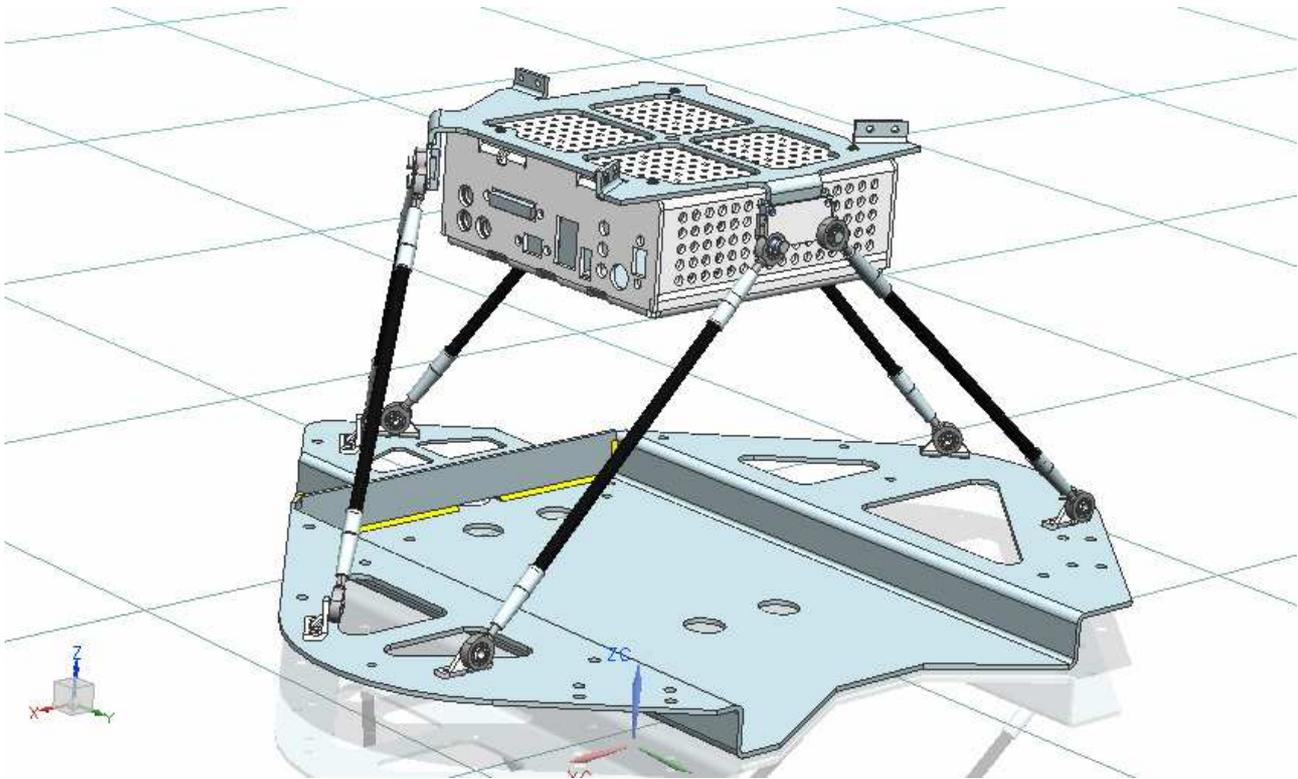


Abbildung 2. 58: CAD-Modell des PC-Trägers auf der entsprechenden Aufhängung

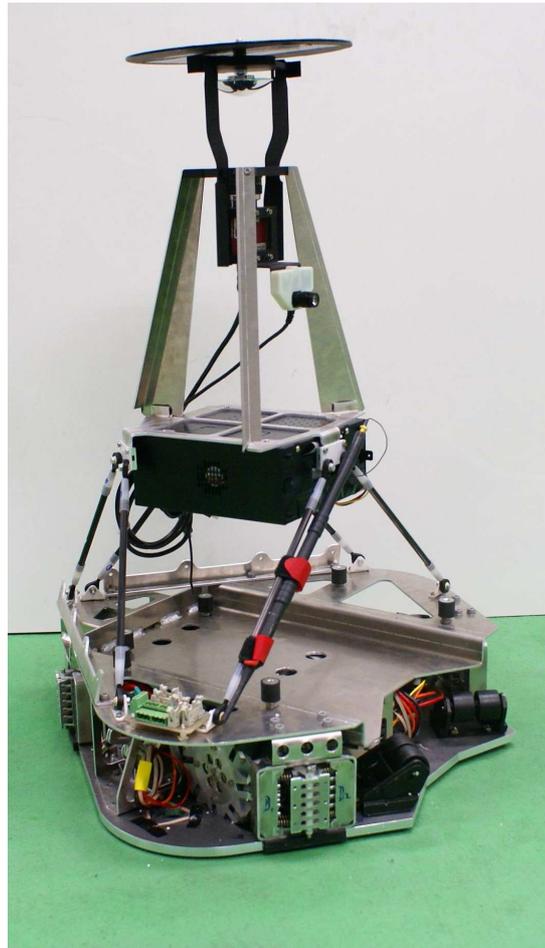
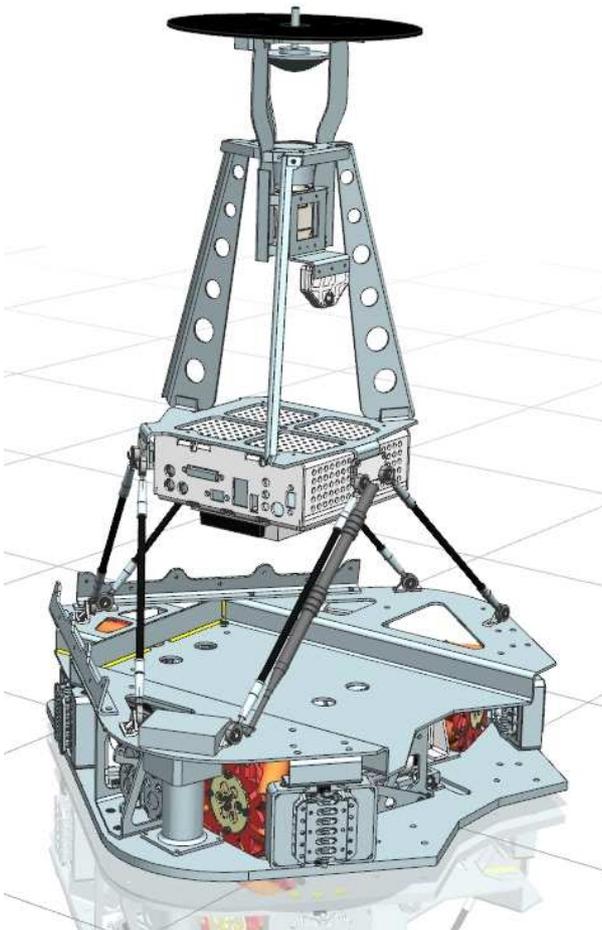


Abbildung 2. 59: CAD-Modell und Prototyp der Krikkit III- Plattform ohne Servicemodul

3. DAS FAHRWERK

Das Fahrwerk des Krikkit III ist einer der Bereiche, dem im Verlauf der Entwicklung des Roboters besonders viel Aufmerksamkeit geschenkt wurde. Dementsprechend soll den erforschten Effekten und erarbeiteten Lösungen auch in dieser Arbeit ein eigenes Kapitel gewidmet sein.

Der Fokus liegt dabei einerseits auf der Beschleunigungsfähigkeit der Plattform und deren Abhängigkeit von der momentanen Bewegungsrichtung und andererseits auf den vom Fahrwerk induzierten Schwingungen und deren Ursachen.

3.1. MODELLIERUNG DES FAHRWERKS

Um das beobachtete Verhalten des Krikkit-Fahrwerks besser verstehen bzw. die Auswirkung von Modifikationen vorhersagen zu können, soll an dieser Stelle ein vereinfachtes Modell auf Basis grundlegender geometrischer und dynamischer Zusammenhänge erarbeitet werden. Darauf aufbauend wird die Auslegung des Krikkit III-Fahrwerks hinsichtlich seiner Fahrdynamik vorgenommen. Dementsprechend soll das Modell in erster Linie Aussagen über die Parameter Geschwindigkeit und Beschleunigung zulassen.

3.1.1. FAHRWERKSMODELL ALLGEMEIN

Als Fahrwerk wird hier ein starrer Körper, repräsentiert durch das roboterfeste Koordinatensystem CF_0 , bezeichnet, der sich in der Ebene frei bewegen kann. In der Realität in begrenztem Maße auftretende Nick- und Rollbewegungen im Raum werden dabei vernachlässigt. Der Schwerpunkt des Roboters wird über seine kartesischen Koordinaten im x_m , y_m und z_m im roboterfesten Koordinatensystem beschrieben

Das Modell verfügt über n , mit dem Fahrwerk fest verbundene Räder, die durch die Koordinatensysteme CF_1 bis CF_n symbolisiert werden. Für die weiteren Überlegungen wird von $n=3$ Rädern ausgegangen, da nur mit drei Auflagepunkten ein sicherer und dennoch nicht überbestimmter Stand des Roboters gewährleistet ist.

Um eine umfassende Betrachtung zu ermöglichen, soll der Begriff „Rad“ hier etwas allgemeiner ausgelegt werden und als Synonym für alle denkbaren Arten von Kontaktpunkten zwischen dem Fahrwerk und dem Untergrund dienen.

Sowohl Lage als auch Orientierung dieser Räder sind von entscheidender Bedeutung. Da sich diese Darstellung als handlicher erwiesen hat, wird die Anordnung der Räder in polarer Form, durch die Winkel φ_i und die Radien r_i , bzw. über die Orientierungswinkel ψ_i , angegeben.

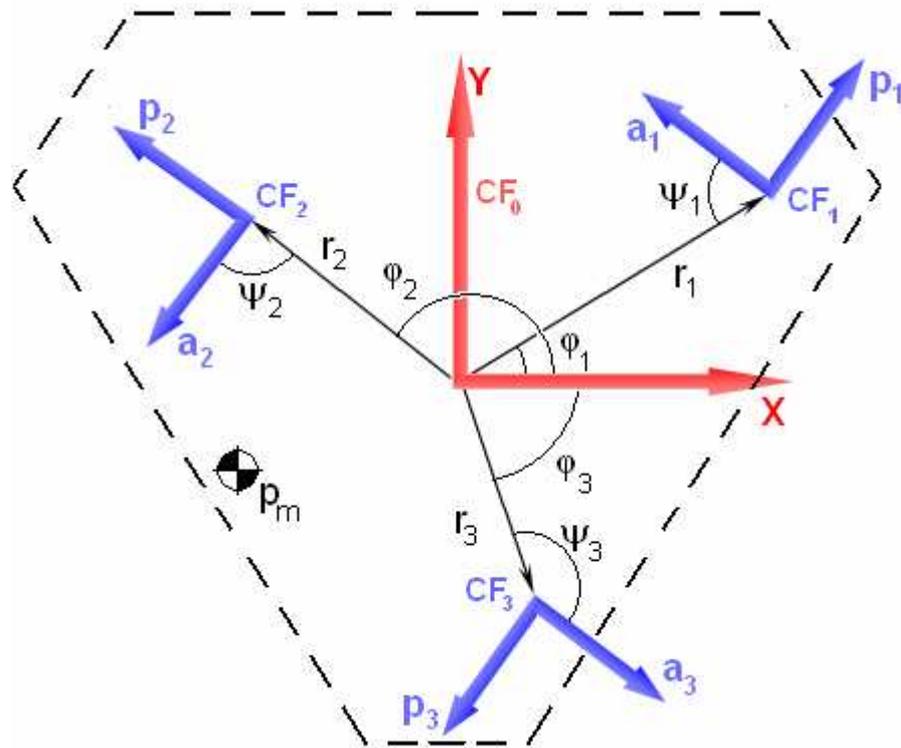


Abbildung 3. 1: Vereinfachtes Modell des Krikkit-Fahrwerks

Spätestens hier zeigt sich, dass das Modell wie es an dieser Stelle zum Einsatz kommt, mehr Variablen als reale Freiheitsgrade besitzt. Schließlich sind weder die absoluten Positionen der Räder, noch des Schwerpunkts von Interesse, lediglich die relative Lage zueinander beeinflusst das Fahrverhalten. Aus diesem Grund ließen sich ohne Beschränkung der Allgemeinheit folgende Forderungen einführen:

- ✚ Der Ursprung des roboterfesten Koordinatensystems fällt immer mit der Erstprojektion des Schwerpunkts zusammen.
- ✚ Der Winkel des hinteren Rades (φ_3) beträgt immer 270° .

Das vereinfachte Modell ist zwar wissenschaftlich einwandfrei aber praktisch unhandlich, da eine Adaption der Schwerlage am Roboter entlang auch nur eine Koordinatenachse (eine Größe) in eine Veränderung der Radaufstandspunkte im Modell (fünf Größen) umgerechnet werden muss. Aus diesem Grund hat sich das unterbestimmte Modell als für die Auslegung praktisch erwiesen.

3.1.2. RADVARIANTEN

Obwohl es zahllose Gestaltungsformen für Räder, bzw. allgemein für Fahrwerks-Bodenkontakte gibt, lassen sich diese in Bezug auf ihre Kinematik auf eine überschaubare Anzahl an Typen reduzieren. Diese werden im Folgenden näher beleuchtet. Dazu wird jedes Modell mittels eines ebenen Koordinatensystems beschrieben. Die Achsen werden als *aktiv* oder *passiv* bezeichnet. Entlang aktiver Achsen bestimmt das Rad die Bewegung des Radmittelpunktes, ist also angetrieben. Entlang passiver Achsen kann es entsprechend äußerer Zwänge bewegt werden. Eine Besonderheit stellen die Richtungen dar, in die keine Bewegung zulässig ist. Bei der Frage nach einer Voll- bzw. Überbestimmung des Fahrwerks wirken diese als aktive Richtungen, untersucht man jedoch die Art der möglichen Bewegungen, sind sie angetriebenen Achsen selbstverständlich nicht gleichzusetzen. Aus diesem Grund werden diese *ruhenden* Achsen als eigener Typ behandelt.

Da jedes repräsentierende Koordinatensystem aus zwei Koordinatenachsen besteht, lässt sich zur systematischen Identifikation aller Varianten folgende Matrix bilden:

Achse	Aktiv	Passiv	Ruhend
Aktiv	Ballbot	Omniwheel	Treibrad
Passiv	---	Stützrad	Lauftrad
Ruhend	---	---	Festlager

Tabelle 3. 1: Systematischer Ansatz zu Identifikation der Konfigurationen von Radaufstandspunkten

3.1.2.1. Ballbot³⁵

Als Beispiel für einen Auflagepunkt, der aus zwei aktiven Achsen besteht, also translatorische Bewegungen in zwei Richtungen der Ebene unabhängig von einander vorgeben kann, sei der Kugelantrieb genannt. Der Antrieb des von einer Schweizer Studentengruppe entwickelten Ballbot „Rezero“ besteht aus einem Ball, der in drei Omniwheels gelagert ist. Durch die drei Antriebe kann er sich in jede beliebige Richtung der Ebene bewegen. Der einzige Freiheitsgrad der theoretische offen bleibt, ist die Drehung. Es sei der Vollständigkeit halber erwähnt, dass der Ballbot auch diese Bewegung beherrscht, da die Auflagefläche des Balls in der Realität kein Punkt ist und somit auch entsprechende Momente eingeleitet werden können.

Der hohe konstruktive und regelungstechnische Aufwand und die Vielzahl an anderen Bauweisen, die eine vergleichbare Kinematik erzeugen, sind wohl als Hauptgrund dafür zu nennen, dass derartige Antriebe heute in der Praxis kaum zu sehen sind.

³⁵ Quelle: [Rüe 2010]

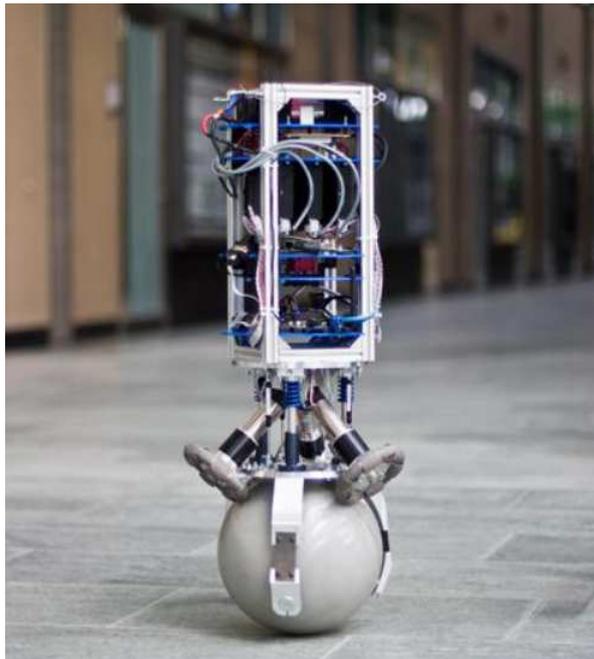


Abbildung 3. 2: Der Ballbot "Rezero" der ETH Zürich³⁶

3.1.2.2. Stützrad

Das Stützrad ist das genaue Gegenteil des Ballbot-Antriebs. Er beeinflusst die Bewegung in keine der beiden Raumrichtungen. Derartige Bauteile sind in der Praxis sehr häufig anzutreffen. Meist werden sie als einfache Rollen ausgeführt, deren Drehachse in der Ebene frei drehbar ist.

Stützräder haben keinerlei Einfluss auf die Kinematik der Plattform auf der sie montiert sind. Erst unter Berücksichtigung der dynamischen Kräftesituation am Fahrwerk zeigen sie eine Wirkung.

3.1.2.3. Festlager

Auflagepunkte mit zwei ruhenden Achsen sperren jegliche translatorische Bewegung der korrelierenden Punkte am Fahrwerk. Es handelt sich dabei um Festlager, die nur noch die Rotation um den Auflagepunkt zulassen. Man kann wohl leicht erkennen, dass dieses Element bei der Konstruktion *mobiler Roboter* eher unüblich ist.

3.1.2.4. Omniwheel

Räder, die in eine Richtung eine definierte Bewegung erzwingen und orthogonal dazu frei laufen, nennt man Omniwheels. Sie zählen zu den meistverwendeten Elementen bei der Entwicklung omnidirektionaler Fahrwerke.

³⁶ Quelle: [Rüe 2010]

Durch diese Konfiguration bleibt die Richtung der resultierenden Momentanbewegung weitestgehend unbestimmt, lediglich ihre Komponente in Richtung der aktiven Achse ist vorgegeben. Bei entsprechender Anordnung nimmt jedes der Räder dem Gesamtsystem einen Freiheitsgrad. Somit ist eine Plattform mit drei derartigen Wheels in seiner Lage und Bewegung bestimmt.

Konstruktiv handelt es sich bei Omniwheels meist um Räder, an deren Umfang, unter einem bestimmten Winkel zur Radachse Rollen angebracht sind. Bei genauerer Betrachtung zeigt sich, dass der Winkel zwischen Rollenachse und Radachse unerheblich für die Kinematik ist. Die aktive Achse verläuft, wie in Abbildung 3.3 ersichtlich, immer entlang der **Rollenachse**. Ist diese Abstraktion auf das kinematische Ersatzmodell erst durchgeführt, hat die konstruktive Ausführung keinen Einfluss mehr.

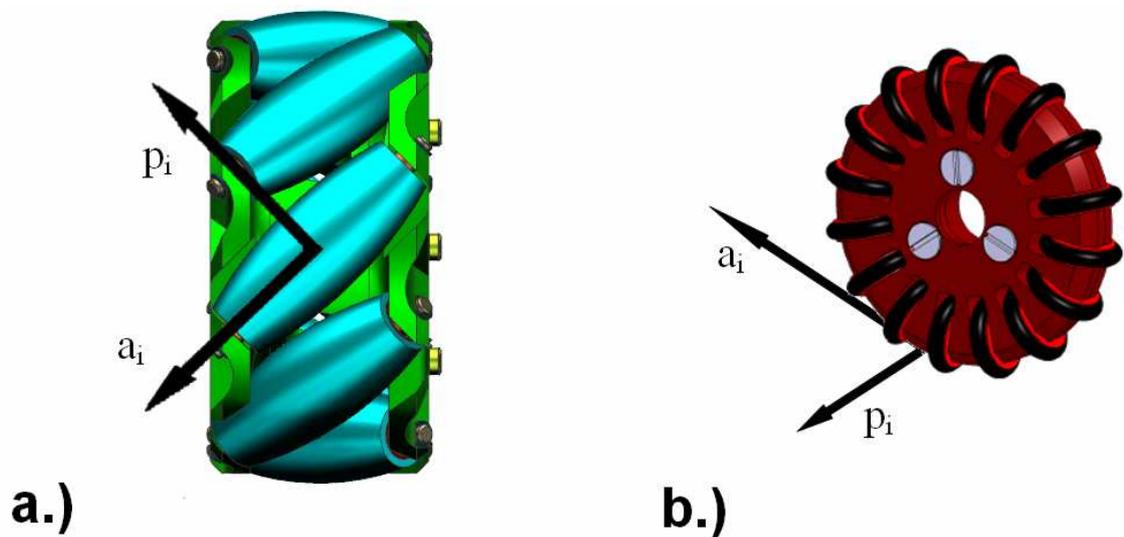


Abbildung 3. 3: Das kinematische Modell für Mecanum Wheels (a) und 90°Omniwheels³⁷ (b)

³⁷ Quelle [Lue 2010] (nachbearbeitet)

3.1.2.5. Laufrad

Beim Laufrad handelt es sich im Grunde um ein herkömmliches Rad mit einer in erster Näherung punktförmigen Auflagefläche. Eine Bewegung entlang der Radachse ist aufgrund der zwischen Rad und Boden wirkenden Reibung nicht möglich, während eine Bewegung quer dazu ein ungehindertes Abrollen zur Folge hat. Ein teilweises oder gänzlichliches Überwinden der Reibung sei in der idealisierten Betrachtung ausgeschlossen. Diese Kinematik nimmt dem System ebenfalls einen Freiheitsgrad.

Betrachtet man nun die Trajektorie eines Punktes in der Ebene, so lässt sich laut [GfS 2008] zeigen, dass jede Momentanbewegung als Rotation um einen bestimmten Punkt, den sogenannten Momentanpol, dargestellt werden kann. Im Fall des Laufrades wird die zusätzliche Forderung formuliert, dass die Tangente dieser Momentandrehung entlang der passiven Achse verlaufen muss, was gleich bedeutend ist mit der Bedingung, dass der Momentanpol auf der ruhenden Achse zu liegen hat. Im Spezialfall einer reinen Translation des Fahrwerks entlang der passiven Achse wird dieser Momentanplot zum Fernpunkt.

3.1.2.6. Triebrad

Das Treibrad verhält sich kinematisch ähnlich dem Laufrad. Durch ein definiertes Abrollen am Boden bestimmt es jedoch auch die Bewegung des Auflagepunkts in der zweiten Raumrichtung, was dazu führt, dass es einem Fahrwerk zwei Freiheitsgrade nimmt. Die Forderung bezüglich des Momentanpols bleibt bestehen.

3.1.3. GRAD DER BESTIMMUNG

Wie bereits zuvor ausgeführt, besitzt jeder ebene Mechanismus, so auch das Fahrwerk im Grunde drei Freiheitsgrade, zwei translatorische und einen rotatorischen. Die verwendeten Räder wirken dabei als Gelenke, behindern also die Bewegung in verschiedene Richtungen. Unter Anwendung der Grübler'schen Formel (vgl.[GfS 2008]) für nur ein bewegliches System mit m Gelenken, lässt sich sagen, dass die Anzahl der verbleibenden Freiheitsgrade f dabei gleich ist:

$$f := 3 - \sum_{i=1}^m (3 - f_i) \quad \text{Gl. 3.1}$$

Wobei f_i die Anzahl der Freiheitsgrade der einzelnen Gelenke (in diesem Fall Räder) beschreibt. Abhängig vom Ergebnis dieser Rechnung kann das Fahrwerk nach folgendem Maßstab charakterisiert werden:

Ist das Ergebnis *Null* gibt es keine offenen Freiheitsgrade. Die Translation und Rotation des Roboters in der Ebene ist komplett bestimmt. Dieser Zustand ist, im Allgemeinen und auch in Hinblick auf die Gestaltung des Krikkit III, anzustreben.

Ergibt die Rechnung einen positiven Wert größer Null, bleiben Freiheitsgrade offen. Das System ist unterbestimmt. Die Bewegung der Plattform ist in diesem Fall nicht vorherzusagen und hängt von äußeren Zwängen ab. Derartige Mechanismen sind nur dann brauchbar, wenn es erklärtes Ziel ist, eben diesen äußeren Zwängen folgen zu können, wie es etwa bei Schienenfahrzeugen der Fall ist.

Folgt aus der Abschätzung eine negative Anzahl an offenen Freiheitsgraden, ist das Fahrwerk überbestimmt. Es gibt also mehr kinematische Forderungen als Freiheitsgrade. Dadurch können sich Forderungen einzelner Gelenke ergeben, die mit dem Rest des Mechanismus nicht vereinbar sind. Mathematisch äußert sich das Problem in einem Gleichungssystem, das mehr Gleichungen als Unbekannte beinhaltet. Überbestimmte Kinematiken sind aber nicht per Definition ein Problem. Spezielle die Bewegungen entlang aktiver Achsen, die ja auch Zwänge darstellen, können ggf. so aufeinander abgestimmt werden, dass dennoch ein funktionsfähiger Mechanismus entsteht.

Es sei jedoch erwähnt, dass die zuvor gezeigte Abschätzung nur für Systeme ohne redundante Abhängigkeiten zulässig ist. Werden mehrere Rollen verwendet, die dem Fahrwerk gleiche Bewegungen aufzwingen, liefert die Formel einen zu geringen Wert. Als Beispiel hierfür sei die Kinematik eines einfachen Dreirads genannt. Das Triebrad und die beiden Laufräder ergeben einen rechnerischen Freiheitsgrad des Gefährts von -1, da beide Laufräder jedoch koaxial stehen, die Translation in Querrichtung also doppelt sperrt, ist das System dennoch nicht überbestimmt. Es wäre sogar denkbar, durch Hinzufügen weiterer Laufräder den Wert der Abschätzung beliebig zu senken, ohne den realen Mechanismus wirklich zu beeinflussen.

3.1.4. DYNAMISCHES MODELL OMNIDIREKTIONALER FAHRWERKE

Als omnidirektional bezeichnet man ein Fahrwerk, das jeder beliebigen Trajektorie in der Ebene, unabhängig von seiner augenblicklichen Orientierung folgen kann. Ein solches Verhalten ist in vielen Anwendungen von Vorteil. Speziell für den Einsatz im Roboterfußball ist die Omnidirektionalität der Plattform unerlässlich. Die zu verfolgende *Trajektorie* einerseits hängt von der anzustrebenden Position am Spielfeld ab und wird durch Hindernisse, etwa Gegner oder Mitspieler, zusätzliche beeinflusst. Die *Orientierung* hingegen ist im Allgemeinen ein Kompromiss aus der ursprünglichen Orientierung und einer Ausrichtung zum Ball hin. In einem sich hoch dynamisch ändernden Umfeld wäre eine gegenseitige Abhängigkeit der beiden Parameter ein signifikanter Nachteil.

Wie zuvor bereits ausgeführt, lässt sich jede Momentanbewegung in \mathbf{R}^2 als Drehung um einen Momentanpol beschreiben. Die formale Forderung an ein omnidirektionales Fahrwerk lautet also, dass jeder beliebige Punkt in der Ebene Momentanpol sein kann, ohne die Bindungen zwischen Plattform und Boden zu verletzen.

Abbildung 3.4 a) zeigt ein Beispiel für ein derartiges Verhalten. Durch entsprechende Vorgabe der Winkel ψ_1 , ψ_2 und ψ_3 lässt sich - die freie Einstellbarkeit dieser Größen vorausgesetzt - jeder Punkt als Momentanpol festlegen. Der im Kapitel „1.4.3 Tricia“ beschriebene Roboterprototyp basiert auf genau diesem Ansatz.

Beim Mechanismus in Abb. 3.4 b.) ist das nicht möglich. Wie bereits ausgeführt, ist der Ursprung der Momentandrehung auf die Achse von r_1 und r_2 beschränkt, eine Translation entlang der X-Achse beispielsweise ist in dieser Orientierung also nicht möglich.

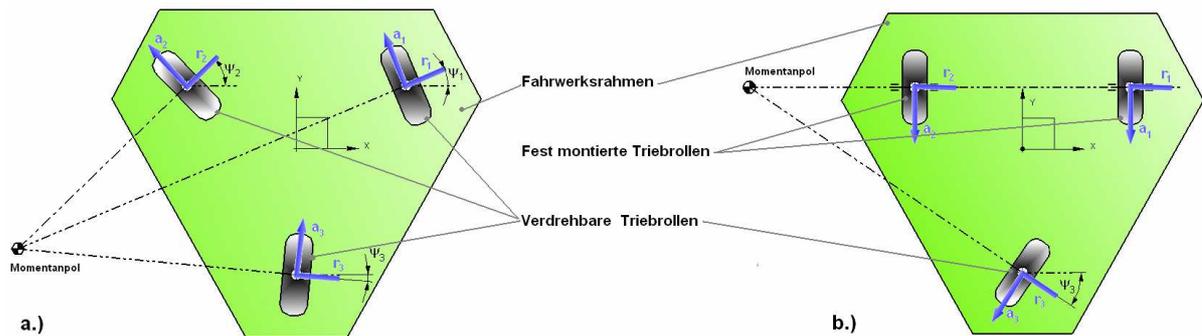


Abbildung 3. 4.: Modelle eines omnidirektionalen (a) und eines konventionellen (b) Fahrwerks

Die für den Krikkit III gewählte Kinematik ist in Abbildung 3.5 ersichtlich. Sie beinhaltet drei Omniwheels, die unter verschiedenen aber unveränderlichen Winkeln angeordnet sind. Es sei an dieser Stelle ausdrücklich darauf hingewiesen, dass die Abbildung eine Ansicht von unten zeigt. In einer Ansicht von oben erscheinen die Rollen auf den Rädern um 90° gedreht und erschweren somit ein Verständnis der Situation!

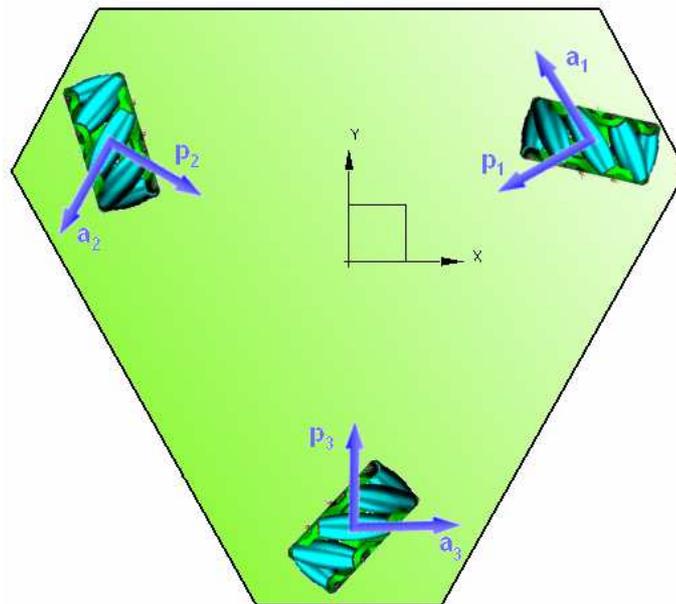


Abbildung 3. 5: Prinzipielle Gestaltung des Krikkit III-Fahrwerks

Anders als beispielsweise ein Triebbad stellt ein Omniwheel keine spezielle Anforderung an die Lage des Momentanpols. Vollständige Bestimmung vorausgesetzt, ergibt sich dessen Lage erst durch Vorgabe der jeweiligen Drehzahlen.

Folglich ergibt sich hier eine gewisse Gestaltungsfreiheit. Weder die Lage noch die Ausrichtung der Räder müssen auf spezielle Art gewählt werden, um eine Bestimmtheit der Fahrwerkskinematik sicherzustellen. Es drängt sich natürlich die Frage auf, wie eine Variation dieser Parameter das Fahrverhalten der Plattform beeinflusst.

3.1.5. VERGLEICHSGRÖSSE BESCHLEUNIGUNGSPROFIL

Bevor eine wertende Aussage über verschiedene Fahrwerksmodelle in Betracht gezogen werden kann, muss ein aussagekräftiges Vergleichskriterium gefunden werden. Die maximale Beschleunigung oder die Zeit, bis eine gewisse Geschwindigkeit erreicht wird, wie es beim PKW üblich ist, wäre denkbar. Da der Roboter aber über ein omnidirektionales Fahrwerk verfügt, reicht eine skalare Größe hier nicht aus. Eine Aussage über die Beschleunigungsfähigkeit ist als Bewertungsgrundlage aber grundsätzlich sinnvoll, da Beobachtungen des Spielverlaufs zeigen, dass Roboter nur selten ihre maximale Geschwindigkeit erreichen, sich also meist in einer Beschleunigungs- oder Verzögerungsphase befinden.

Aus diesem Grund wird folgendes Kriterium gewählt: Es wird der Bereich (2) abgesteckt, den der Roboter aus seiner Ruhelage, symbolisiert durch ein schwarzes Dreieck (1), innerhalb einer Sekunde

erreichen kann. So wird eine richtungsabhängige Aussage über die Beschleunigung des Roboters möglich. Ein vergleichbarer Parameter wird bereits in [Lue 2010] verwendet:

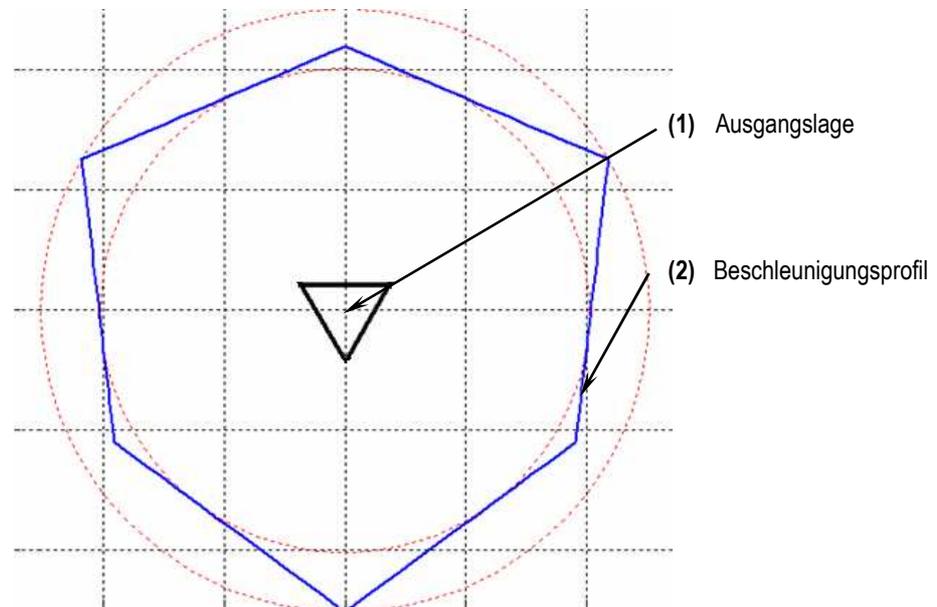


Abbildung 3. 6: Das Beschleunigungsprofil als Vergleichskriterium

Wie sich leicht erkennen lässt, zeigt dieses **Beschleunigungsprofil** insgesamt sechs Vorzugsrichtungen, also Richtungen maximaler Entfernung von der Ruhelage. Wie im Folgenden noch dargelegt wird, ist es durch geschickte Wahl verschiedener Fahrwerksparameter möglich, sowohl Lage als auch Ausprägung dieser Extrema gezielt zu beeinflussen.

Mit dem dynamischen Modell zur Vorhersage des Fahrverhaltens und dem Beschleunigungsprofil zur vergleichenden Bewertung verschiedener Konfigurationen sind nun die nötigen Werkzeuge vorhanden, um die fahrdynamische Auslegung und Optimierung des omnidirektionalen Fahrwerks in Angriff zu nehmen.

3.2. AUFGABENSPEZIFISCHE AUSLEGUNG DES FAHRWERKS

Das zuvor beschriebene Modell offenbart, dass es eine ganze Reihe von Parametern gibt, die teils massiv Einfluss auf das Fahrverhalten der Plattform nehmen. Im folgenden Kapitel werden diese Einflussgrößen zuerst systematisch analysiert und anschließend die Frage geklärt, ob sie in einer Art und Weise variiert werden können, die einen Vorteil auf dem Spielfeld der MSL bringt.

3.2.1. AUFGABENSPEZIFISCHE AUSLEGUNG UND REKONFIGURIERBARKEIT

Das Ziel der hier angestellten Überlegungen ist es zweifellos, einen Einblick in die Zusammenhänge des Fahrwerks zu gewinnen, die es erlauben, gezielt Einfluss auf das Beschleunigungsprofil der Plattform zu nehmen. Dieses Wissen kann zur Optimierung des Fahrwerksverhalten genutzt werden. Die Frage, die sich hier aufdrängt ist, was von einem optimalen Fahrwerk überhaupt erwartet wird. In anbetracht des Einsatzzwecks des Krikkit III lässt sich leicht erkennen, dass das Anforderungsprofil sehr stark von der jeweiligen Rolle am Spielfeld abhängt. So ist für einen Angreifer eine schnelle Bewegung in Richtung des gegnerischen Tors von besonderer Bedeutung, während ein quirliger Mittelfeldmotor auch in Querrichtung schnell agieren können muss. Folglich ist es also nötig, das Fahrwerk eines Roboters in Abhängigkeit von der jeweils zugeordneten Rolle am Feld zu optimieren.

Die Kehrseite dieser Strategie liegt darin, dass eine hoch spezialisierte Plattform dann auch nur noch an dieser Position sinnvoll eingesetzt werden kann. Es wäre also wünschenswert eine Lösung zu finden, die es einerseits erlaubt eine Plattform entsprechend ihrer Aufgabe zu optimieren, diese Konfiguration aber im Nachhinein auch ändern zu können. Um praktisch einsetzbar zu sein, muss eine solche Rekonfiguration mit einem Mindestmaß an Umbauten zu bewerkstelligen sein. Es ist damit wohl zu fordern, dass eine Variation der entscheidenden Komponenten keinen Einfluss auf die benachbarten Bauräume haben darf, da sonst das gesamte Fahrwerk umgebaut werden müsste. Die Lage der Räder ist damit nur noch schwer zu verändern. Was ihre Orientierung angeht, sieht die Situation, speziell beim ohnehin modular aufgebauten Krikkit III, etwas anders aus. Es ist hierbei nämlich nicht nötig, das gesamte Omniwheel zu schwenken, sondern nur die aktive Achse und das kann auch durch eine umgestaltetes der Mecanum Wheels geschehen. Ersetzt man es beispielsweise durch ein normales 90° Omniwheel, kommt das einer Drehung des repräsentierenden Koordinatensystems um 45° gleich. Doch auch die gesamte Bandbreite dazwischen ist denkbar. So muss der Verdrehwinkel zwischen Rad- und Rollenachse nicht, wie es beim Mecanum Wheel der Fall ist, 45° betragen, sondern kann beinahe jeden Wert zwischen $+90^\circ$ und -90° einnehmen.

Der zweite leicht einzustellende Parameter ist der Schwerpunkt. Betrachtet man das Fahrwerk des Krikkit III näher, fallen einem über die gesamte Plattform verteilt ungenutzte Bauräume auf. Diese sind oft recht klein und ungünstig geformt, so dass sie für funktionale Baugruppen nicht genutzt werden können. Dort platzierte Zusatzmassen unterschiedlicher Größe stellen jedoch Freiheitsgrade dar, mit deren Hilft der Schwerpunkt des gesamten Systems leicht verschoben werden kann. Der Nachteil dieser Herangehensweise ist, dass sie zwangsläufig zu einer Erhöhung der Gesamtmasse beiträgt. Vorteilhafter wäre hier die Verschiebung von Baugruppen, deren Lage nicht funktionskritisch ist.

Das Konzept des rekonfigurierbaren Fahrwerks ist, wie sich leicht erkennen lässt, nicht einmal ansatzweise erforscht. Es soll aber an dieser Stelle Erwähnung finden, um eventuell als Anstoß für Folgearbeiten zu dienen.

3.2.2. PARAMETER UND DEREN EINFLÜSSE

Die Kapitel 3.1.4 und 3.1.5 deuten schon an, welche Parameter für das Fahrwerk von entscheidender Bedeutung sind. Die wichtigsten davon werden im Weiteren hinsichtlich ihrer Wirkungsweise und ihres Einflusses auf das Beschleunigungsprofil untersucht.

Es sei an dieser Stelle nochmals darauf hingewiesen, dass in den folgenden Abbildungen normale Omniwheels anstelle der am Roboter verwendeten Mecanum Wheels eingezeichnet sind, da die zugrunde liegenden Überlegungen ohnehin auf dem abstrahierten Modell basieren. Die konstruktive Ausführung ist daher zwar für die Theorie belanglos, die Schrägstellung der Rollen am Mecanum Wheel macht das Verständnis der Zusammenhänge aber erfahrungsgemäß unnötig kompliziert.

3.2.2.1. Reibung

Die Bedeutung der Reibung für das Fahrverhalten des Roboters ist in erster Linie von den verwendeten Antrieben abhängig. Werden nur schwache Aktoren verbaut, ist der Flaschenhals bei Beschleunigungsvorgängen in erster Linie in den verfügbaren Antriebsmomenten zu finden.

Bei ausreichend stark motorisierten Fahrwerken, wie sie in der MSL üblich sind, wird der erreichbare Vortrieb durch die maximal übertragbare Reibkraft F_R beschränkt. Dies hängt nach der folgenden Gleichung einerseits von der wirkenden Normalkraft F_n am Rad und andererseits von der Materialpaarung der berührenden Teile, repräsentiert durch den Reibkoeffizienten μ , ab.

$$F_R := F_n \cdot \mu \qquad \text{Gl. 3.2}$$

[Lue 2010] zeigt darüber hinaus einen normalkraftabhängigen Reibkoeffizienten, der sich aber in erster Linie aus der, im weitesten Sinne Zahnrad ähnlichen, Geometrie der dort verwendeten Omniwheels erklären dürfte. Dies führt neben der offensichtlichen kraftschlüssigen Verbindung zu einem überlagerten Formschluss, der in Form eines erhöhten Reibkoeffizienten berücksichtigt wird. Da die Kontur des Mecanum Wheels in erster Näherung aber einem Kreis entspricht ist, ein derartiger Effekt hier nicht zu erwarten.

Es bleibt also die Normalkraft als dynamische Einflussgröße. Daher gilt, dass eine hohe Normalkraft eine hohe Reibkraft erlaubt, was wiederum zu einem hohen Vortrieb führt. Pauschal lässt sich daher sagen, dass es das Ziel einer Konfiguration sein muss, die Normalkraft auf jene

Räder zu verteilen, die in der Momentanbewegung für den Vortrieb nötig sind. Die Erkenntnis bildet die Grundlage für die meisten der folgenden Überlegungen.

3.2.2.2. Schwerpunktslage

Die Lage des Schwerpunkts hat entscheidenden Einfluss auf das Fahrverhalten der Plattform. Hier ist zu unterscheiden zwischen einer Variation der Schwerpunktslage in der Grundrissebene und einer Veränderung der Schwerpunkthöhe. Die dabei auftretenden Effekte sind unterschiedlich.

Die Erstprojektion des Schwerpunkts beeinflusst die statische Reaktionskraft in den Radaufstandspunkten. Je weiter ein Rad vom Schwerpunkt entfernt ist, desto geringer ist die dort wirkende Kraft. Dieser Zusammenhang lässt sich mit einfachen statischen Gleichgewichtsbedingungen zeigen.

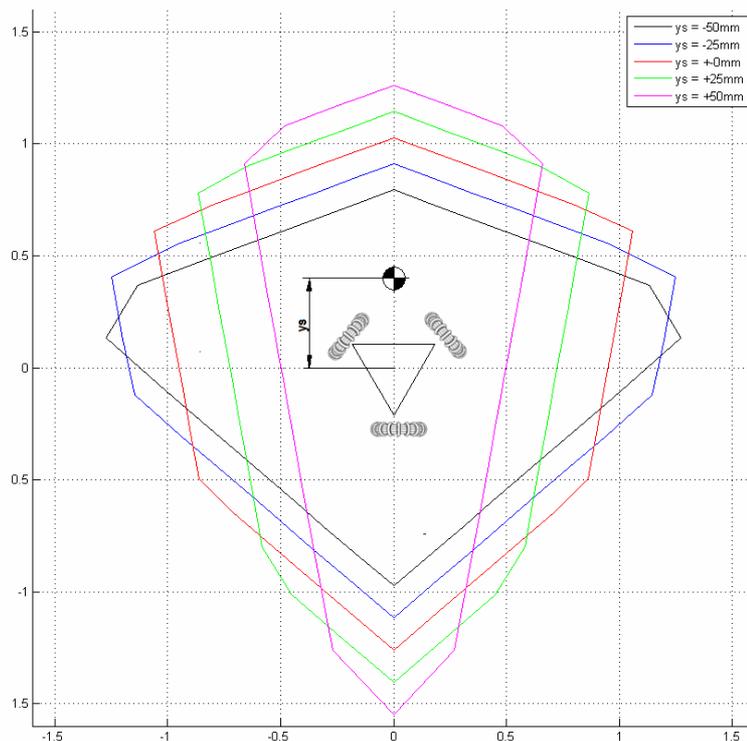


Abbildung 3. 7: Beschleunigungsprofile bei einer Variation der Schwerpunktslage entlang der Y-Achse

In Abbildung 3.7 ist eine Studie des Beschleunigungsprofils dargestellt. Durch die Variation der Y-Koordinate des Schwerpunkts wird die Belastung der beiden vorderen Räder verändert. Es zeigt sich, dass eine weit vorne liegende Schwerlage zu einer hohen Radaufstandskraft auf den vorderen Rädern führt. Dieser Umstand bevorzugt Beschleunigungen in alle Richtungen, für die diese Räder maßgeblich sind. Es kommt zu einer Verzerrung des Beschleunigungsprofils entlang der Y-Achse.

Eine Verlagerung des Schwerpunkts nach hinten führt zu einer erhöhten Belastung des Heckrads, was kinematikbedingt in einer gesteigerten Beschleunigungsfähigkeit in Querrichtung resultiert. Hierbei gilt es zu beachten, dass die Y-Achse eine Symmetrieachse des Modells darstellt, dadurch erklärt sich auch das symmetrische Beschleunigungsprofil.

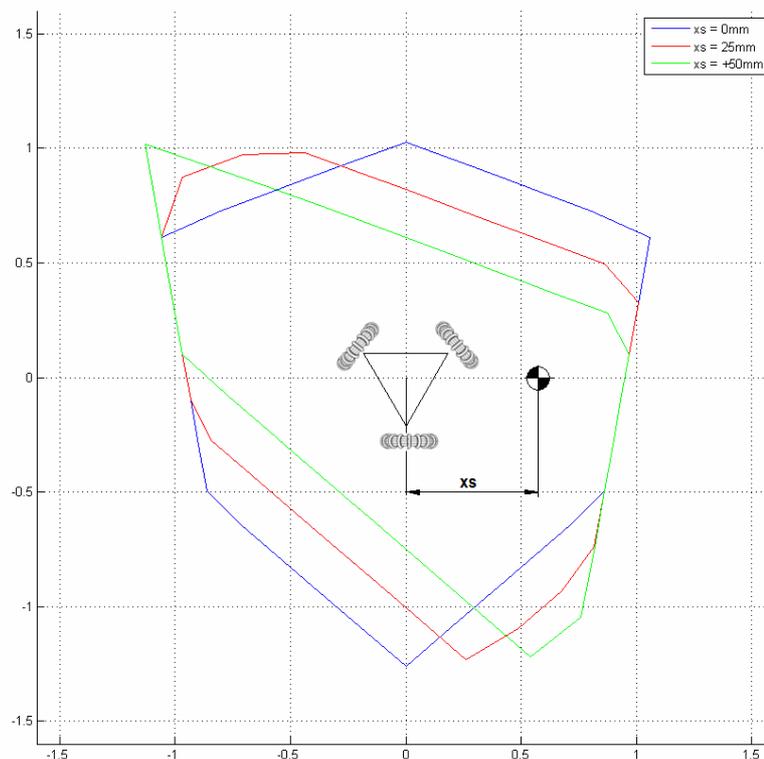


Abbildung 3. 8: Beschleunigungsprofile bei einer Variation der Schwerpunktslage entlang der X-Achse

Eine Verlagerung der Schwerlage entlang der X-Achse, wie in Abbildung 3.8 gezeigt, führt zu einer asymmetrischen Kraftverteilung auf alle drei Räder. Als Folge ist im Beschleunigungsprofil eine zunehmende Verzerrung zu erkennen, die einer veränderten Ausrichtung der primären Vorzugsrichtung entspricht. Aus jetziger Sicht muss eine solche Variation als begrenzt sinnvoll angesehen werden.

Ein durchaus entscheidender Parameter ist die Höhe des Schwerpunkts über dem Radaufstandspunkt. Im Verlauf der Beschleunigung tritt, in erster Näherung im Schwerpunkt, die zum Beschleunigungsvektor antiparallele d'Alambert'sche Trägheitskraft \mathbf{T} auf, die von der Masse \mathbf{m} und der wirkenden Beschleunigung \mathbf{a} abhängt.

$$\mathbf{T} := \mathbf{m} \cdot \mathbf{a} \qquad \text{Gl.3.3}$$

Diese verursacht, mit der Schwerhöhe als Hebelarm, ein Moment. Das nötige Reaktionsmoment zur Wiederherstellung eines statischen Gleichgewichts entsteht durch eine dynamische

Umschichtung der Radaufstandskräfte. Die verfügbare Reibkraft zwischen den entlasteten Rädern und dem Untergrund schrumpft.

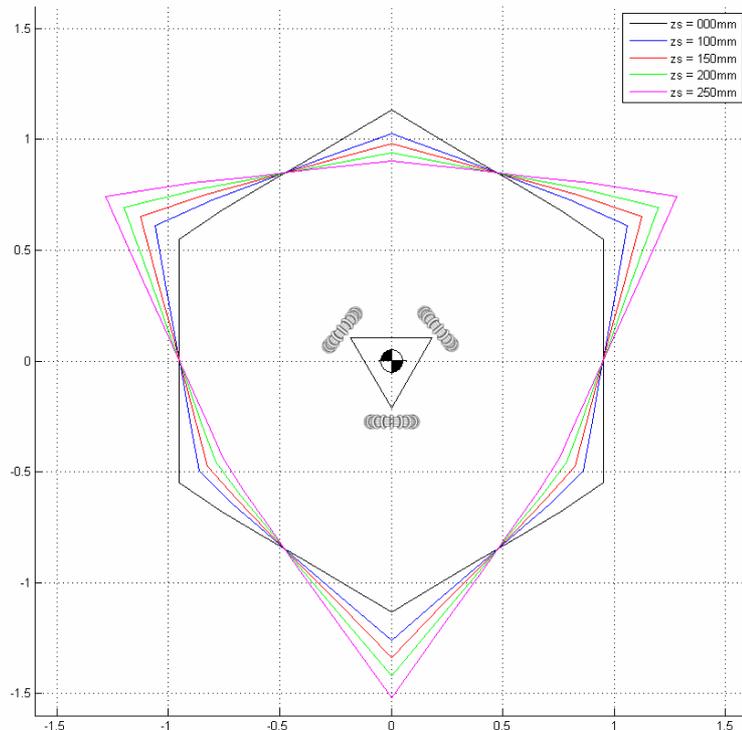


Abbildung 3. 9: Beschleunigungsprofile bei einer Variation der Schwerpunkthöhe

Als Folge ist die verfügbare Vortriebskraft von der aktuellen Beschleunigung abhängig. Im Fall einer Bewegung entlang der Y-Achse tritt erneut der Fall ein, dass die beiden vorderen Räder die Plattform antreiben, während das Rad am Heck still steht. Bei einer Beschleunigung in Richtung positiver Y-Achse werden eben diese Räder entlastet. Der Effekt ist umso stärker, je größer die Schwerpunkthöhe ist. Es zeigt sich also eine verringerte Beschleunigungsfähigkeit nach vorne mit steigender Höhe des Schwerpunkts. Der genau umgekehrte Fall tritt bei einer Beschleunigung in Rückwärtsrichtung ein.

Hier kommt es zu einer erhöhten Radaufstandskraft auf den treibenden Rädern, die hintere Vorzugsrichtung wird dominant. Ein entsprechendes Verhalten ist wiederum entlang aller Symmetrieachsen des Roboters zu erkennen.

3.2.2.3. Lage der Radaufstandspunkte

Auch die Lage der Radaufstandspunkte nimmt Einfluss auf das Fahrverhalten der Plattform. Sowohl die statische Radlast, als auch deren Veränderung während einer Beschleunigung sind von der Erstprojektion des Abstands des Radaufstandspunktes zum Schwerpunkt abhängig. Wird ein Rad also näher zum Schwerpunkt gerückt, hat das eine Entlastung der anderen Räder zur Folge.

Der Effekt ist also mit dem bei einer Variation der Schwerpunktslage in der Grundrissebene vergleichbar.

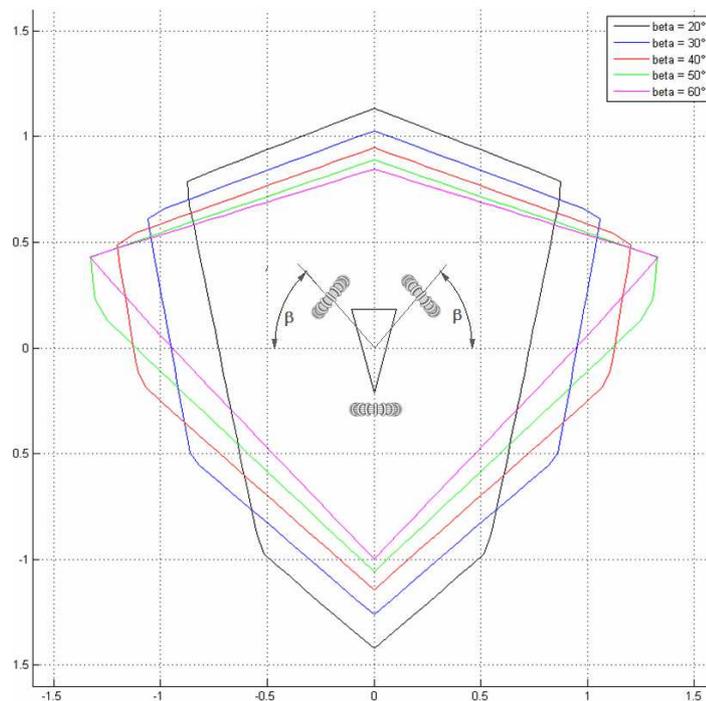


Abbildung 3.10: Beschleunigungsprofile bei einer Variation der Radaufstandspunkte

Beim in Abbildung 3.10 dargestellten Beschleunigungsprofil werden die beiden vorderen Räder bei konstantem Radaufstandsradius r_1 durch Veränderung des Winkels φ_i ($\varphi_1 = \beta$ und $\varphi_2 = 180 - \beta$) näher zur X-Achse des Roboters gedreht. Dies entspricht einer Erhöhung des Abstandes zum Schwerpunkt entlang der X-Achse und einer Verringerung entlang der Y-Achse.

Es sei ausdrücklich darauf hingewiesen, dass diese Variation nur die Lage, nicht aber die Orientierung des Rades betrifft. Die Deformation des Beschleunigungsprofils ist der in Abbildung 3.7 beobachteten äquivalent.

3.2.2.4. Orientierung der Räder

Die Orientierung der Räder, also die Ausrichtung der aktiven Achsen, ist einer der entscheidenden Faktoren bei der Berechnung der Vorwärtskinematik eines Fahrwerks. Im Gegensatz zu den meisten der vorher genannten Parameter ist sie daher nicht nur für die Frage nach der größtmöglichen Beschleunigung, sondern auch für die nach der maximalen stationären Geschwindigkeit von Interesse.

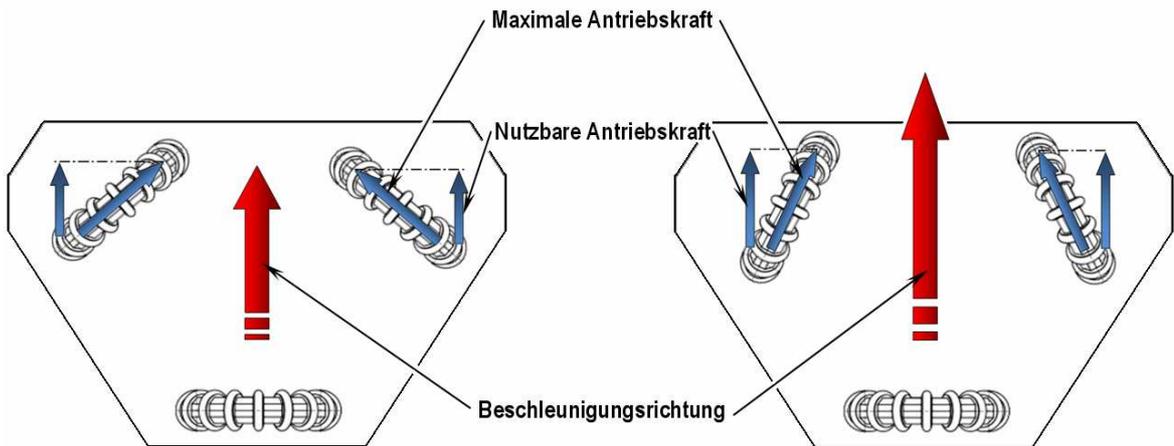


Abbildung 3. 11: Einfluss der Orientierung der Omniwheels auf die Beschleunigungsfähigkeit

Jedes Rad ist in der Lage, eine gewisse maximale Antriebskraft zu erzeugen. Für die Beschleunigung nutzbar ist allerdings nur derjenige Anteil, der in Richtung des Beschleunigungsvektors wirkt. Je kleiner also der Winkel zwischen der aktiven Achse eines Omniwheels und der Beschleunigungsrichtung ist, desto größer ist der nutzbare Anteil der Antriebskraft. Die Orientierung ist jedoch immer ein Kompromiss, denn wird ein Rad so ausgerichtet, dass es eine Beschleunigung in eine Richtung besonders gut unterstützt, so ist der Beitrag zu einer um 90° gedrehten Bewegung sehr gering.

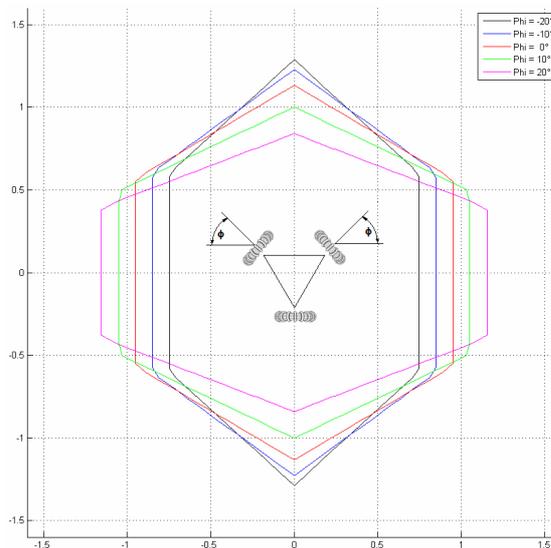


Abbildung 3. 12: Beschleunigungsprofile bei einer Variation der Orientierung der Omniwheels

Eben dieses Verhalten lässt sich aus dem Beschleunigungsprofil in Abbildung 3.12 ablesen. Richtet man die vorderen beiden Räder stärker an der Y-Achse aus, steigt die Beschleunigung in diese Richtung nennenswert an. Die Querbeschleunigung sinkt hingegen merklich ab.

Der Extremfall ist dann erreicht, wenn der im Profil mit ϕ bezeichnete Winkel gegen 90° geht. Eine solche Konfiguration erreicht zwar die maximale Beschleunigung in Querrichtung, in Längsrichtung ist die Geschwindigkeit nicht mehr bestimmt, da alle drei passiven Achsen in diese Richtung verlaufen.

3.2.3. VERSCHIEDENE VARIATIONEN.

Ein detailliertes Verständnis der Parameter eines omnidirektionalen Fahrwerks erlaubt es nicht nur, das Fahrverhalten der Plattform überschlüssig vorherzusagen, sondern auch es gezielt zu beeinflussen. Oftmals ist es dabei Ziel der Modifikation, das Beschleunigungsprofil so gleichmäßig wie möglich zu halten, um die Omnidirektionalität bestmöglich auszuspielen zu können. Gerade bei Fußball spielenden Robotern tritt oft der entgegengesetzte Fall auf. Werden Robotern spezielle Rollen am Feld zugeordnet, so entstehen aus der jeweiligen Spielstrategie heraus Vorzugsrichtungen, in die eine besondere Beschleunigungsfähigkeit wünschenswert ist. Mit einer gekonnten Variation der zuvor erarbeiteten Parameter lässt sich eine dementsprechende Verzerrung des Beschleunigungsprofils erreichen.

Es soll jedoch nicht unerwähnt bleiben, dass eine derartige Anpassung weitreichende Folgen für die künstliche Intelligenz des Roboters hat. Will man einen Mehrwert aus den eingestellten Vorzugsrichtungen ziehen, so verkomplizieren sich Probleme wie etwa die Planung des optimalen Pfads, weil dann nämlich der kürzeste nicht mehr unbedingt der schnellste Weg ist.

3.2.3.1. Krikkit III

Die Konfiguration des Krikkit III ist vom Gedanken eines möglichst symmetrischen Profils geprägt, um einerseits die Software nicht mit einer weiteren grundlegenden Neuigkeit zu überfordern, und andererseits die universelle Einsetzbarkeit zu wahren. Es wird durch folgenden Parametersatz beschrieben:

Größen	Rad 1	Rad 2	Rad 3
r_i [mm]	210	210	220
ϕ_i [°]	30	150	270
ψ_i [°]	90	90	90
Größen	X	Y	Z
Schwerpunktlage [mm]	-2	26	116

Tabelle 3. 2: Parametersatz des Krikkit III

An dieser Stelle sei erwähnt, dass die Schwerpunktskoordinaten der CAD- Software entnommen sind, also eher den Status eines Schätzwerts besitzen. Außerdem sind sie, im Gegensatz zur

Anordnung und Orientierung der Räder nicht frei gewählt, sondern ein Kompromiss aus den Wünschen bezüglich des Fahrverhaltens und der technischen Realität. Besonders was die Schwerpunktshöhe angeht, die mit 116 mm unbefriedigend hoch liegt, ist ein geringer Wert zwar wünschenswert, aber aufgrund der vorgegebenen Lage mancher schwerer Komponenten einfach nicht machbar.

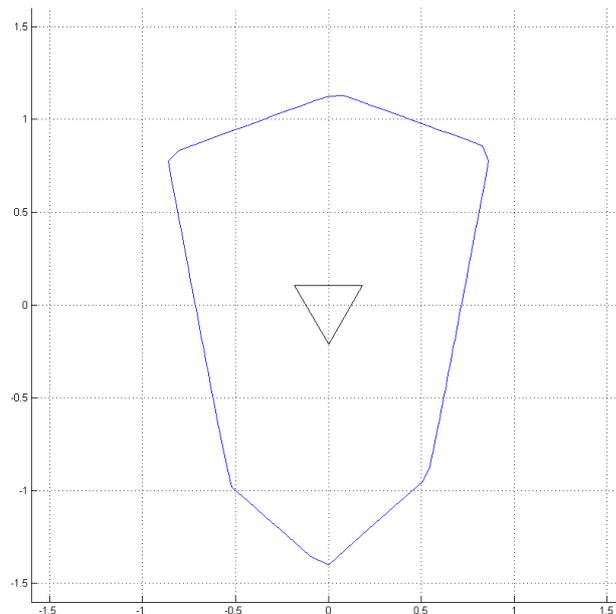


Abbildung 3. 13: Beschleunigungsprofil des Krikkit III

Abbildung 3.13 zeigt, dass das Ziel eines symmetrischen Beschleunigungsprofils nicht ganz erreicht werden konnte. Die leichte Längung resultiert wie, bereits angedeutet, aus dem etwas vorgelagerten Schwerpunkt. Auch die unbefriedigend hohe Schwerpunktslage hat hier einen ungünstigen Einfluss.

3.2.3.2. Manndeckung

Eine sehr spezielle Rolle am Spielfeld ist der Manndecker. Die Aufgabe dieses Spielers besteht darin, einen speziellen Gegner zu verfolgen und dabei zu verhindern, dass er angespielt werden kann. Es handelt sich dabei also um einen Akteur, der eher reagiert als selbst Initiativen setzt, was aber auch bedeutet, dass sein Gegenspieler immer einen gewissen zeitlichen Vorsprung hat, den der Manndecker mit einer hohen Beschleunigungsfähigkeit ausgleichen muss. Der Einsatzort des Manndeckers sollte in der MSL vor allem zwischen dem Gegner und dem Ball liegen, wobei der Kicker auf den Ball gerichtet ist. Um einem gegnerischen Angreifer vor allem bei Bewegungen in Richtung eigenes Tor folgen zu können, ist eine dominante Vorzugsrichtung nach hinten

erforderlich, darüber hinaus sind hohe Beschleunigungen in Querrichtung wünschenswert, um nicht umspielt zu werden.

Größen	Rad 1	Rad 2	Rad 3
r_i [mm]	180	180	240
φ_i [°]	35	135	270
ψ_i [°]	98	82	90
Größen	X	Y	Z
Schwerpunktlage [mm]	0	10	280

Tabelle 3. 3: Parametersatz der kinematischen Studie „Manndecker“

Tabelle 3.3 zeigt eine besonders asymmetrische Konfiguration. Auffällig sind dabei der hoch liegende Schwerpunkt und der kleine Radius der vorderen Räder.

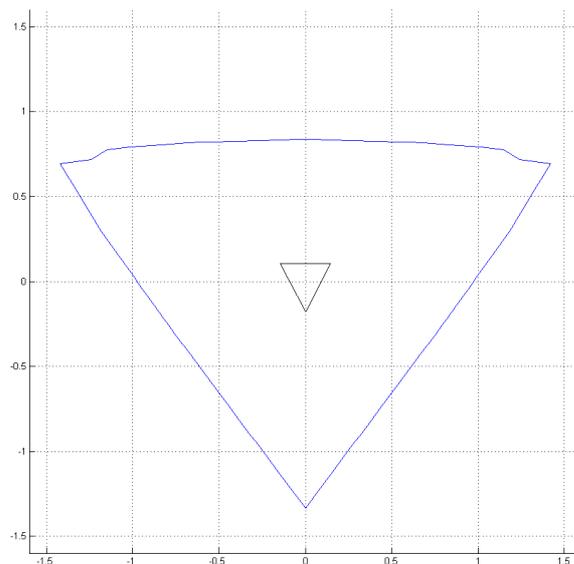


Abbildung 3. 14: Beschleunigungsprofil der kinematischen Studie „Manndecker“

Das Profil zeigt nur noch drei ausgeprägte Vorzugsrichtungen, eine davon gerade nach hinten. Der Schlüssel zum Erfolg liegt hierbei sowohl im hochgelegenen Schwerpunkt, der eine Beschleunigung nach hinten begünstigt, als auch in den beiden nahe am Schwerpunkt liegenden vorderen Rädern. Die hohe Querbeschleunigung wird durch die eher flache Orientierung der aktiven Achsen erreicht, die die Beschleunigung nach hinten wiederum ein wenig reduziert.

Die Steuerung der Radaufstandskräfte ist bei dieser Konfiguration so ausgereizt, dass es bei maximaler Beschleunigung nach hinten beinahe zum Abheben des Heckrades kommt. Wie weit es der Realität sinnvoll ist, derart stark an physikalische Grenzen zu gehen, sei dabei dahingestellt.

3.3. MECANUM WHEELS

Das Mecanum– Wheel (MW) gehört zur Familie der omnidirektionalen Räder. Es wurde 1973 von Bengt Ilo im Auftrag der schwedischen Firma Mecanum AE entwickelt und zum Patent eingereicht³⁸. Später erwarb die US-Navy alle Rechte an der Erfindung, die nach Ablauf des Patentschutzes mittlerweile frei zugänglich ist.

Die Geometrie eines MW ist deutlich aufwändiger als jene, anderer omnidirektionaler Räder. Im Folgenden sollen die grundsätzlichen Überlegungen, die zu dessen Gestalt führen erläutert, sowie mögliche Abweichungen und deren Auswirkungen beleuchtet werden.

3.3.1. GRUNDGEDANKE DES OMNIWHEELS

Das MW kommt in erster Linie in Anordnungen zum Einsatz, bei denen die Räder an den vier Ecken eines Quadrats liegen und deren Achsen parallel zu einer Seitenkante sind. Möchte man ein Fahrwerk, wie es etwa bei PKWs oder vielen Flurfördermitteln zu finden ist, omnidirektional gestalten, scheitert man mit herkömmlichen Omniwheels zwangsläufig. Da die passiven Vektoren bei derartigen Rädern immer entlang der Radachsen verlaufen, entsteht in Fahrzeug-Querrichtung eine Unterbestimmung. Das Fahrzeug könnte ohne Widerstand verschoben werden.

Die Lösung besteht also darin, die passiven Vektoren unter einem Winkel zur Radachse anzuordnen. Erreicht wird das durch eine Schrägstellung der am Radumfang liegenden Rollen um 45°

Darüber hinaus fordert Ilo, dass die Hüllkurve der Radgeometrie ein Zylinder ist, was in der Anwendung bedeutet, dass das ideale Omniwheel beim Abrollen keine Schwingungen in vertikaler Richtung induziert, da der Radius des Berührungspunktes unverändert bleibt.

3.3.2. DAS IDEALE MECANUM- WHEEL³⁹

Gleich wie andere Omniwheels ist auch das MW am Umfang mit Rollen ausgestattet. Das Rad selbst rotiert um die Radachse a . Rund um a sind n Rollen angeordnet, deren Achsen r windschief zur Radachse liegen. Ihr Normalabstand beträgt die Exzentrizität e . Im Normalfall schließen sie einen Winkel von 45° ein, dabei ist die Anordnung der Achsen r symmetrisch um die Radachse. Durch diese Anordnung ergibt sich wieder ein Rad mit einer aktiven und einer passiven Richtung.

³⁸ Vgl. [Ilo 1975]

³⁹ Vgl. [Gfr 2008]

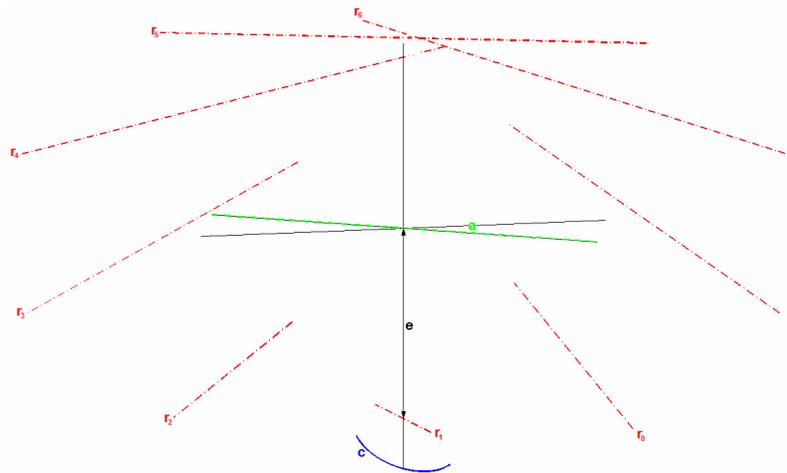


Abbildung 3. 15: Geometrische Zusammenhänge am Mecanum-Wheel

Die große Herausforderung liegt nun in der rechnerischen Beschreibung der Erzeugenden \mathbf{c} einer Rolle. Sie lässt sich aus zwei Forderungen konstruieren. Zum Einen soll sich das Abrollverhalten des Omniwheel von dem des umschriebenen Zylinders nicht unterscheiden. Dieser berührt den Boden entlang einer Geraden, die der Normalprojektion der Radachse auf den Boden entspricht. Um ein identes Verhalten zu erzielen, muss auch der Kontaktpunkt zwischen Rad und Boden auf dieser Projektion liegen.

Zum Zweiten handelt es sich bei den Rollen, wie der Name schon andeutet, um Rotationskörper. Sucht man also den Kontaktpunkt des Körpers mit der waagrecht liegenden Ebene, die den Boden repräsentiert, so findet sich diese zwingend wieder auf der Normalprojektion der Rollachse auf eben diese Ebene.

Lässt man das Rad über den Eingriffswinkel einer Rolle laufen, so erhält man aus diesen beiden Bedingungen eben jene Raumkurve \mathbf{e} , die als Erzeugende für die Rollen des idealen Mecanum-Wheels dient.

Sie ist eine mögliche, jedoch nicht die einzig denkbare Kurve die diese Aufgabe erfüllt. Vor allem aus Sicht der späteren Realisierung wäre eine ebene Erzeugende deutlich angenehmer. Diese ist sehr einfach zu erreichen, indem jeder Punkt der Raumkurve auf einer coaxialen Kreisbahn um die Rollenachse rotiert wird, bis er die gemeinsame Ebene \mathbf{e} erreicht hat.

Die so entstehende ebene Kurve ist grundsätzlich beispielsweise für eine Drehoperation einsetzbar.

3.3.3. DAS REALE MECANUM-WHEEL

Wie schon ausführlich erläutert, verursacht das ideale Mecanum-Wheel ein ideales, in vertikaler Richtung erschütterungsfreies Abrollen. Es ist zu erwarten, dass diese Aussage in der Realität nicht uneingeschränkt gültig ist. Neben geometrischen Vereinfachungen sind vor allem Fertigungs- und Montagetoleranzen als Gründe dafür zu nennen.

Hier stellt sich vor allem die Frage nach einer möglichen Verbesserung im Vergleich zum Vorgängermodell. Da die Geometrie der Rollen aus ökonomischen Überlegungen vom Krikkit II übernommen wird, ist ein Fortschritt nur über eine Verringerung der Toleranzen möglich.

Als Vergleichskriterium hierfür wird vorerst der Rundlauf gewählt. Im Roboter eingebaut, dient das Rad als Verbindung zwischen Radlager und Boden. Der Radius des Rades definiert hierbei die Höhe des Roboters. Schwankungen im Radradius führen damit zwangsläufig zu Schwingungen in vertikaler Richtung.

3.3.3.1. Approximation der idealen Geometrie

Die unter „3.3.2 Das ideale Mecanum-Wheel“ ermittelte ebene Erzeugende der Rollenfläche ist zwar mittels einer CNC-gesteuerten Drehbearbeitung herstellbar, aber dennoch recht aufwändig. Deshalb wurde bei der Entwicklung des Krikkit II entschieden, sie durch ein Kreissegment zu approximieren.

Ein Vergleich von idealer und approximierten Kontur findet sich in Abbildung 3.16.

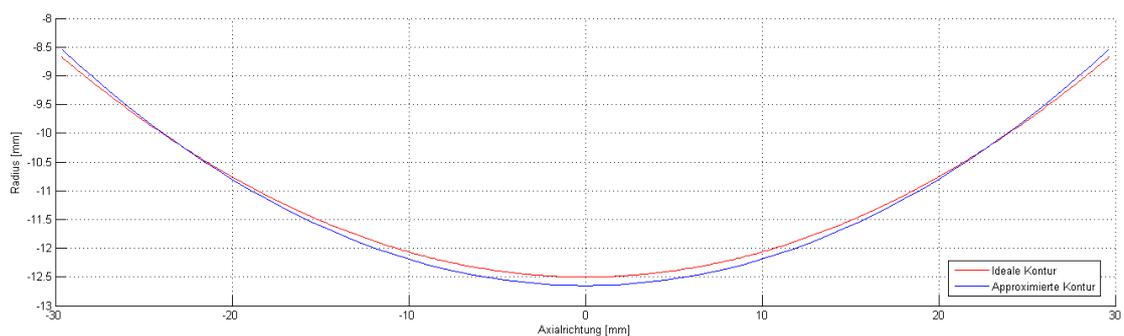


Abbildung 3. 16: Vergleich der idealen und approximierten Erzeugenden der MW-Rollen

Wie leicht verständlich ist, hat eine Näherung der Rollenerzeugenden auch eine Abweichung der Hüllkurve vom idealen Zylinder zur Folge, beim Abrollen des Rades entsteht ein Rundlauffehler.

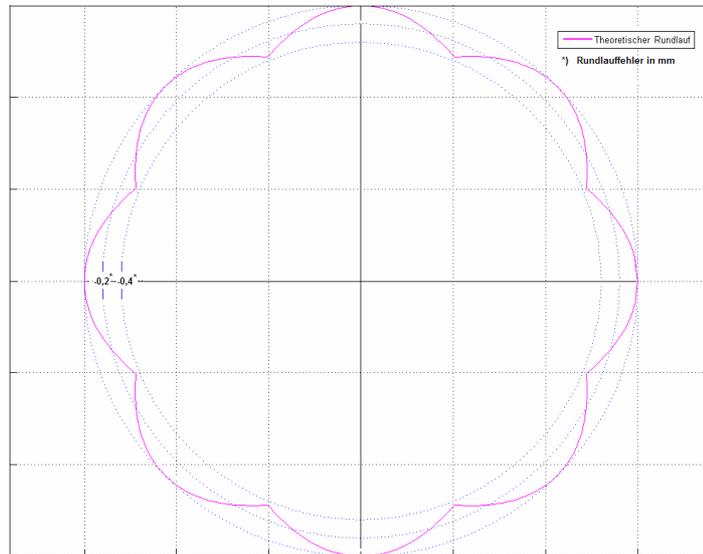


Abbildung 3. 17: Theoretischer Rundlauffehler nach der Approximation der Rollenerzeugenden

Abbildung 3.17 zeigt, dass bereits durch diese Vereinfachung ein Rundlauffehler von bis zu 0,4 mm Auftritt.

3.3.3.2. Rundlaufprüfstand

Die errechneten Ergebnisse gilt es nun in weiterer Folge messtechnisch zu verifizieren. Die Rundlaufmessung am Omniwheel gestaltet sich als recht kompliziert, da der Auflagepunkt, also der Kontaktpunkt zwischen berührender Rolle und Taster, ständig entlang der Radachse wandert. Außerdem liegen beim Übergang des Berührungspunktes von einer Rolle zur nächsten kurzzeitig beide Rollen auf.

Daher scheidet ein Taster mit *Punktberührung* von vornherein aus. *Linienberührung* wäre eine durchaus denkbare Lösung. Die Problematik dieser Anordnung ist erstens, dass die Ausrichtung des Tastkopfes zum Rad genau eingehalten werden muss. Die Messeinrichtung ist dabei so einzustellen, dass der vermessene Radius, die theoretische Berührlinie und die Radachse in einer Ebene liegen. Ist diese Bedingung nicht erfüllt, ergibt sich ein erhöhter Messfehler. Darüber hinaus gibt ein solcher Aufbau die Situation bei elastischer Deformation der Rollen nur unzureichend wieder.

In Anbetracht dessen wurde eine Anordnung mit einer *Fläche* als Tastelement gewählt. Sie repräsentiert in guter Näherung den Boden während des Abrollens. Die relevanten geometrischen Randbedingungen stellen sich daher automatisch so ein, wie sie es im Fahrbetrieb tun.

Die einzige sicherzustellende Randbedingung ist, dass der Flächennormalvektor der Tasterfläche ebenfalls normal auf die Radachse steht, da auch das Rad mit einer Achse, parallel zum Boden eingebaut wird.

Der Aufbau des Prüfstands ist in Abbildung 3.18 zu sehen. Als Basis für die gesamte Vorrichtung wird eine konventionelle Drehmaschine verwendet. Sie verfügt von vornherein über eine drehbare Achse hoher Genauigkeit samt dazugehöriger Spannvorrichtung, ist also ideal für diese Anwendung. Das zu vermessende Omniwheel (2) wird über dessen Lagersitz im Backenfutter (1) gespannt. Nun gilt es, zwei korrelierende Größen zu messen, nämlich den Drehwinkel des Rades und die zugehörige Abweichung im Radius. An dieser Stelle sei erwähnt, dass die radiale Auslenkung lediglich als relative Abweichung eine Aussagekraft besitzt. Der absolute Radius an jeder Stelle kann aufgrund des Fehlens einer brauchbaren Referenz nicht ermittelt werden.

Die Tastscheibe (3), die am Rad aufliegt, ist am Pneumatikzylinder (5) angebracht. Dieser erfüllt eine Doppelaufgabe. Einerseits dient er als Führungselement für den Taster und andererseits sorgt er für eine definierte Anpresskraft. Die radiale Bewegung der Tastscheibe kann auf der Messuhr (4) abgelesen werden. Der zugehörige Winkel wird mit Hilfe der Nadel (6) auf der Winkelskala (7) ersichtlich. Die Datenerfassung erfolgt manuell.

Es sind grundsätzlich zwei Arten von Versuchen, ein statischer und ein rollender, denkbar. Beim statischen Versuch wird die Tastscheibe vom Rad abgehoben, bevor es um ein Inkrement weitergedreht wird. Als Folge bleibt die relative Lage zwischen Rollen und Rad unverändert. Ein derartiges Vorgehen minimiert den Einfluss einer fehlerhaften Rollengeometrie.

Im rollenden Versuch bleibt der Taster angepresst, während der Omniwheel bewegt wird. Die berührende Rolle rollt an der Gegenfläche ab. Daher ist zu erwarten, dass dieser Versuch die realen Umstände eher wiedergibt, weshalb dieser Ansatz im Weiteren auch verfolgt wird.

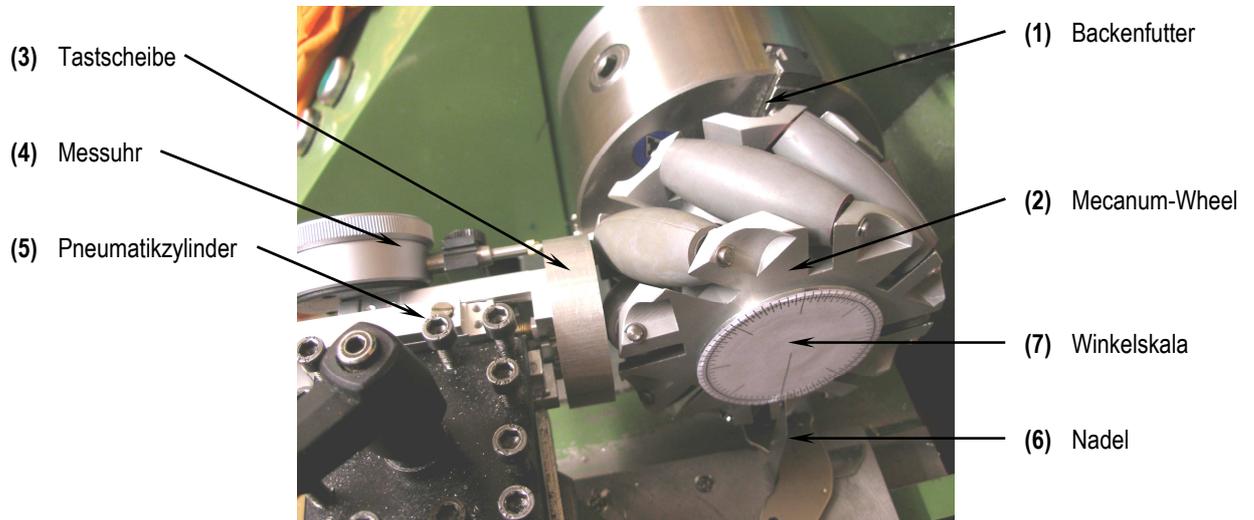


Abbildung 3. 18: Rundlaufprüfstand im Betrieb

3.3.3.3. Diskussion der Ergebnisse

Abbildung 3.19 zeigt den Rundlauf des realen Omniwheel (rot) und der approximierten Geometrie (blau) im Vergleich, wobei die Abweichung vom idealen Radius jeweils um den Faktor 20 vergrößert wurde.

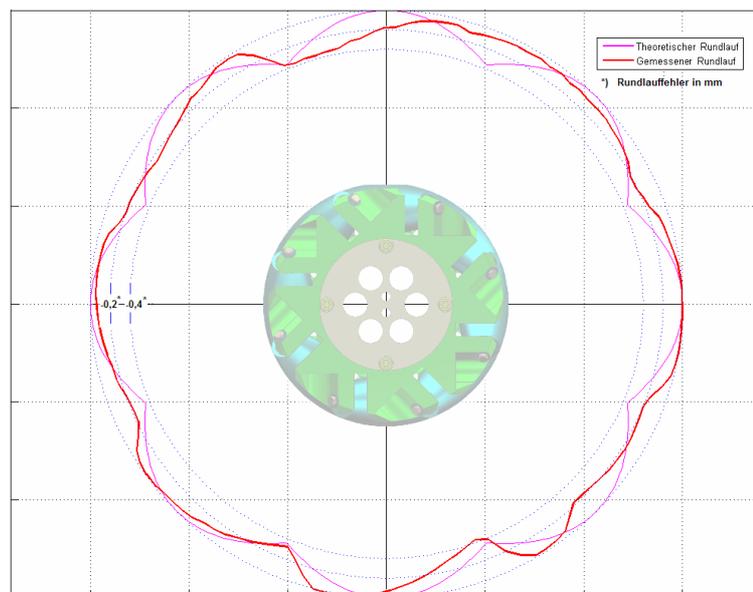


Abbildung 3. 19: Ergebnis der rollenden Rundlaufmessung am Omniwheel des Krikkit III

Die Messung liefert dabei ein bemerkenswertes Ergebnis. Das vermessene Rad zeigt weitestgehend die Amplitude, die nach der geometrischen Berechnung zu erwarten war, der

genaue Kurvenverlauf ist in manchen Bereichen des Umfangs sogar kontinuierlicher als zu erwarten gewesen wäre.

Darüber hinaus zeigt sich, dass im Messergebnis die Übergänge von einer Rolle zur nächsten zwar deutlich erkennbar sind, die genaue Form der Kurve in einigen Bereichen doch deutlich von der vorhergesagten abweicht.

Ein derartiges Ergebnis verlangt nach einer gründlichen Ursachenforschung. Eine plausible Erklärung für die Verringerung des Rundlauffehlers liegt in der elastischen Verformung der Rollen. Abbildung 3.20 zeigt, dass diese bereits bei geringen Normalkräften eine nennenswerte Größe erreichen.

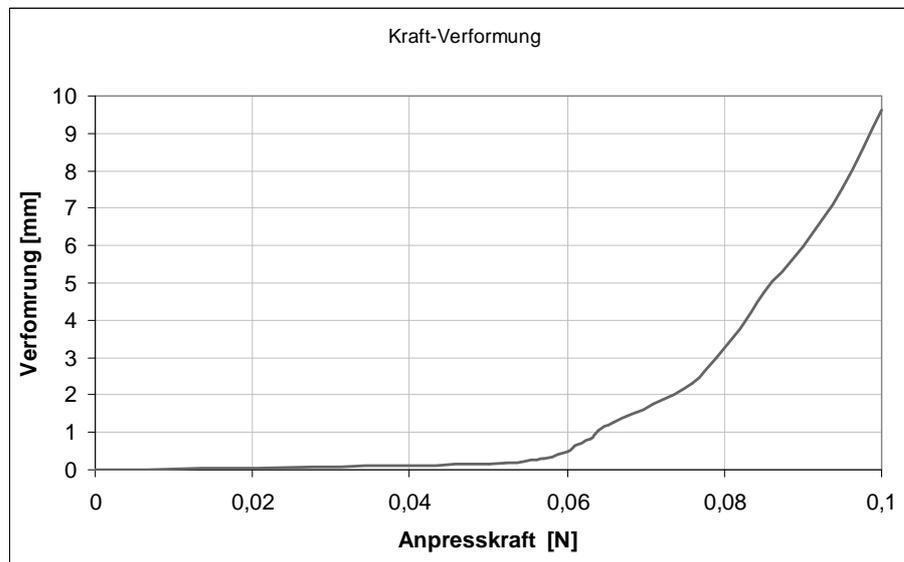


Abbildung 3. 20: Verformung der Omniwheel- Rolle in Abhängigkeit von der wirkenden Anpresskraft

Die Rolle kann also als progressive Feder begrenzter Steifigkeit betrachtet werden. Ihre Verformung f kann also in Abhängigkeit von der Normalkraft F durch den folgenden Zusammenhang beschrieben werden:

$$f := \frac{F}{c} \tag{Gl.3.4}$$

Dass der Federkoeffizient c , wie in Abbildung 3.20 zu erkennen ist, selbst von f abhängt, sei dahingestellt. Beim Übergang von einer Rolle zur nächsten kommt es zu einer positiven Überdeckung, d.h. über einen Winkel von ca. 5° berühren zwei Rollen den Boden.

Wie in Abbildung 3.21 schematisch dargestellt, verteilt sich die Radaufstandskraft dabei auf zwei Rollen. Die Verformung ergibt sich in diesem Fall also aus:

$$f := \frac{F}{2c} \quad \text{Gl. 3.5}$$

Es kommt also zu einer scheinbaren Erhöhung der Steifigkeit der im Eingriff befindlichen Rolle. Als Folge geht laut Abbildung 3.20 die Deformation zurück und das genau in dem Bereich, in dem sie laut Theorie extremal sein sollte. Die Konsequenz ist eine Abflachung der Kurve des Rundlauffehlers und eine Verringerung deren Amplitude.

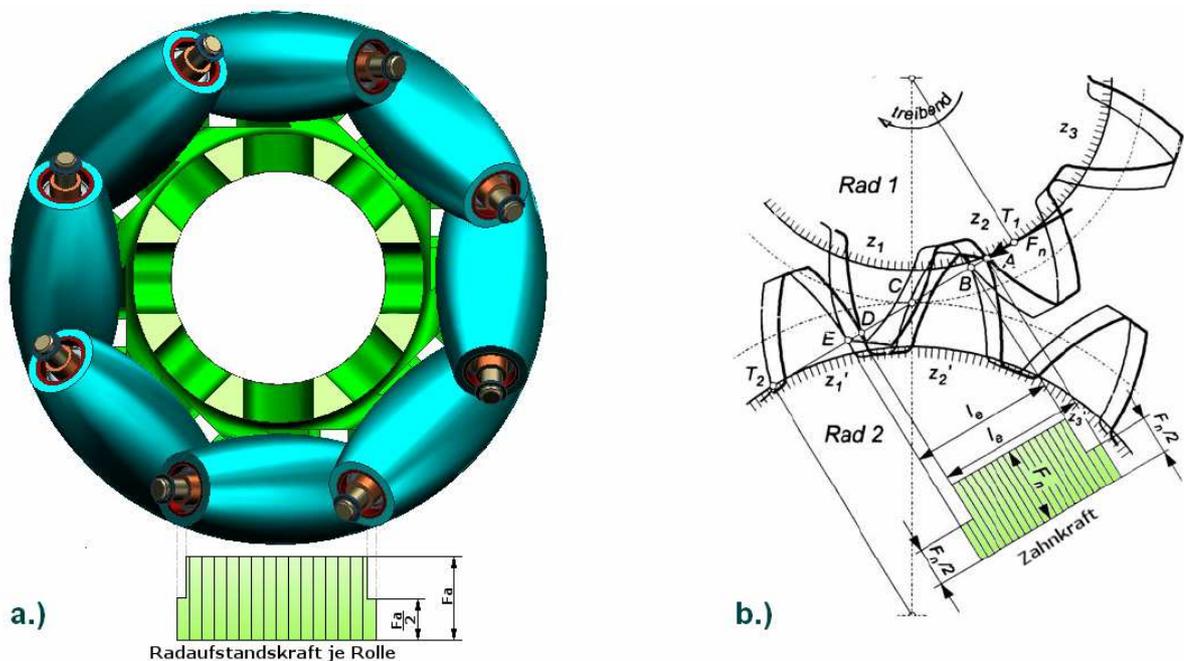


Abbildung 3. 21: Vergleich der Überdeckung bei Mecanum-Wheels (a) und Evolventenverzahnung⁴⁰ (b)

Ein ähnliches Verhalten lässt sich übrigens auch bei Verzahnungen mit positiver Überdeckung, wie in Abbildung 3.21 b dargestellt, beobachten. Ist mehr als ein Zahn im Eingriff, halbiert sich die Zahnkraft. Es kommt scheinbar zu einer Erhöhung der Zahnsteifigkeit.

Auch die Rollen selbst sind als mögliche Fehlerquelle zu nennen. Sie bestehen aus Aluminiumkernen, auf die eine Schicht aus Naturkautschuk aufvulkanisiert ist. Dieser Prozess ist in Bezug auf die Maßhaltigkeit nach Angaben des Herstellers nur schwer zu kontrollieren. Laut dessen Angaben kann es durch ein außermittiges Einlegen der Kerne in die Vulkanisier-Form zu

⁴⁰ Quelle [Jue 2011]

einer Exzentrizität von bis zu 0,25 mm kommen. Abbildung 3.22 zeigt, dass es neben der Exzentrizität, die vor allem in horizontaler Richtung zu erkennen ist, auch zu einer Abweichung von der runden Form kommt. Dieser Formfehler lässt sich aus dem Fertigungsprozess kaum systematischer erklären, zumal die in blau eingetragene Fügekante der Formhälften, sowie die dadurch entstehende Naht in keinem geometrischen Zusammenhang damit zu stehen scheinen.

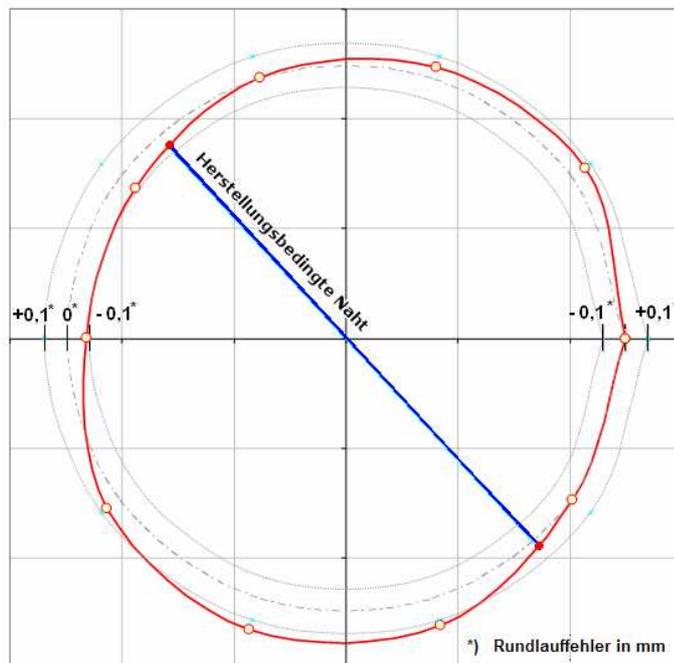


Abbildung 3.22: Reale Kontur der Omniwheel-Rollen

(Zur Verdeutlichung des Rundlauffehlers wurden die Abweichung vom idealen Durchmesser um den Faktor 10 vergrößert)

Was Fertigungsfehler im Grundkörper des Omniwheels angeht, sind vor allem Abweichungen in der Lage der Bohrungen für die Rollachsen zu erwarten. Sie wirken sich in Form einer radialen Verschiebung eines kompletten Segments der Kontur aus, wie das im ersten Quadranten des Rundlaufprofils zu sehen ist. Das Ausmaß dieses Einflusses ist im Vergleich zur Abweichung durch die Approximation der Rollenkontur und deren Rundlauffehlers aber eher unerheblich.

Die willkürliche Kombination der verschiedenen Fehlerursachen sorgt dafür, dass die Ergebnisse des Rundlaufversuches zum einen der theoretischen Kontur teilweise nur sehr grob folgen und andererseits kaum reproduzierbar sind.

Ein ähnliches Bild ergibt sich bei der vergleichenden Messung des im Krikkit II verwendeten Rads. Der maximale Rundlauffehler ist, wie aus Abbildung 3.23 ersichtlich, mit dem der neuen Räder vergleichbar. Auffällig ist jedoch, dass die Kontur mit der rechnerisch ermittelten deutlich weniger Ähnlichkeiten besitzt, als das Rad des Krikkit III.

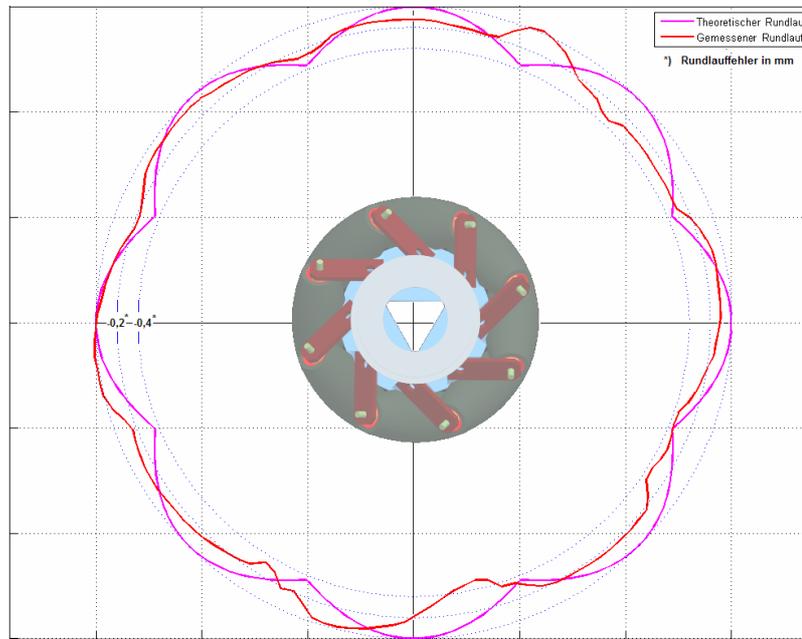


Abbildung 3. 23: Ergebnis der rollenden Rundlaufmessung am Omniwheel des Krikkit II

Eine Erklärung dieser Diskrepanz bieten die Bauweisen der beiden Räder. Das Omniwheel des Krikkit III ist aus einem Teil gefertigt, und die Lage der Rollachse ist über zwei eng tolerierte Bohrungen vorgegeben. Eine Konstruktion mit so wenigen Freiheitsgraden fordert eine hohe Fertigungsqualität, dafür passen die Lagen der einzelnen Bauteile zueinander sehr präzise. Die theoretischen Betrachtungen stimmen daher gut mit den beobachteten Ergebnissen überein.

Bei der Entwicklung des Vorgängermodells wurde eine komplett andere Strategie verfolgt. Es besteht aus vielen Einzelteilen. Da diese nur selten zueinander zentriert sind, weist das gesamte System eine große Anzahl von Freiheitsgraden auf. Ein solcher Mechanismus lässt sich ausgezeichnet justieren. So kam bei der Montage des alten Omniwheels ein Justierrohr zum Einsatz, dessen Innendurchmesser genau dem des einhüllenden Zylinders entspricht. Werden die Rollen nun an das Rohr angelegt, bevor sie fest verschraubt werden, ist eine Beschränkung des maximalen Rundlauffehlers gegeben.

Der Nachteil dieser Methode besteht, neben dem hohen Montageaufwand, vor allem darin, dass somit lediglich zwei der sechs Freiheitsgrade, die die Rolle im Raum besitzt, beschränkt werden. Bedenkt man, dass die Rolle ein Rotationskörper ist und somit eine Rotation um ihre Achse keinen Einfluss auf ihre Anordnung hat, bleiben drei Freiheitsgrade (2 rotatorische, 1 translatorische) offen, sodass Lage und Orientierung der Rolle nicht klar bestimmt ist. Diese Montagefehler sind in der Lage, zu einem Verlauf des Rundlauffehlers zu führen, der weit vom theoretischen abweicht.

Wie aus dem Diagramm leicht ersichtlich ist, kann die Änderung des Radius mit dem Winkel recht groß sein. Weiters zeigt sich, dass auch die zweite Ableitung des Radius nach dem Winkel starke Spitzen aufweist. Diese ist - eine konstante Winkelgeschwindigkeit vorausgesetzt - der zweiten Ableitung des Radius nach der Zeit proportional.

Ruft man sich nun in Erinnerung, dass eben dieser Radius, bei der Verwendung des Rades im Roboterfahrwerk, mit der Höhe des Radlagers über dem Boden gleichzusetzen ist, lassen sich weitreichende Konsequenzen erkennen. Ein solches Rad verursacht hohe vertikale Beschleunigungen und leitet diese direkt in den Roboter ein. Es lässt sich also zusammenfassend sagen, dass der Betrag der Unrundheit hier nicht das entscheidende Kriterium ist, sondern vielmehr dessen zweite Ableitung nach der Zeit. Wie in Abbildung 3.24 ersichtlich, tritt dieses Problem beim Vorgängermodell deutlich massiver auf. Es ist also zu erwarten, dass das im Krikkit III verbaute Mecanum-Wheel von vornherein weniger Vibrationen induziert als sein Vorgänger.

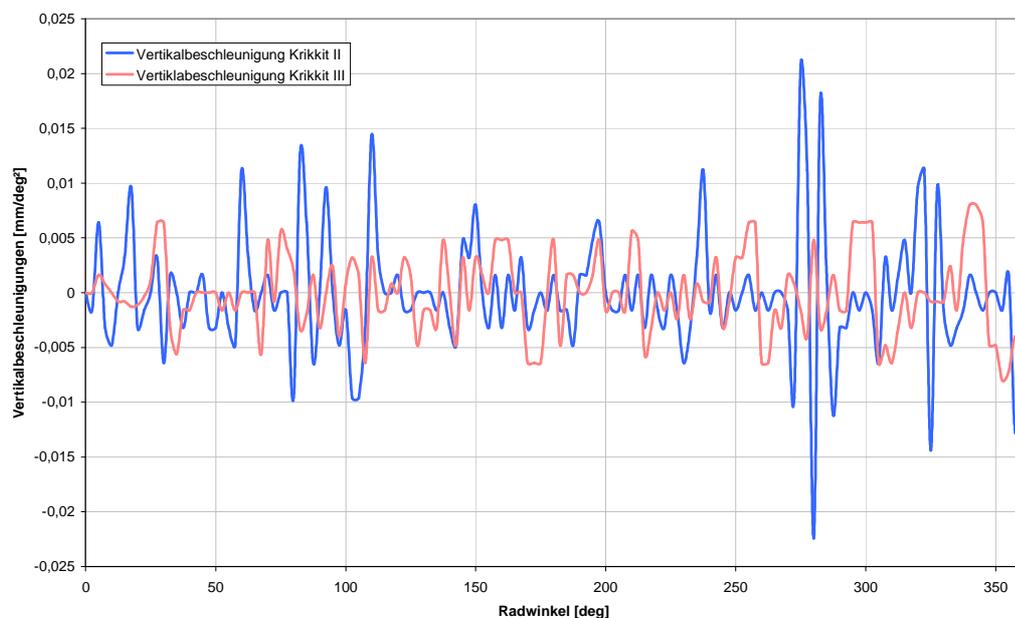


Abbildung 3. 24: Vertikalbeschleunigungen der Radachse während des Abrollvorgangs

Es sei an dieser Stelle jedoch nochmals betont, dass dieser Prinzipversuch aufbaubedingt mit einer vergleichsweise geringen Anpresskraft durchgeführt wurde. Das Verhalten der Wheels unter der vollen Radaufstandskraft wird voraussichtlich quantitativ anders aussehen, da es zu einer Verformung der Rollen unter Last kommen wird. Ein derartiges Verhalten ist in Abbildung 3.20 bereits zu erkennen.

3.3.3.4. Fazit

Zusammenfassend ist das Ergebnis der Rundlaufanalyse äußerst ernüchternd. Zwar war es möglich, die auftretende Schwingungsanregung im Vergleich zum Vorgängermodell deutlich zu verringern, das erzielte Ergebnis ist aber dennoch nicht wirklich befriedigend. Der größte Vorteil des Mecanum-Wheels, die zylindrische Hüllkurve, kommt nur sehr eingeschränkt zum Tragen. Wenngleich der Rundlauf immer noch deutlich besser als jener konventioneller 90° Omniwheels ist, wird es womöglich dennoch nötig sein, gegen die als Folge der Unrundheit auftretenden Vibrationen vorzugehen.

Sollte das der Fall sein, wird man sich im Laufe einer Weiterentwicklung der Plattform zwingend die Frage stellen müssen, ob das Prinzip der deutlich komplexeren Mecanum-Wheel den erhöhten Aufwand rechtfertigt.

Es sei hier jedoch darauf hingewiesen, dass sich damit auch die Lage und Orientierung der Motoren ändert, und es deshalb mit einer rein modulinternen Überarbeitung nicht getan wäre.

3.4. FAHRWERKSSCHWINGUNGEN UND SCHWINGUNGSDÄMPFUNG

Die auftretenden Schwingungen sind eines der großen Probleme, mit denen die Roboter der Krikkit II-Klasse zu kämpfen haben. Die Vibrationen verschlechtern das Fahrverhalten, führen langfristig zum Ausfall elektronischer Baugruppen und beeinträchtigen die Leistung empfindlicher Sensoren wie Kamera und Beschleunigungsmesser. Um dem Problem am Krikkit III Herr zu werden, beschreibt dieses Kapitel eine ausführliche Suche nach den Ursachen, verschiedenen Gegenmaßnahmen sowie eine Validierung der realisierten Lösung.

3.4.1. MESSUNG AM KRIKKIT II- FAHRWERK

Als Ausgangspunkt der Analyse dient das Fahrwerk der Krikkit II-Klasse. Die dort auftretenden Vibrationen sind sowohl visuell als auch akustisch leicht wahrzunehmen. Um dieses Verhalten quantifizieren zu können, wurden die am Fahrwerk auftretenden Beschleunigungen abhängig von der Geschwindigkeit gemessen. Mangels präziser Ansteuerung ist dabei eine exakte Aussage über den Betrag der Geschwindigkeit nicht möglich.

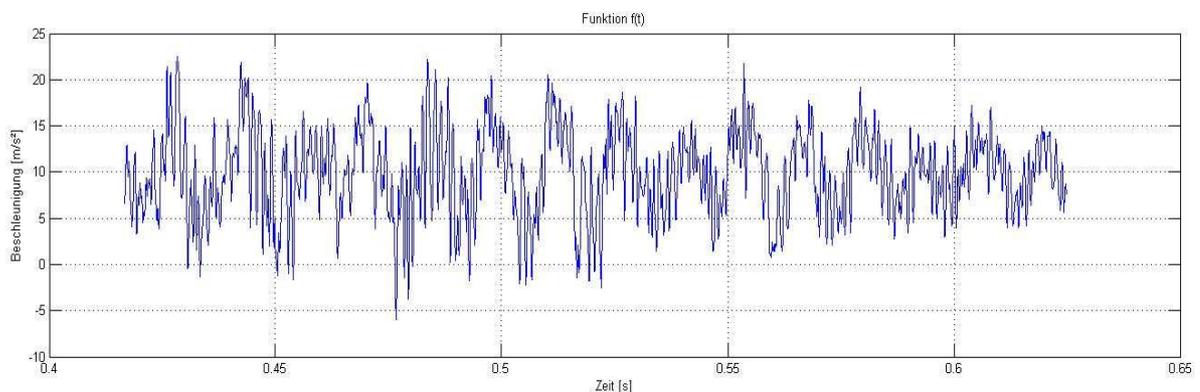


Abbildung 3. 25: Vertikalbeschleunigungen am Fahrwerk bei einer Geschwindigkeit von ca. 0,3 m/s

Die Ergebnisse zeigen bereits bei einer Geschwindigkeit von etwa 0,3 m/s Beschleunigungsamplituden von mehr als 10 m/s² in alle drei Raumrichtungen. Diese Schwingungen pflanzen sich durch den massiven Fahrwerksrahmen bis hin zu empfindlichen Baugruppen wie Vision-System und zentraler Elektronik fort. Hier gilt es, nach den Ursachen zu fahnden und nötige Gegenmaßnahmen zu ergreifen.

3.4.2. URSACHENFORSCHUNG

Da der Roboter um die Hochachse symmetrisch aufgebaut ist, erscheint es sinnvoll, Vibrationen in horizontaler (x- und y-Achse) und vertikaler Richtung (z-Achse) getrennt zu untersuchen.

Bei der Betrachtung des in Abbildung 3.25 exemplarisch dargestellten vertikalen Beschleunigungsverlaufs lässt sich eine Überlagerung mehrerer periodischer Signale erkennen. Um diese Signalanteile quantifizieren zu können, wird die Funktion mittels Fourier-Zerlegung analysiert.

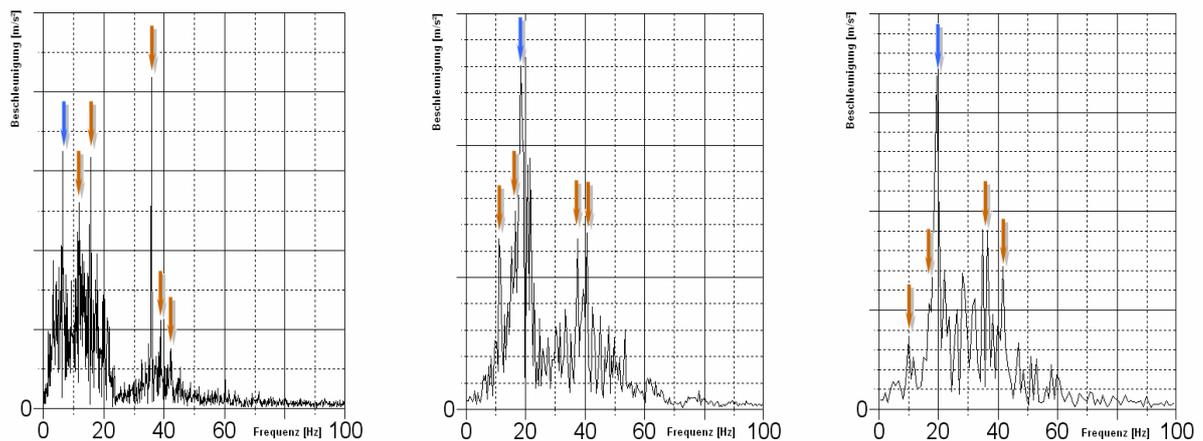


Abbildung 3. 26: Fourieranalysen der Beschleunigungsverläufe bei verschiedenen Geschwindigkeiten

Die in Abbildung 3.26 ersichtlichen Diagramme zeigen die Fourieranalysen der Fahrwerksschwingungen bei verschiedenen Fahrgeschwindigkeiten. Wie sich leicht erkennen lässt, gibt es eine Reihe von dominanten Teilsignalen. Die meisten davon zeigen zwar eine geschwindigkeitsabhängige Amplitude, ihre Frequenz bleibt aber weitestgehend konstant. Das Verhalten dieser mit roten Pfeilen markierten Frequenzen deutet auf Resonanzfrequenzen einzelner Roboterkomponenten hin.

Eine Schwingung zeigt ein anderes Phänomen. Der mit einem blauen Pfeil markierte Peak wandert mit steigender Robotergeschwindigkeit in Richtung höherer Frequenz.

Vergleicht man nun in einer Überschlagsrechnung diese Frequenz mit der Raddrehzahl bei der geschätzten Verfahrgeschwindigkeit, so findet man in jedem Fall mit guter Näherung den Faktor acht dazwischen. Es ist also anzunehmen, dass die Mecanum-Wheels in der Tat die gesuchte Schwingungsanregung darstellen. Der Grund dafür ist demnach wohl die im Kapitel „3.1 Mecanum Wheel“ dargestellte Unrundheit des Rads.

Auch als Ursache für die Schwingungen in der Grundrissebene gelten die Räder als wahrscheinlichster Grund. Analysiert man den Abrollvorgang der Mecanum-Wheels noch einmal, so findet sich dort eine plausible Erklärung für die Beschleunigungen in der Grundrissebene. Beim Übergang des Radaufstandspunkts von einer Rolle zu nächsten verändert sich der Abstand des Kontaktpunktes zum geometrischen Mittelpunkt des Roboters binnen weniger Grade um mehr als 40 mm. Bei einem mittleren Abstand zwischen Radaufstandspunkt und Scherpunkt von ca. 210 mm entspricht das einer Schwankung von +- 10 %. Diese geometrische Variation verändert de facto die Kinematik des Roboters, was unter der Voraussetzung konstanter Raddrehzahlen zu einer Veränderung der Drehrate des Roboters und einer betrags- und richtungsmäßigen Änderung des Summengeschwindigkeitsvektors führt. Die Folge sind massive Beschleunigungen des gesamten Fahrwerks in der Grundrissebene.

3.4.3. GEGENMASSNAHMEN

Die Schwingungen in der Ebene sind prinzipbedingt und nicht reproduzierbar, da sie von den jeweiligen Drehwinkeln der Omniwheels zueinander abhängen. Dadurch gestaltet sich deren Verhinderung schwierig.

Was die vertikalen Vibrationen angeht, so steht hier eine ganze Reihe von möglichen Gegenmaßnahmen zur Verfügung, die im Folgenden diskutiert werden.

3.4.3.1. Einzelradaufhängung

In der vorangegangenen Analyse wurden die Räder als Quelle der Anregung identifiziert. Aus diesem Grund ist es wichtig, sie von den empfindlichen Komponenten schwingungsmäßig zu entkoppeln. Hier empfiehlt es sich, die schwingenden Massen im Vergleich zu ruhenden Masse gering zu halten. Werden die beiden über eine Feder verbunden, so zeigt der entstehende Mechanismus bei hohen Anregefrequenzen ein tiefpassähnliches Verhalten. Hochfrequente Anregungen werden nur sehr stark gemindert an den Roboter weitergegeben. Daneben ist auch ein rasches Abklingen der mechanischen Schwingung des Rades erwünscht, da sonst die Radaufstandskraft stark variiert. Dies hätte eine Verringerung der kraftschlüssig übertragbaren Kraft zur Folge. Aus diesem Grund wird der Feder ein geschwindigkeitsproportionaler Dämpfer parallel geschaltet.

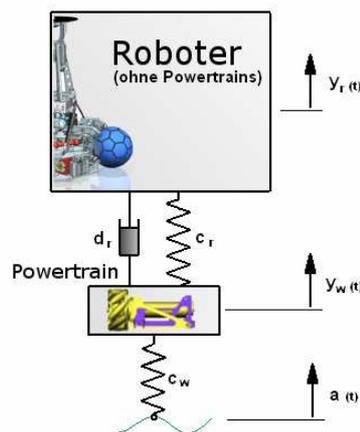


Abbildung 3. 27: Ersatzsystem des Roboters bei einer gedämpften Aufhängung der Antriebseinheiten

Die Bewegungen der beiden Massen lassen sich durch folgende Differentialgleichungen beschreiben. Für das Rad gilt:

$$m_w \ddot{y}_w := c_w \cdot (a - y_w) - d_r \cdot (\dot{y}_w - \dot{y}_r) - c_r \cdot (y_w - y_r) \quad \text{Gl. 3.6}$$

Die Bewegungsgleichung für den Rumpf des Roboters lautet:

$$m_r \ddot{y}_r := c_r \cdot (y_w - y_r) + d_r \cdot (\dot{y}_w - \dot{y}_r) \quad \text{Gl.3.7}$$

Nach Lösen der Gleichung zeigt sich, dass die Amplitude der Roboterschwingung $y_r(t)$ bei Frequenzen größer der Resonanzfrequenz stark absinkt.

3.4.3.2. Tilgung⁴¹

Ein weiteres Prinzip der Schwingungsunterdrückung ist die Schwingungstilgung. Das schwingfähige System, in diesem Fall der Roboter, wird über eine Feder mit einer Zusatzmasse bestückt. So entsteht ein zweites Feder-Masse-System. Es ist so ausgelegt, dass seine Resonanzfrequenz gleich der Anregungsfrequenz ist. Man spricht daher auch von der Tilgerfrequenz. Ein entsprechendes Ersatzschaltbild ist in Abbildung 3.28 zu sehen

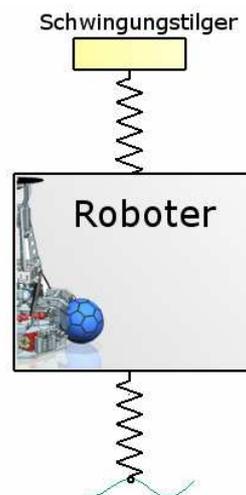


Abbildung 3. 28: Ersatzschaltbild eines Schwingungstilgers am Roboter

Wird die Plattform in Schwingung versetzt, beginnt auch der Tilger zu schwingen. Entspricht die Frequenz dieser Anregung genau der Tilgerfrequenz, heben sich die Wirkungen von äußerer Kraft und Reaktionskraft des Tilgers auf das Fahrwerk gegenseitig auf. Der Roboter bleibt in Ruhe. Bereits diese Erläuterung offenbart ein Problem: Tilger wirken nur in der Umgebung ihrer Eigenfrequenz schwingungsmindernd. Um das Prinzip in weiten Frequenzbereichen nutzen zu können, muss die Tilgerfrequenz ω_e laufend an die Erregerfrequenz angepasst werden (adaptive Tilger). Diese ist definiert durch:

$$\omega_e := \sqrt{\frac{c_t}{m_t}} \quad \text{Gl. 3.8}$$

wobei c_t die Federsteifigkeit der Tilgerfeder und m_t die Tilgermasse beschreibt. Es ist leicht ersichtlich, dass hier nicht viel Gestaltungsspielraum bleibt. Da die Masse schwer zu verändern ist, muss das Quadrat der Federsteifigkeit mit der Frequenz steigen.

⁴¹ Vgl [Zim 1999]

Eine Konstruktion, die nach diesem Prinzip funktioniert, ist das Sarrazin-Pendel, das allerdings prinzipbedingt nur zur Dämpfung von Drehschwingungen auf Wellen geeignet ist, deren Frequenz ein konstantes Vielfaches der Wellendrehzahl ist.

3.4.3.3. Aktive Schwingungstilger

In der Prüfstandstechnik oder bei Schwingförderern steht man vor genau der umgekehrten Herausforderung, man versucht Schwingungen einer bestimmten Frequenz zu erzeugen. Bringt man nun auf ein bereits schwingendes System mit ähnlichen Mitteln eine zusätzliche Anregung auf, so ist von außen nur mehr das Summensignal erkennbar. Beaufschlagt man das zu dämpfende System nun, wie in Abbildung 3.29 gezeigt, mit einem Signal, das genau dem Inversen der sonstigen Anregung entspricht, so heben sich die beiden Wirkungen auf. Das System bleibt in Ruhe.

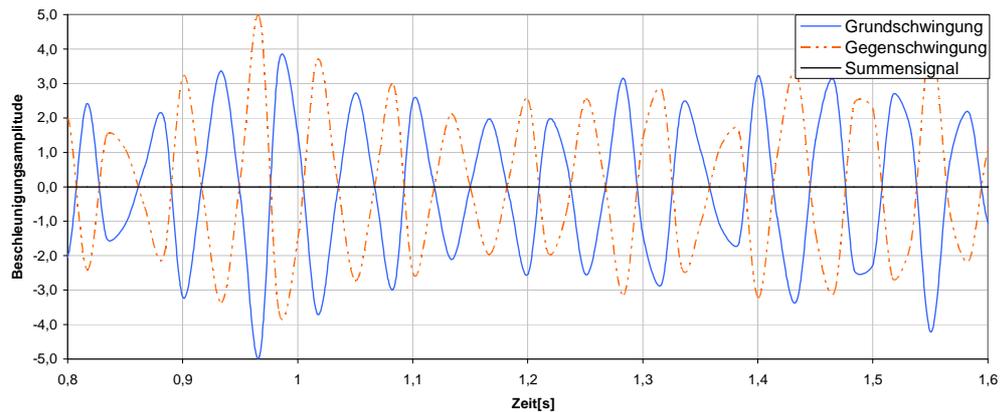


Abbildung 3. 29: Aktive Schwingungskompensation

In der Realität ist ein derartiges Vorgehen schwierig. Neben einer genauen Kenntnis des Signalverlaufs ist die Fähigkeit, ein entsprechend inverses Signal zu erzeugen und es phasenrichtig aufzubringen, nötig. Kommt es zu einer Phasenverschiebung, können sich unter Umständen Grund- und Gegenschwiwingung verstärken, was äußerst kontraproduktiv wäre. Ein solcher Fall ist in Abbildung 3.30 zu sehen. Das Summensignal ist ausgeprägter als im Fall ohne Gegenmaßnahme.

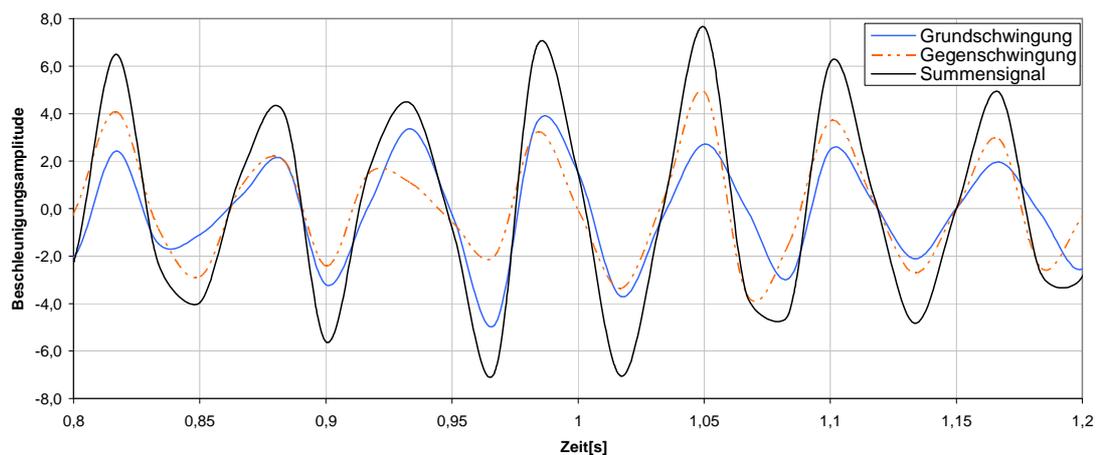


Abbildung 3. 30: Aktive Schwiwingungskompensation mit fehlerhafter Phasenlage

Zusammenfassend kann man festhalten, dass ein Szenario wie zuvor beschrieben technisch schwer umsetzbar ist. Messtechnische Erfassung, zeitgleiche Auswertung und die Erzeugung eines entsprechenden Gegensignals stellen die größten Herausforderungen dar. Praktikabel ist ein derartiges Vorgehen nur, wenn über lange Zeit eine hochgradig periodische Anregung auftritt.

Erlaubt man hier aber Vereinfachungen, kommt man der Realisierung ein großes Stück näher. Beschränkt man sich beispielsweise darauf, aus dem Summensignal den harmonischen Anteil mit der größten Amplitude zu kompensieren, wird die Krafteinleitung deutlich einfacher, denn eine sinusförmige Kraft kann durch einen simplen Unwuchterreger mit variabler Drehzahl realisiert werden. Außerdem ist im Fall des Powertrains keinerlei Messtechnik nötig, da die Frequenz, wie schon gezeigt wurde, mit der Drehzahl des Omniwheels korreliert. Die nötige Kompensationsfrequenz kann also direkt aus der softwareseitigen Drehzahlvorgabe errechnet werden.

Die letzte Frage, die noch offen bleibt ist, ob es möglich ist, die korrekte Phasenlage zwischen Grundschiwingung und Gegenschwiwingung zu erreichen. Wie in Kapitel „3.2.3 Das reale Mecanum-Wheel“ gezeigt, gibt es zwar einen Zusammenhang zwischen Radwinkel und Beschleunigung, ob dieser aber genutzt werden kann, um ein synchrones Tilgungssignal zu erzeugen, ist nur im Versuch zu ermitteln.

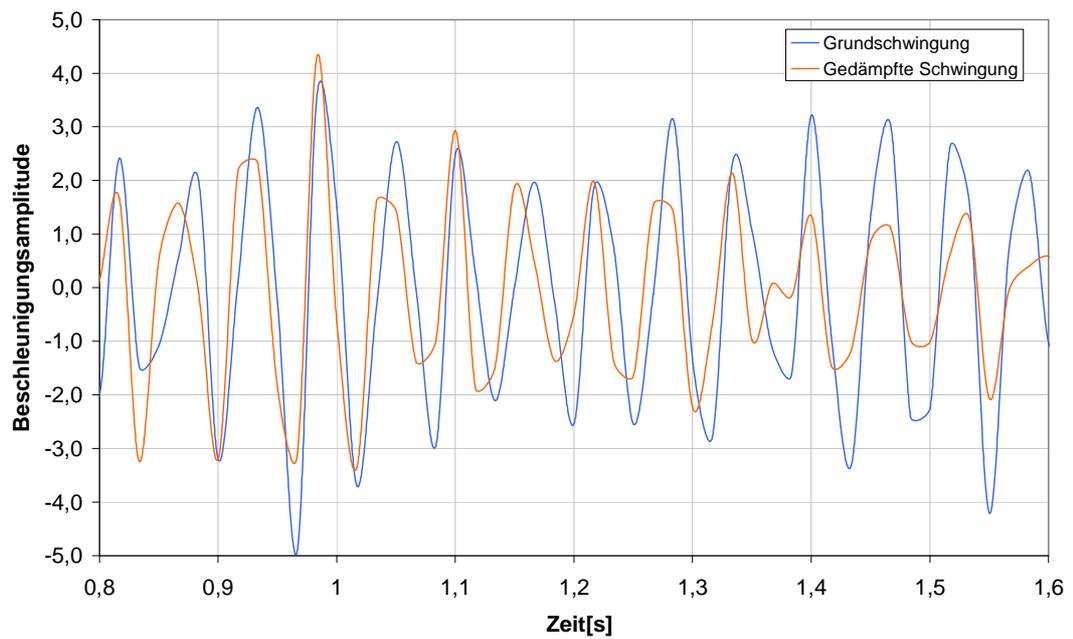


Abbildung 3. 31: Simulierte Kompensation des dominanten Frequenzanteils

Gelingt das, so ist wie in Abbildung 3.31 exemplarisch gezeigt eine deutliche Abschwächung der Beschleunigungsamplitude möglich. Der Erfolg dieser Maßnahme ist umso signifikanter, je dominanter ein Frequenzanteil wird.

3.4.4. ERPROBUNG DES ELASTOMERGEDÄMPFTEN MODULS

Als konstruktiv einfachste Lösung wurde eine Einzelradaufhängung mit einem Feder-Dämpfersystem auf Elastomerbasis realisiert. Eine genauere Beschreibung der Konstruktion findet sich im Kapitel „2.6.3 Powertrain“.

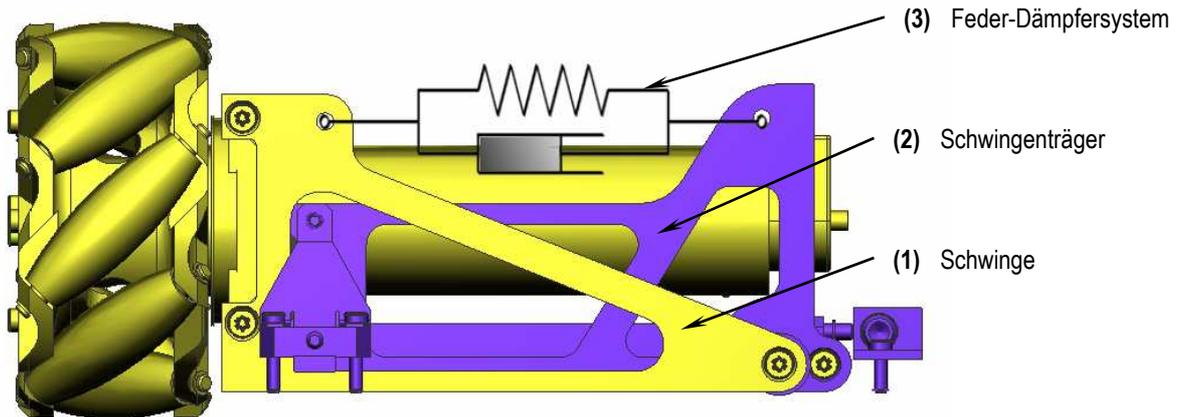


Abbildung 3. 32: Schematische Darstellung des Powertrainmoduls

Der bewegliche Teil, die Schwinge (1), besteht nur aus Radlager, Rad, und Motor und hat damit die minimale Masse. Der Schwingenträger (2) ist fix am Roboter montiert, gehört also bereits zum „ruhenden“ Teil. Verbunden sind die beiden Massen einerseits über ein Drehgelenk und andererseits über zwei Elastomerdämpfer (3). Die Messung in Abbildung 3.33 a.) zeigt, dass diese Bauteile neben einer in erster Näherung linearen Federkonstanten auch über eine nennenswerte innere Dämpfung verfügen. Sie können daher durch ein Voigt- Kevin Ersatzschaltbild wie in Abbildung 3.33 b.) gezeigt, modelliert werden

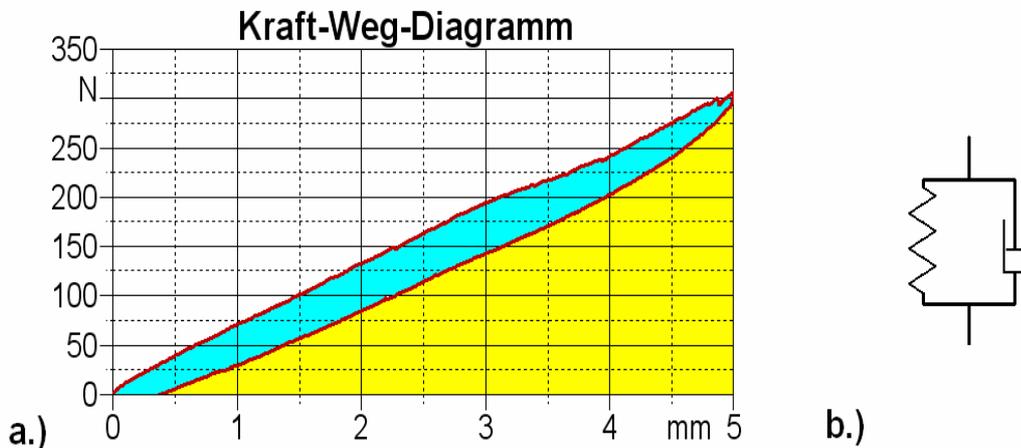


Abbildung 3. 33.: Federkennlinie (a) und Ersatzschaltbild des verwendeten Elastomerdämpfers

Diese einfache Schwingungsentkopplung wird auf dem Prüfstand einem Funktionstest unterzogen. Um durch andere schwingungsmindernde Einflüsse keine verfälschten Ergebnisse zu erhalten, wird als Referenz ein identer Versuch herangezogen, bei dem jedoch die Dämpfer durch Gewindestangen ersetzt werden.

3.4.4.1. Voltigierprüfstand

Der zu entwerfende Prüfaufbau soll folgende zwei Freiheitsgrade der Antriebseinheit modellieren: Zuerst kann der Roboter im Vergleich zum Untergrund entlang einer Achse bewegt werden. Darüber hinaus kann die Höhe der Radachse entsprechend der Kontur des Omniwheels verändert werden. Ob dies über eine Translation oder eine Rotation geschieht, hängt im Roboter in erster Linie von der parallel ablaufenden Bewegung der anderen beiden Räder ab. Dieser Zustand ist nicht reproduzierbar, kann somit am Prüfstand nach Belieben gewählt werden.

Als Konzept für den Versuch wurde ein Voltigierprüfstand gewählt. Dabei wird das gesamte Powertrain-Modul (1), wie in Abbildung 3.34 zu sehen, an einem langen Hebel (2) befestigt. Dieser ist im Lagerpunkt (3) so aufgehängt, dass sowohl eine Rotation um die Hochachse als auch um eine horizontale Achse normal zur Hebelrichtung möglich ist. Diese Kinematik erlaubt es dem Powertrainmodul sich aus eigenem Antrieb auf einer Kreisbahn zu bewegen. Darüber hinaus kann das ganze Modul in vertikaler Richtung frei schwingen.

Auf dem Modul wird ein Zusatzgewicht angebracht, um die Masse oder das Massenträgheitsmoment des Roboters zu simulieren.

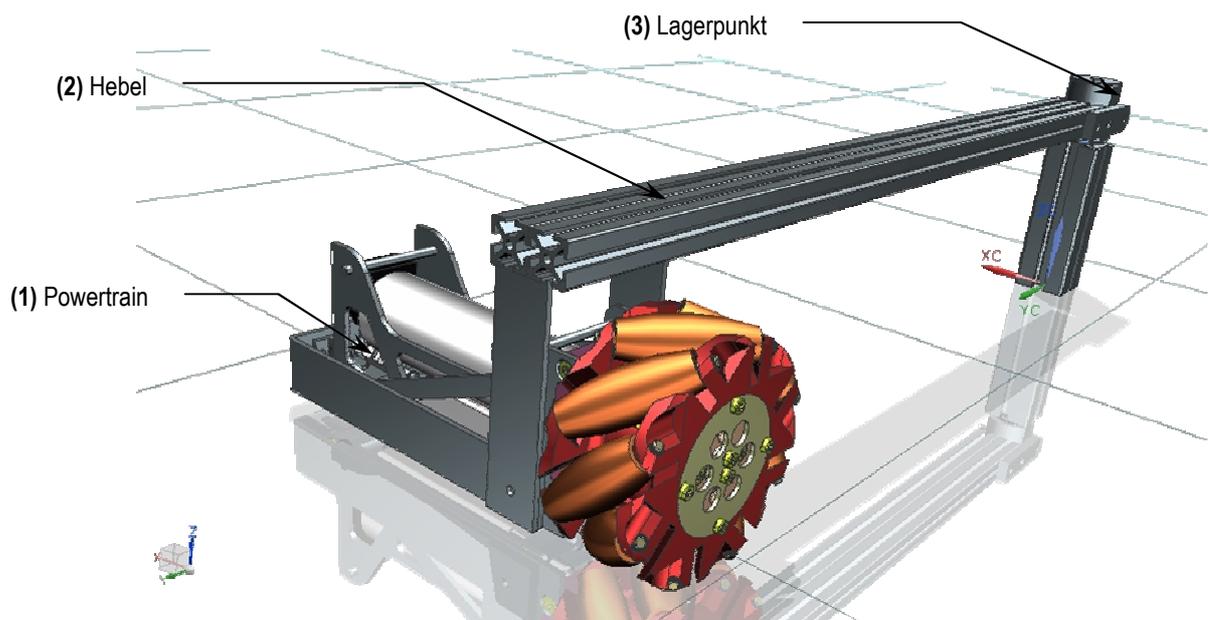


Abbildung 3. 34: CAD-Modell des Powertrain-Voltigierprüfstands

Neben Schwingungsversuchen ist dieser Prüfstand vor allem für Beschleunigungstests mit neuen Omniwheels, Rollenbeschichtungen oder Motorregelstrategien geeignet.

Im Betrieb zeigt sich ein Mangel des Prüfstands, wie er in Abbildung 3.35 zu sehen ist. Der lange Hebel ist trotz massiver Verstärkung (3) nicht ausreichend verdrehsteif, um eine konstante Orientierung der Motorachse zum Untergrund zu gewährleisten. Dieser Faktor ist aber kritisch für die Ausrichtung und damit den Abrollvorgang des Omniwheels. Um die Lage zu stabilisieren, wurde am hinteren Ende des Powertrains ein zusätzliches Stützrad (1) eingebaut. Unter der Annahme, dass dieses Stützrad ständig Bodenkontakt hat, bewegt sich der Schwingenträger damit nicht entlang einer vertikalen, sondern auf einer Kreisbahn mit Ursprung im Radaufstandspunkt des Stützrades. Problematisch ist dieser Zustand aber nur, wenn der überstrichene Winkel eine Approximation der Bewegung als geradlinig nicht rechtfertigt. Bei einem Radius von rund 250 mm und einer erwarteten Tangentialbewegung von höchstens ± 1 mm ergibt das einen Winkelweg von $\pm 0,23^\circ$. Der durch das Stützrad verursachte Fehler ist also in einem vertretbaren Rahmen.

Die auftretenden Beschleunigungen werden von einem Beschleunigungssensor (4), der direkt über dem Rad angebracht ist, aufgezeichnet.

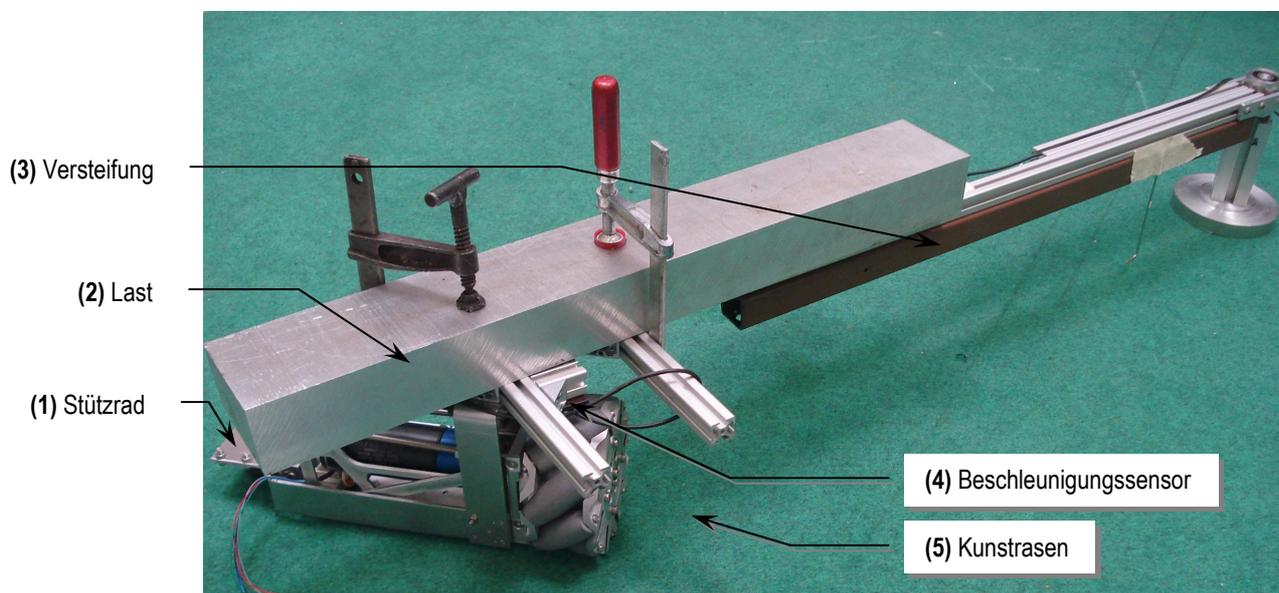


Abbildung 3. 35: Der Aufbau des Voltgierprüfstands

3.4.4.2. Diskussion der Messergebnisse

Im Laufe des Versuchs wurden Vertikalbeschleunigungen in sechs Messreihen gesammelt. Die Messungen erfolgten für drei verschiedene Geschwindigkeiten, jeweils mit und ohne Längsdämpfer. Abbildung 3.36 zeigt den Verlauf der Beschleunigungsamplitude der Anregfrequenz eines Moduls mit Dämpfer im Vergleich zu einem ohne.

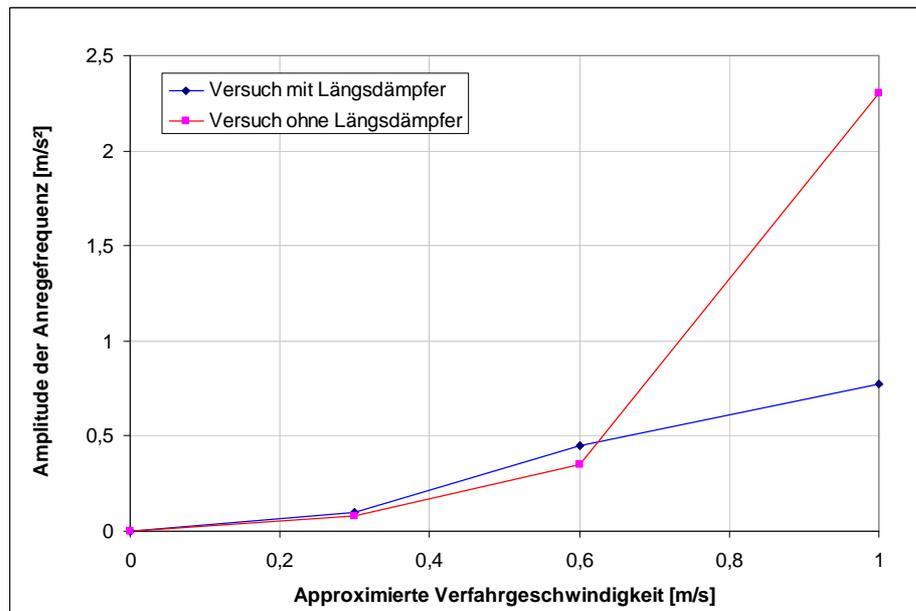


Abbildung 3. 36: Vertikalbeschleunigungen in Abhängigkeit von der Verfahrensgeschwindigkeit

Auffällig ist, dass die Wirkung des Stoßdämpfers anfangs recht gering ist und das gedämpfte Fahrwerk teilweise sogar höhere Amplituden aufweist als das ohne Dämpfung. Erst bei höheren Verfahrensgeschwindigkeiten wird die Wirkung der Einzelradaufhängung signifikant.

Um dieses Verhalten rechnerisch zu erklären wird das Fahrwerk einer groben Vereinfachung unterzogen. Die den Roboter repräsentierende Masse auf der einen Seite und die Schwinge mit Motor und Omniwheel auf der anderen Seite werden als starre Körper approximiert. Aufgrund der geringen überstrichenen Winkel können die auftretenden Rotationen mit guter Näherung als reine Translationen modelliert werden. Weiters wird das System als verlustfrei angenommen. Sowohl die Reibung in den Lagern, als auch die Dämpfung in der Längsfeder wird vernachlässigt. Die Federkonstanten des Omniwheels und der Längsfeder werden linearisiert. Was bleibt, ist ein einfacher Zweimassenschwinger wie in Abbildung 3.37a.) dargestellt. Das Modell sollte ausreichend genau sein, um daraus qualitative Aussagen über das Schwingungsverhalten ableiten zu können

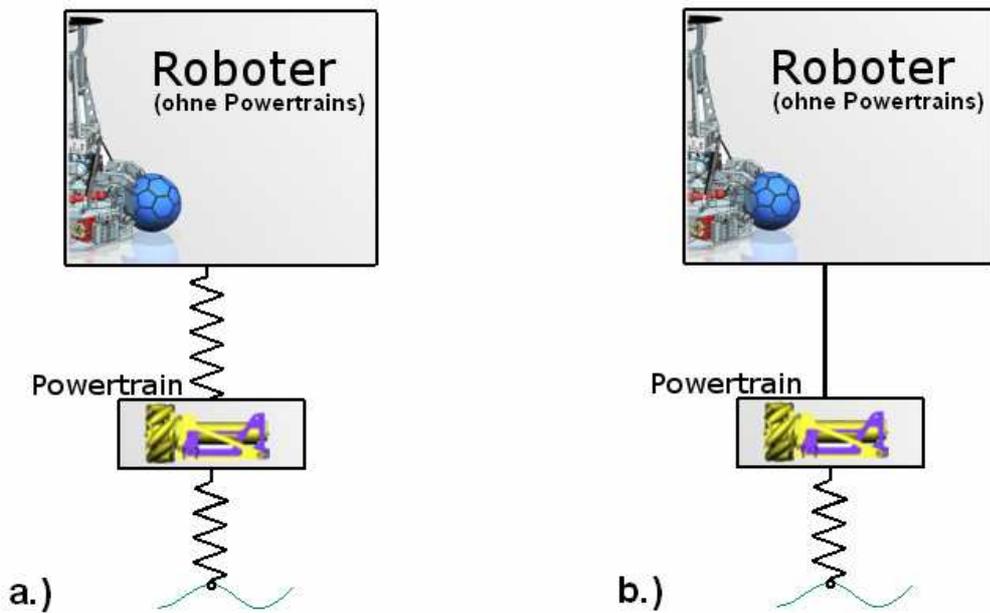


Abbildung 3. 37: Modell des Voltagerprüfstands für die Versuche mit (a) und ohne (b) Längsfeder

Die Anregung des Systems erfolgt mittels einer harmonischen Auslenkung des Fußpunkts. Ähnlich wie im realen Versuch wird auch in der Rechnung der Längsfeder bei einem Durchlauf versteift, um einen Vergleichswert zu erhalten. Diese Modifikation lässt sich durch eine starre Verbindung der beiden Massen, wie in Abbildung 3.37 b.) gezeigt, erreichen. Das Bewertungskriterium der Ersatzsysteme sind die Vergrößerungsfunktionen der beiden Roboterrümpfe, also das Verhältnis der auftretenden Schwingungsamplitude zur Amplitude der Anregung.

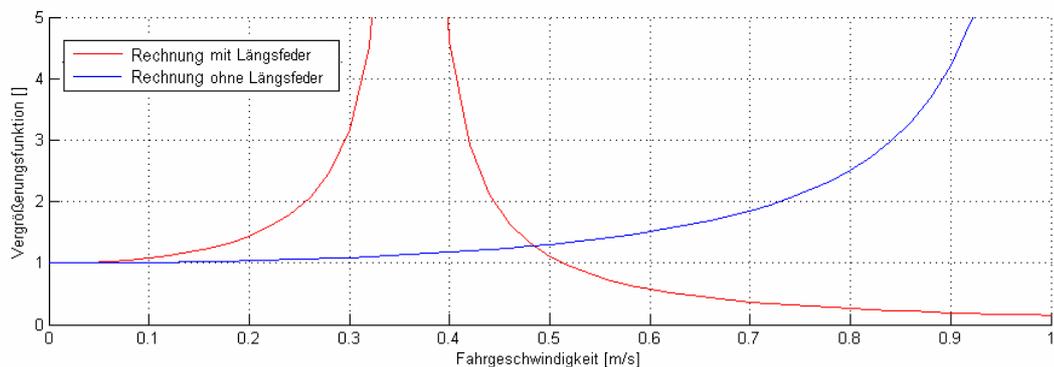


Abbildung 3. 38: Vergrößerungsfunktion des gefederten und ungefederten Fahrwerkers

Vorab sei erwähnt, dass die Vergrößerungsfunktion üblicherweise über der Anregungsfrequenz dargestellt wird. In diesem Fall hat sich aber sie Verfahrsgeschwindigkeit als aussagekräftigere Bezugsgröße erwiesen.

Abbildung 3.38 zeigt, dass es beim gedämpften Fahrwerk bis zu einer Geschwindigkeit von 0,38 m/s zu einer kontinuierlichen Vergrößerung der Amplitude kommt, was vermuten lässt, dass dessen Resonanzfrequenz bei ca. 3 Hz liegt. Dieser geringe Wert ist vor allem den vergleichsweise weichen Längsdämpfern zu verdanken. Ab etwa 0,5 m/s beginnt die gefederte Aufhängung zu wirken, der Rumpf des Roboters überstreicht weniger Weg als der Fußpunkt des Omniwheels.

Versteift man die Feder zwischen Powertrain und Roboter, steigt die Eigenfrequenz massiv an. Die Folge ist eine kontinuierliche Erhöhung der Vergrößerungsfunktion bis hin zu hohen Verfahrgeschwindigkeiten. Es stellt sich nun die Frage, wie sich ein derartiges Verhalten auf die Beschleunigungsamplitude im Rumpf auswirkt. Da das Maß der Auslenkung des Fußpunkts nicht bekannt ist wird exemplarisch mit einem Wert von $\pm 0,1$ mm gerechnet.

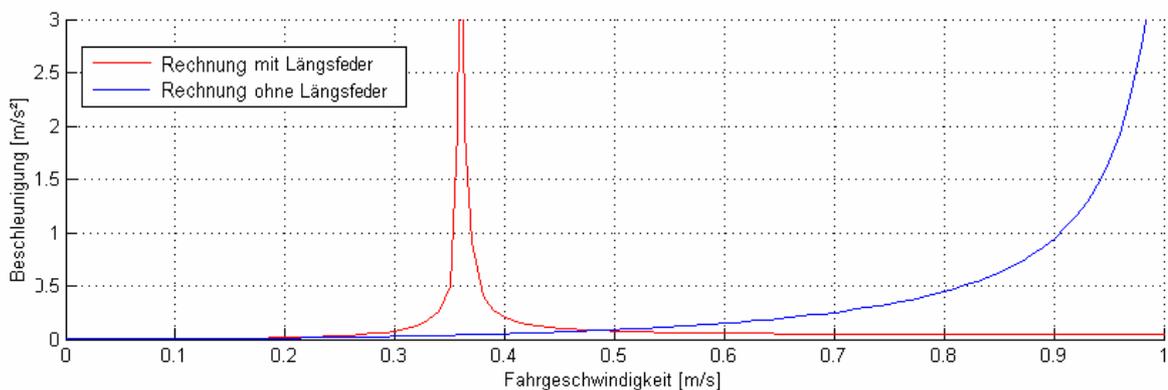


Abbildung 3.39: Vertikalbeschleunigungen im vereinfachten Fahrwerksmodell

Das Simulationsergebnis in Abbildung 3.39 lässt einen der Messung ähnlichen Verlauf erkennen. Bei niedrigen Verfahrgeschwindigkeiten zeigen beide Modelle kaum Vibrationen. Erst in der Umgebung der Resonanzfrequenz des gedämpften Systems treten nennenswerte Beschleunigungen in vertikaler Richtung auf, danach bleiben sie allerdings beschränkt.

Auch das ungedämpfte System zeigt einen entsprechenden Anstieg. Dessen Maximum liegt aber außerhalb des bisher genutzten Geschwindigkeitsbereichs. Die Folge ist ein kontinuierlicher Anstieg der Fahrwerksschwingungen mit steigender Verfahrgeschwindigkeit. Genau diese Entwicklung ist ja auch im Graphen der Messung zu sehen.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass sich der Einsatz der Längsfeder, speziell bei hohen Geschwindigkeiten, als lohnende Maßnahme erwiesen hat. Als problematische ist hier aber zu vermerken, dass dadurch ein schwingfähiges System mit einer Eigenfrequenz mitten im Betriebsbereich geschaffen wurde. Im Laufe von Folgearbeiten sollte die Auslegung der Elastomere in der Längsfeder nochmals überarbeitet werden. Der Fokus sollte dabei auf einer geeigneten Wahl der Resonanzfrequenz des Fahrwerks liegen. Sollten sich Resonanzfälle als problematisch erweisen, könnte durch entsprechende Implementierung der Motorsteuerung die entsprechende Anregfrequenz vermieden werden.

4. RESÜMEE

Am Ende dieses Projekts ist es an der Zeit, auf das Erreichte zurückzublicken und den Erfolg des Projekts kritisch zu hinterfragen. Im Verlauf dieses Kapitels sollen nun unabhängig von einander zwei Bereiche evaluiert werden. Zum einen soll der Ablauf und das Vorgehen bei der Durchführung des Projekts näher beleuchtet werden. Danach wird die neuentwickelte Plattform, der Krikkit III, einer genauen Durchleuchtung unterzogen.

4.1. EVALUIERUNG DES VORGEHENS

Speziell bei einer Diplomarbeit gilt es neben dem entwickelten Produkt auch den Weg dorthin zu rekapitulieren, denn die dabei entwickelten Fertigkeiten und erlernten Methoden stellen den eigentlichen Mehrwert für den Diplomanten dar.

4.1.1. ZIELE

Der Entwicklungsprozess zeichnete sich vor allem durch die große Anzahl an Stakeholdern aus den verschiedensten Fachrichtungen aus, deren Wünsche und Anforderungen die Entwicklung des Krikkit III maßgeblich geprägt haben. Die Festlegung von klaren Zielen ist dabei unerlässlich.

Andererseits wurde mit der Entwicklung des Roboters auch vielfach Neuland betreten. Oftmals erwiesen sich zu Beginn festgelegte Ziele im Projektverlauf als nicht haltbar oder schlicht unbedeutend. Andere Notwendigkeiten wurden erst im Laufe des Projekts erkennbar. Vor diesem Hintergrund erschien das sture Verfolgen anfänglich definierter Forderungen bald als eher einengend denn hilfreich. Daher wurden viele der Projektziele mit der Zeit als Richtlinien betrachtet, die laufend dem aktuellen Wissenstand angepasst wurden.

4.1.2. ZEITPLANUNG

Der zeitliche Rahmen bei der Entwicklung der neuen Plattform war von Anfang an ausgesprochen eng. Darüber hinaus galt es, speziell im Verlauf der Fertigung eine ganze Reihe an externen Partnern und Auftragnehmern zu koordinieren. Ein straffer Zeitplan mit klaren Milestones war dabei unverzichtbar, um die terminlichen Rahmenbedingungen einzuhalten. In punkto Adaption galt hier ähnliches wie bei den Zielen. Wenngleich gewisse Eckpunkte immer als unverrückbar galten, so konnten andere aktuellen Ereignissen entsprechend variiert werden.

Ein Parameter der gänzlich unterschätzt wurde, sind die Vernetzungen der Zeitpläne der verschiedenen Disziplinen. So ist beispielsweise der Beginn der Montagephase der mechanischen Komponenten nicht nur von der Fertigung der Einzelteile, sondern auch maßgeblich von der Fertigstellung integrierter Elektronikbaugruppen abhängig. An dieser Stelle ist ein Abgleich der Zeitpläne zwischen den Arbeitsbereichen künftig unbedingt erforderlich.

4.1.3. METHODEN

Die verwendeten methodische Ansätze, allen voran sind hier das morphologische Schema und der SE- Problemlösungszyklus zu nennen, haben sich einmal mehr in vielen Bereichen als wichtiges und hilfreiches Werkzeug erwiesen.

Auf der anderen Seite hat sich gezeigt, dass man speziell bei engen Zeitplänen den vermehrten Zeitaufwand dieser Methoden gegen deren Nutzen abwägen muss.

Als Beispiel dafür sei die E-Box zu nennen. Sie wurde ohne jeglichen methodischen Ansatz entworfen. Das Resultat ist eine Baugruppe, die qualitativ womöglich nicht ideal ist, aber in einem Minimum an Entwicklungszeit entstand. Betrachtet man ihre Funktion, lässt sich schnell erkennen, dass selbst eine deutlich ausgeklügeltere Bauweise keine nennenswerte Leistungssteigerung des Roboters bringen würde. Dafür ist diese Baugruppe zu unbedeutend.

4.2. EVALUIERUNG DES KRIKKIT III

Es sei vorweggenommen, dass der Krikkit III bei Abschluss dieser Arbeit noch keinem kompletten Funktionstest unterzogen war. Lediglich Einzelkomponenten konnten bis dato erprobt werden. Das macht eine umfassende Evaluierung der Plattform schwierig. Im Folgenden sollen die bis jetzt ersichtlichen Punkte zusammengefasst werden.

4.2.1. ERREICHEN DER ZIELSETZUNG

Soweit sich bis jetzt sagen lässt, wurden alle kritischen technischen Zielsetzungen ohne Einschränkungen erreicht. Abzuwarten bleiben einmal mehr die Funktionstests am gesamten Roboter. Neben den technischen Anforderungen wird ein derartiges Projekt aber immer auch von zeitlichen und finanziellen Rahmenbedingungen begleitet.

Was den zeitlichen Fahrplan angeht, so lässt sich, nicht ohne ein gewisses Maß an Stolz, feststellen das die beiden entscheidenden Milestones, Designfreeze und Fertigstellung, ohne Verzögerung erreicht wurden.

Was den finanziellen Rahmen angeht, muss die Erfolgsmeldung etwas relativiert werden. Mit dem ursprünglich geplante Budget von 9.200 € wäre ein Roboter wie der Krikkit III nicht annähernd möglich gewesen. Nur durch die tatkräftige Unterstützung unserer zahlreichen Sponsoren war die Fertigung einer derart facettenreichen Plattform überhaupt möglich. Nachträgliche Schätzungen gehen von einem Material- und Fertigungsaufwand zwischen 20.000 und 30.000 € aus.

4.2.2. FAHRWERKSAUSLEGUNG

Eine genaue Evaluierung des Fahrwerks ist ausschließlich im Betrieb möglich. Die Daten und Simulationen zeichnen aber ein durchaus optimistisches Bild. Vor allem im Bereich der Fahrwerksschwingungen dürfte ein großer Schritt nach vorne gelungen sein.

Als weniger optimal muss an dieser Stelle das deutlich verzerrte Beschleunigungsprofil des Roboters bewertet werden. Sollte sich dieser Einfluss als tatsächlich störend erweisen, müsste hier eine Weiterentwicklung angestrebt werden.

4.2.3. MECANUM WHEELS

Die Omniwheels gehören laut den Ergebnissen dieser Arbeit zu den Baugruppen, deren Berechtigung am Roboter im Nachhinein gründlich überprüft werden sollte. Neben dem großen fertigungstechnischen Aufwand zeigt sich vor allem der wandernde Radaufstandspunkt als großes Problem. Die angestrebte zylindrische Hüllfläche konnte bei weitem nicht erreicht werden. Es ist also dennoch nötig die auftretenden Schwingungen vom Rumpf des Roboters abzuschirmen.

Es ist im Zuge von Weiterentwicklungen also unbedingt zu hinterfragen, ob nicht andere Bauarten omnidirektionaler Räder sinnvoller wären.

4.2.4. PRALLSCHUTZ

Die große Unbekannte bei der Funktion des Prallschutzes liegt bereits im Lastkollektiv. Im Nachhinein angestellte Vergleichsrechnungen deuten an, dass die für die erste Laststufe angegebene Energiemenge von 80 J überzogen ist. Verlässliche Aussagen darüber lassen aber wieder nur ausführliche Tests zu. Sollte sich der Wert aber als richtig erweisen ist eine entsprechende Anpassung der Absorber vorzunehmen. Diese sind derzeit in der Lage, je rund 13 J aufzunehmen. Abhängig vom Aufschlagpunkt ergibt das eine absorbierbare Gesamtenergie von insgesamt knapp 40 J.

4.3. AUSBLICK

Zusammenfassen hat der Krikkit III derzeit eher den Status eines Prototyps. Dementsprechend gestalten sich auch die nötigen nächsten Schritte.

4.3.1. TESTS

Vorrangige Aufgaben kommender Arbeiten am Roboter sollten ausführlichste Systemtest aller Komponenten sein. Besonders Fahrwerk, Kicker, Ballführung und Prallschutz sind hier hervorzuheben. Dabei sollte es neben den Einzelleistungen der Module vor allem um ihr Zusammenspiel im Roboter gehen. Diese Versuche stellen die Grundlage aller folgenden Verbesserungen dar.

4.3.2. SCHWINGUNGSTILGUNG UND SCHWINGUNGSDÄMPFUNG

Der im Kapitel „3.4 Fahrwerksschwingungen und Schwingungsdämpfung“ vorgestellte Längsdämpfer stellt nicht mehr als einen Prinzipversuch dar. Um ein optimales Ergebnis zu erhalten, ist hier eine detaillierte Dämpferauslegung durchzuführen, deren Ergebnis mittels Versuchen evaluiert werden sollten.

Aus jetziger Sicht stellt auch die in „3.4.3.3. Aktive Schwingungstilung“ vorgestellte Methode der aktiven Schwingungskontrollen einen vielversprechenden Ansatz dar. Er sollte unbedingt näheren Betrachtungen unterzogen werden.

4.3.3. BESCHLEUNIGUNGSTEST

Das Beschleunigungsprofil des neuen Roboters ist bis dato nur aus Simulationen am vereinfachten Modell bekannt. Da es sich dabei um eine entscheidende Größe handelt, sollte diese unbedingt mittels Versuchen am Prototyp verifiziert werden.

4.3.4. FERTIGSTELLUNG

Aus Zeitgründen wurden einige Fertigungsschritte, vor allem solche die rein der Gewichtseinsparung dienen, hinten angestellt. Diese sind noch nachzuholen.

VERZEICHNISSE

LITERATURVERZEICHNIS

- [ACE 2009] Gesamtkatalog 4.2009, Norgren Ges.m.b.H, 2009
- [Bar 2001] Bartsch H.-J., Taschenbuch Mathematischer Formeln, 19. Auflage, Carl Hanser Verlag, 2001
- [Bau 2008] Bauer W., Hydropneumatische Federungssysteme, Springer- Verlag, 2008
- [BHJ 2005] Brandstötter M., Hammer M., Jantscher S., Maschinenbau im RoboCup-, Projektarbeit, Technische Universität Graz, 2005
- [BK 2009] Barnes D. J., Kölling M., Java lernen mit BlueJ, 4. Auflage, Pearson-Studium-Verlag 2009
- [Bög 1999] Böge A. (Hrsg), Das Technische Handbuch Band 1, 7. Auflage, Vieweg-Verlag, 1999
- [BT 2007] Brandstötter M., Tselenis D., Maschinenbau im RoboCup- Spielfreies Mecanum Wheel, Projektarbeit, Technische Universität Graz, 2007
- [Dub 1997] Beitz W. (Hrsg), Grote K.- H. (Hrsg), Dubbel Taschenbuch für den Maschinenbau, 19. Auflage, Springer- Verlag, 1997
- [Dec 2000] Decker K. H., Maschinenelemente- Funktion, Gestaltung und Berechnung, 15. Auflage, Carl- Hanser- Verlag.
- [Gfr 2008] Gfrerrer A. , Geometry and kinematics of the Mecanum wheel, in ELSEVIER (Hrsg): Computer Aided Geometric Design 25 (2008) S784-791
- [GfS 2008] Gfrerrer A. , Kinematik und Robotik, 2. Fassung, Skriptum, Technische Universität Graz, 2008
- [GS 2003] Gohl W., Spies K.H. Elastomere- Dicht- und Konstruktionswerkstoffe, 5. Auflage, Expert- Verlag, 2003
- [HNB 2002] Haberfellner R., Nagel P., Becker M, Büchel A., von Massow H., Projekt- Management auf der Basis des Systems Engineering, 11. Auflage, Verlag Industrielle Organisation Zürich, 2002

Verzeichnisse

- [Ilo 1975] Ilo, B.E., Wheels for a course stable selfpropelling vehicle movable in any desired direction on the ground or some other base, US Patents and Trademarks Office, Patent 3,876,255, 1975
- [Jan 2008] Jantscher S., Modulares rekonfigurierbares Roboterfahrwerk, Diplomarbeit, Technische Universität Graz, 2008
- [Jue 2011] Jürgens G., Vorlesungsunterlagen Maschinenelemente, Technische Universität Graz 2011
- [Kol 2011] Kollar M., Entwicklung eines Handlingmoduls für eine autonome Roboterplattform, Diplomarbeit, Technische Universität Graz, 2011
- [Kov 2006] Kovac I., Industrial Robotics, 4. Fassung, Skriptum, Technische Universität Graz, 2006
- [Kov 2008] Kovac I., Flexible Automation, 1. Fassung, Skriptum, Technische Universität Graz, 2008
- [Lue 2010] Lueglinger C., Neuentwicklung eines Small Size League Roboters, Diplomarbeit, , Technische Universität Graz, 2010
- [MH 2003] Steinbauer G., Faschinger M., Fraser G.,mühlenfeld A.,Richter S.,Wöber G.,Wolf J., Mostly Harmless Team Discription, Mostly Harmless RoboCup-Team TU- Graz, 2003
- [MH 2004] Steinbauer G., Deutsch C., Fraser G.,Hagler M.,Mühlenfeld A., Richter S.,Wöber G.,Wolf J., Mostly Harmless Team Discription, Mostly Harmless RoboCup-Team TU- Graz, 2004
- [Mil 2009] Milwich M., Faserverbundwerkstoffe- Handbuch, R&G Faserverbundwerkstoff, GmbH, 2009
- [MPL 2010] Meessen K. J., Paulides J. J. H., Lomonova E. A., A Football Kicking High Speed Actuator for a Mobile Robotic Application, Eindhoven University of Technology, 2010
- [MS 2007] Meissner M., Schorcht H.-J., Metallfedern- Grundlagen, Werkstoffe, Berechnung, Gestaltung und Rechnereinsatz, 2. Auflage, Springer- Verlag, 2007
- [Rat 2011] Rath N., Entwicklung eines Antriebsmoduls für einen omnidirektionalen, mobilen Roboter, Projektarbeit, Technische Universität Graz, 2011

Verzeichnisse

- [RB 2000] Reimpell J., Betzler J., Fahrwerkstechnik: Grundlagen, Vogel Fachbuchverlag, 2000
- [RB 2011] Rath. N, Bader M., Being specialized, a role based approach for a new robot platform, in 1st Austrian Robotics Workshop, Hall in Tirol, 2011
- [RCI 2011] Internet: www.robocup.org/about-robocup/a-brief-history-of-robocup/; Stand 17.05.2011
- [RCF 2011] Middle Size Robot League- Rules and Regulations for 2011, RoboCup-Federation-MSL Technical Committee, 2011
- [RFC 2011] Internet: robocup.informatik.uni-stuttgart.de/rfc/www/, Stand 01.05.2011
- [Rüe 2010] Rüegg M., Maxon Motor Applikationsbericht: Stabilität und Dynamik- und das auf einer Kugel, Maxon Motor AG, 2010
- [Tho 2011] Thonhauser B., Entwicklung einer Kamerahalterung, Projektarbeit, Technische Universität Graz, 2011
- [UFR 2011] Internet: www.informatik.uni-freiburg.de/~ki/teaching/ss10/gki/ai42.pdf, Stand 28.04.2011
- [Zim 1999] Zima S., Kurbeltriebe- Konstruktion, Berechnung und Erprobung von den Anfängen bis heute, 2.Auflage, Vieweg- Verlag, 1999

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1. 1: Das Modell "Keksi"	6
Abbildung 1. 2: Der Krikkit I Abbildung 1. 3: Das Modell Krikkit II.....	7
Abbildung 1. 4: Der Versuchsroboter "Tricia"	8
Abbildung 2. 1: Das System- Engineering- Vorgehensmodell	10
Abbildung 2. 2: Zeitplan des Projekts „Krikkit III“	11
Abbildung 2. 3: Das Innenleben des Fahrwerks der Krikkit II- Klasse.....	13
Abbildung 2. 4: Modell der Ist-Zustands-Analyse	14
Abbildung 2. 5: Ist-Zustands-Analyse des Krikkit II	15
Abbildung 2. 6: Kosten-Nutzen-Analyse der möglichen Neuerungen	17
Abbildung 2. 7: Die 90°- Omniwheels der TU- Eindhofen.....	22
Abbildung 2. 8: Aktive Ballführung des Roboters der TU- Stuttgart.....	24
Abbildung 2. 9: Der "openTribot" der Universität Freiburg	25
Abbildung 2. 10: Brainstorming der benötigten Funktionen und Baugruppen am Roboter.....	30
Abbildung 2. 11: Verbindungen der Funktionen und Baugruppen am Roboter.....	31
Abbildung 2. 12: Gruppierung der Funktionen am Roboter zu bestimmten Modulen.....	32
Abbildung 2. 13: Die Anordnung der Module in einem frühen (a) und fortgeschrittenen (b) Stadium.....	32
Abbildung 2. 14: Prinzipskizze der Strebenbauweise	35
Abbildung 2. 15: Vergleich der elastischen Verformungen verschiedener Werkstoffe	36
Abbildung 2. 16: Vergleich der Massen von Biegestäben gleicher Steifigkeit	36
Abbildung 2. 17: Vergleich der Flächenmomente verschiedener Balkenquerschnitte.....	37
Abbildung 2. 18: Ersatzmodell der Grundplatte als Balken	38
Abbildung 2. 19: Approximierter Querschnitt einer zweischichtigen Struktur.....	39
Abbildung 2. 20: Aufbau des Rahmens.....	40
Abbildung 2. 21.: Kraftfluss in der Anlenkung eines Stabes der Steward-Gough-Plattform.....	42
Abbildung 2. 22: Das Vision-Modul	43
Abbildung 2. 23: CAD-Modell des Powertrain Moduls, wie es im Projekt [Rat 2011] beschreiben wird ...	44
Abbildung 2. 24: CAD- Modell des verbauten Mecanum-Wheels	45
Abbildung 2. 25:Kräfte an der Zylinderführung	46
Abbildung 2. 26 Einzelradaufhängung mit Parallelkinematik	47
Abbildung 2. 27: Parallelkineamtik auf der Basis von Festkörpergelenken.....	48
Abbildung 2. 28: Eingelenkpendelachse	49
Abbildung 2. 29: CAD des Krikkit III Powertrain Moduls	50
Abbildung 2. 30: Das Powertrainmodul	50
Abbildung 2. 31: Der Kicker	51

Verzeichnisse

Abbildung 2. 32: Lastkollektiv des Prallschutzes	54
Abbildung 2. 33: Prinzipielle Schildvarianten	54
Abbildung 2. 34: Prinzipskizze der Schildkonfiguration "Einzelschild"	55
Abbildung 2. 35: Prinzipskizze der Schildkonfiguration "Sektorenschild"	56
Abbildung 2. 36: Prinzipskizze der Schildkonfiguration "Mehrbereichsschild".....	57
Abbildung 2. 37: Feder-Dämpfersystem (a) und verschiedene Arten von Federkennlinien (b-d).....	58
Abbildung 2. 38: Federkennlinien von Tellerfedern und der Kombinationen	60
Abbildung 2. 39: Federkennlinie einer Gasdruckfeder.....	61
Abbildung 2. 40: Federkennlinien verschiedener Elastomerelemente	62
Abbildung 2. 41: Voigt-Kevin Ersatzsystem für Elastomerelemente.....	63
Abbildung 2. 42: Prinzip des Federmechanismus zur Beeinflussung der Federkennlinie	64
Abbildung 2. 43: Kniehebelprinzip (a) sowie Wegrelation(b) zwischen Primär- und Sekundärseite.....	65
Abbildung 2. 44: Morphologischer Kasten zum Entwurf des Prallschutzes	66
Abbildung 2. 45: Funktionsweise des Schockabsorbers	67
Abbildung 2. 46: Simulationsergebnis des Kraft-Wegverlaufs eines Schockabsorbers.....	68
Abbildung 2. 47: Reale Federkennlinie des Schockabsorbers, im Vergleich mit dem Simulationsergebnis	69
Abbildung 2. 48: Federträger mit Federn unterschiedlicher entspannter Länge	70
Abbildung 2. 49: Federkennlinie der eingesetzten Schraubenfedern	70
Abbildung 2. 50: Der Schockabsorber	71
Abbildung 2. 51: Energiebeobachtungen am Schockabsorber.....	72
Abbildung 2. 52: CAD- Modell des verwendeten Akkus.....	75
Abbildung 2. 53: Mögliche Einbaueinrichtungen der Akkus.....	76
Abbildung 2. 54: CAD-Modell des Akkuträger-Moduls.....	78
Abbildung 2. 55: Aufbau des Akkuschachts	78
Abbildung 2. 56: Der Akkuträger.....	79
Abbildung 2. 57: Die E-Box.....	81
Abbildung 2. 58: CAD-Modell des PC-Trägers auf der entsprechenden Aufhängung	82
Abbildung 2. 59: CAD-Modell und Prototyp der Krikkit III- Plattform ohne Servicemodul	83
Abbildung 3. 1: Vereinfachtes Modell des Krikkit-Fahrwerks	85
Abbildung 3. 2: Der Ballbot "Rezero" der ETH Zürich	87
Abbildung 3. 3: Das kinematische Modell für Mecanum Wheels (a) und 90°Omniwheels (b).....	88
Abbildung 3. 4.: Modelle eines omnidirektionalen (a) und eines konventionellen (b) Fahrwerks	91
Abbildung 3. 5: Prinzipielle Gestaltung des Krikkit III-Fahrwerks	92
Abbildung 3. 6: Das Beschleunigungsprofil als Vergleichskriterium	93
Abbildung 3. 7: Beschleunigungsprofile bei einer Variation der Schwerpunktslage entlang der Y-Achse..	96
Abbildung 3. 8: Beschleunigungsprofile bei einer Variation der Schwerpunktslage entlang der X-Achse..	97

Verzeichnisse

Abbildung 3. 9: Beschleunigungsprofile bei einer Variation der Schwerpunktshöhe.....	98
Abbildung 3. 10: Beschleunigungsprofile bei einer Variation der Radaufstandspunkte.....	99
Abbildung 3. 11: Einfluss der Orientierung der Omniwheels auf die Beschleunigungsfähigkeit.....	100
Abbildung 3. 12: Beschleunigungsprofile bei einer Variation der Orientierung der Omniwheels	100
Abbildung 3. 13: Beschleunigungsprofil des Krikkit III.....	102
Abbildung 3. 14: Beschleunigungsprofil der kinematischen Studie „Manndecker“	103
Abbildung 3. 15: Geometrische Zusammenhänge am Mecanum Wheel	105
Abbildung 3. 16: Vergleich der idealen und approximierten Erzeugenden der MW-Rollen	106
Abbildung 3. 17: Theoretischer Rundlauffehler nach der Approximation der Rollenerzeugenden.....	107
Abbildung 3. 18: Rundlaufprüfstand im Betrieb	109
Abbildung 3. 19: Ergebnis der rollenden Rundlaufmessung am Omniwheel des Krikkit III	109
Abbildung 3. 20: Verformung der Omniwheel- Rolle in Abhängigkeit von der wirkenden Anpresskraft .	110
Abbildung 3. 21: Vergleich der Überdeckung bei Mecanum-Wheels (a) und Evolventenverzahnung (b).	111
Abbildung 3.22: Reale Kontur der Omniwheel-Rollen.....	112
Abbildung 3. 23: Ergebnis der rollenden Rundlaufmessung am Omniwheel des Krikkit II.....	113
Abbildung 3. 24: Vertikalbeschleunigungen der Radachse während des Abrollvorgangs.....	114
Abbildung 3. 25: Vertikalbeschleunigungen am Fahrwerk bei einer Geschwindigkeit von ca. 0,3 m/s.....	116
Abbildung 3. 26: Fourieranalysen der Beschleunigungsverläufe bei verschiedenen Geschwindigkeiten ..	117
Abbildung 3. 27: Ersatzsystem des Roboters bei einer gedämpften Aufhängung der Antriebseinheiten ...	119
Abbildung 3. 28: Ersatzschaltbild eines Schwingungstilgers am Roboter	120
Abbildung 3. 29: Aktive Schwingungskompensation	121
Abbildung 3. 30: Aktive Schwingungskompensation mit fehlerhafter Phasenlage	122
Abbildung 3. 31: Simulierte Kompensation des dominanten Frequenzanteils.....	123
Abbildung 3. 32: Schematische Darstellung des Powertrainmoduls.....	124
Abbildung 3. 33.: Federkennlinie (a) und Ersatzschaltbild des verwendeten Elastomerdämpfers	124
Abbildung 3. 34: CAD-Modell des Powertrain-Voltigierprüfstands	125
Abbildung 3. 35: Der Aufbau des Voltigierprüfstands.....	126
Abbildung 3. 36: Vertikalbeschleunigungen in Abhängigkeit von der Verfahrensgeschwindigkeit.....	127
Abbildung 3. 37: Modell des Voltagierprüfstands für die Versuche mit (a) und ohne (b) Längsfeder.....	128
Abbildung 3. 38: Vergrößerungsfunktion des gefederten und ungefederten Fahrwerkers.....	128
Abbildung 3. 39: Vertikalbeschleunigungen im vereinfachten Fahrwerksmodell	129

TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 3. 1: Systematischer Ansatz zu Identifikation der Konfigurationen von Radaufstandspunkten.....	86
Tabelle 3. 2: Parametersatz des Krikkit III.....	101
Tabelle 3. 3: Parametersatz der kinematischen Studie „Manndecker“.....	103

ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

FIFA.....	Fédération Internationale de Football Association
IST.....	Institut für Software Technologie
KI	Künstliche Intelligenz
MSL	MidSizeLeague
MW	Mecanum Wheel
POM	Polyoxymethylen
SE.....	System Engineering
SimEng.....	Simultanes Engineering

Anhang

Inhaltsverzeichnis

A. MESSERGEBNISSE	1
A.A. PRALLSCHUTZFEDER.....	1
B. BERECHNUNGS- UND SIMULATIONSPROGRAMME	4
B.A. KINEMATIKSIMULATION	4
B.A.A. Main	4
B.A.B. Solve Kinematics	5
B.A.C. Get Torque_straightMax(Fn,beta,rw,phi,psi).....	7
B.B. RUNDLAUFBERECHNUNG	8
B.C. SIMULATION DER PRALLSCHUTZFEDER.....	10
C. DATENBLÄTTER	12
C.A. WERKSTOFFE	12
C.B. MOTOREN	16
C.C. GETRIEBE.....	18
D. ZUSAMMENSTELLUNGSZEICHNUNG	19

A. Messergebnisse

A.A. Prallschutzfeder

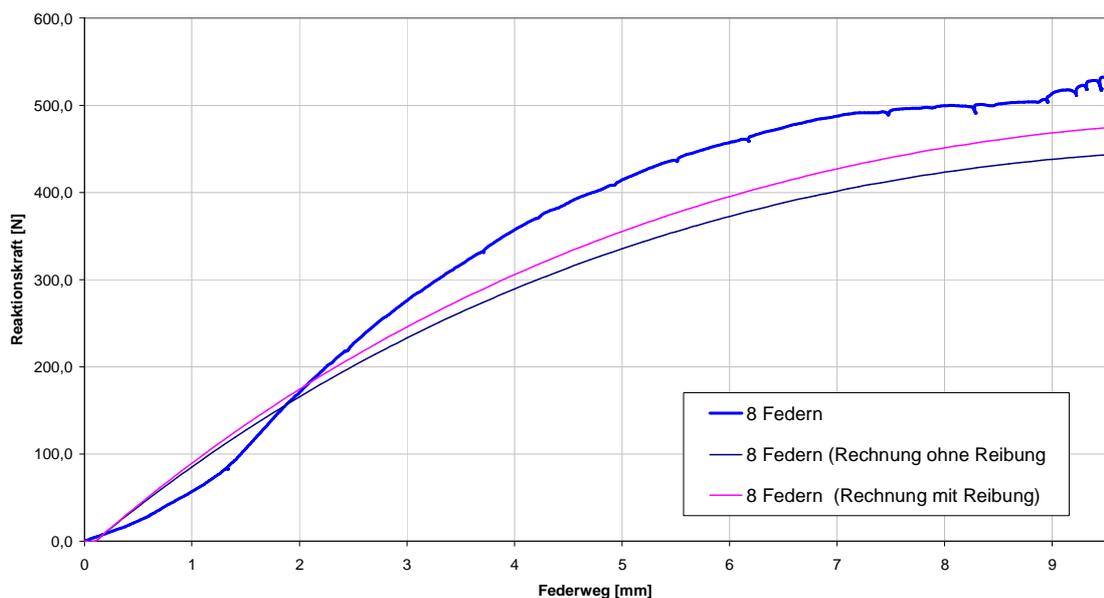


Abbildung A. 1: Absorberkennlinie 8 Federn

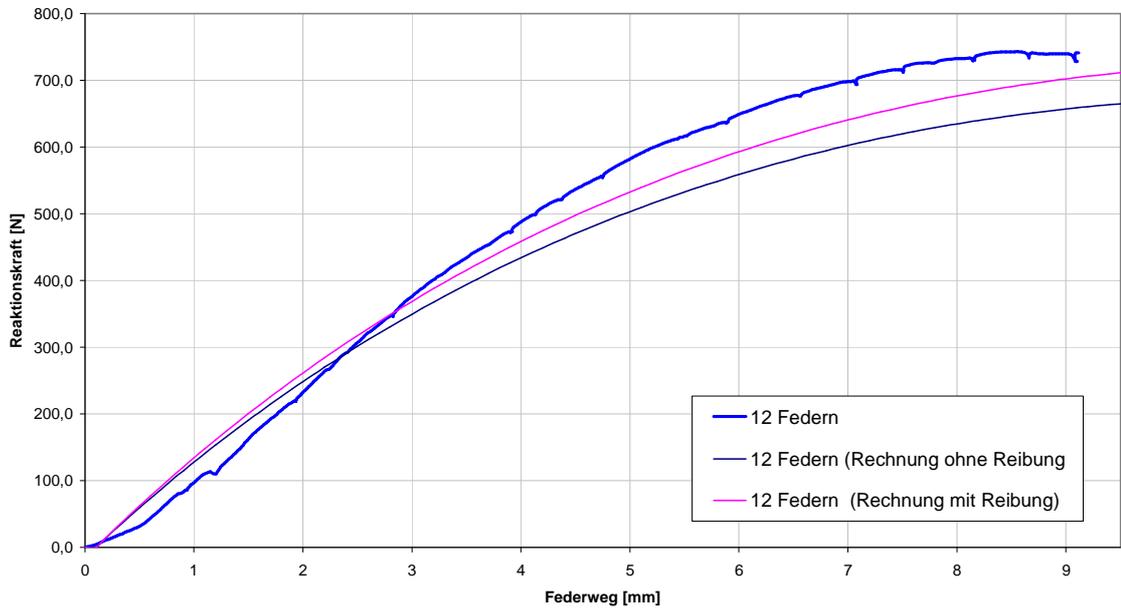


Abbildung A. 2: Absorberkennlinie 12 Federn

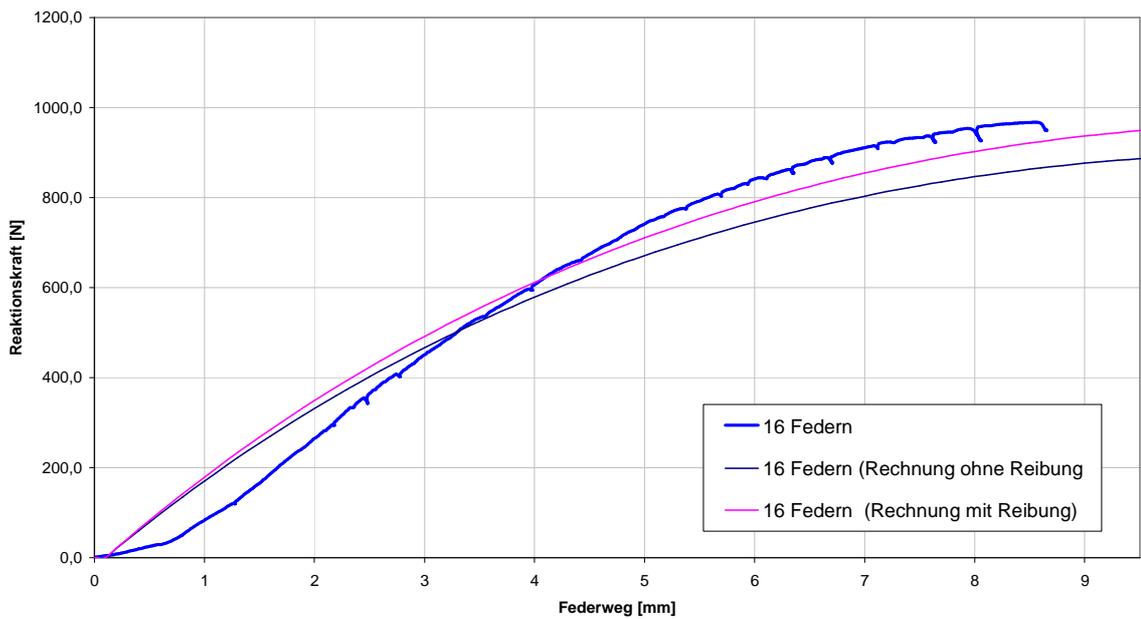


Abbildung A. 3: Absorberkennlinie 16 Federn

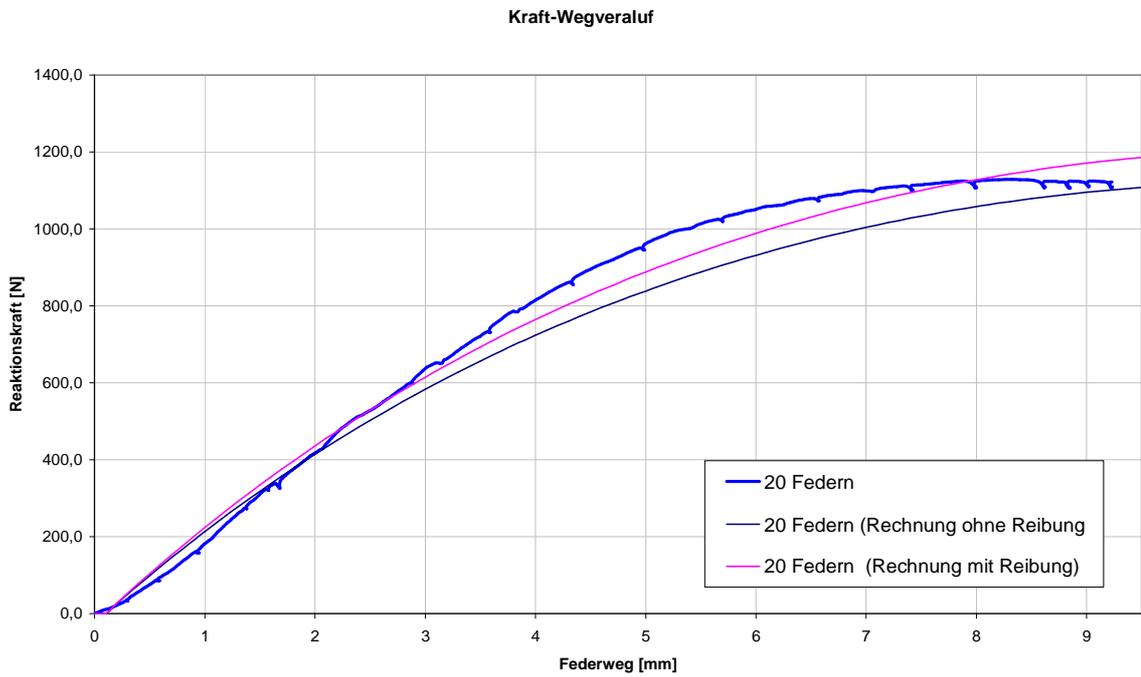


Abbildung A. 4: Absorberkennlinie 20 Federn

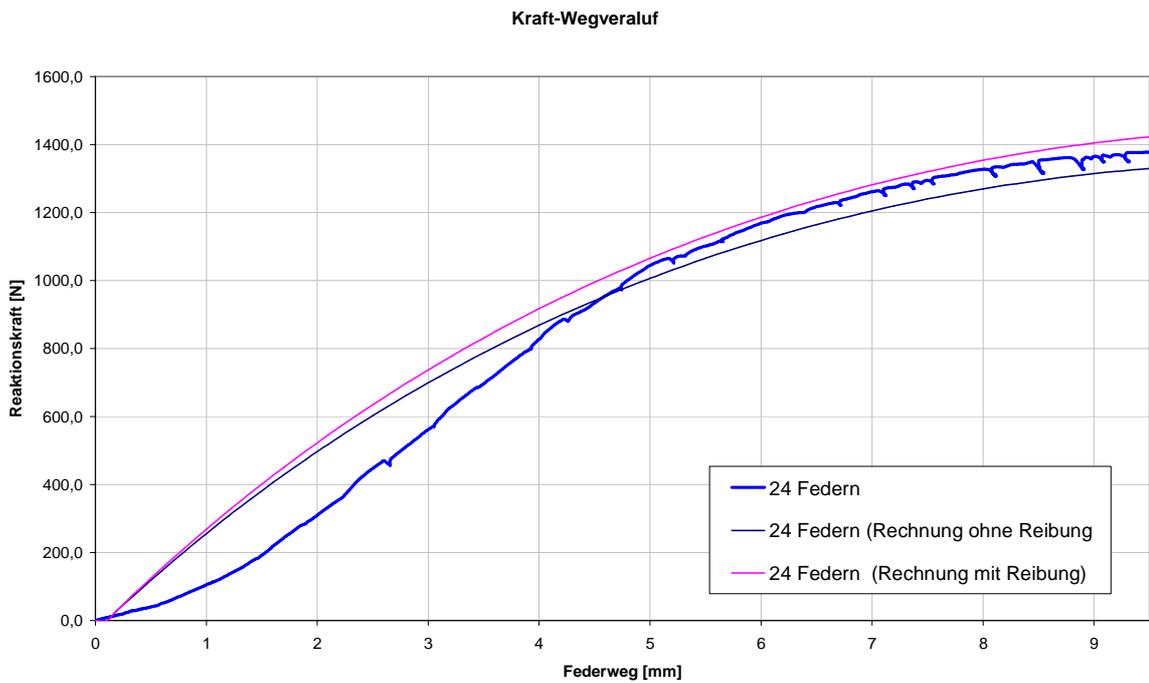


Abbildung A. 5: Absorberkennlinie 24 Federn

Berechnungs- und Simulationsprogramme

A.B. Kinematiksimulation

A.B.A. Main

```

clear all
close all;
clc
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Input %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
m = 36; % [kg] Masse des Roboters
Jr = 1.2 % [kgm^2] Massenträgheitsmoment des Roboters
xs = [0.0,0.00,0.20]; % [m] Lage des Roboterschwerpunkts
rw = [0.250,0.250,0.250]; % [m] "Radius" des Radaufstandspunkts vom
Ursprung
phi = [30/180*pi,150/180*pi,270/180*pi]; % [rad] Winkel zwischen dem Radius des
% Radaufstandspunktes und der X-Achse
psi = [+0/180*pi,0/180*pi,0/180*pi]; % [rad] Winkel zwischen dem Radius des Rad-
% aufstandspunkts und der Rollachse
T = 1000; % [ms] Endzeit der Simulation
tau = 10; % [ms] Simulationsintervall
n_steps = 91
myh = 0.414; % [] Haftreibungskoeffizient
myg = 0.344; % [] Gleitreibungskoeffizient
beta=1/2*pi; % Fahrtrichtung (Winkel zur positiven Y-Achse)

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Inputdata_Container %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
idk_real = [ m , Jr , 1; xs ; rw ; phi ; psi ; T,tau,1 ; myh,myg,1 ;
beta , 1 , 1 ];

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Lösen der Gleichungen %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
xr_alpha_container = zeros(2,n_steps); % Lagewerte
ar_alpha_container = zeros(2,n_steps); % Beschleunigungswerte

for ii=1:n_steps
alpha = (2*pi) * ( (ii-1)/(n_steps-1));
idk_real(8,1) = alpha;
[xr1_real,phir1_real,Fn_real,gleiten_real,a_v_real] = ...
...solveKinetics(idk_real); % Lösen der kinematischen Gleichungen
lastIndex = length(xr1_real);
xr_container(:,ii) = xr1_real(:,lastIndex); %% für Beschleunigungsprofil
xr_alpha_container(:,ii) = [ norm(xr1_real(:,lastIndex)) ;alpha];
ar_alpha_container(:,ii) = [ norm(a_v_real(:,lastIndex)) ;alpha];
end

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Darstellung %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
figure(1); hold on;
circle = [cos(xr_alpha_container(2,:)) ; sin(xr_alpha_container(2,:)) ];

robot = [[rw(1)*cos(phi(1)) , rw(1)*cos(phi(2)) , rw(1)*cos(phi(3)) ,
rw(1)*cos(phi(1))];
[rw(1)*sin(phi(1)) , rw(1)*sin(phi(2)) , rw(1)*sin(phi(3)) ,
rw(1)*sin(phi(1))]];

plot(robot(1,:),robot(2:3,:), 'k'); % Startposition eintragen
plot(circle(1,:); circle(2,:)) % Referenzkreis eintragen
plot(xr_alpha_container(1,:),xr_alpha_container(2,:), 'b'); % Beschleunigungsprofil zeichne
grid on; % Darstellung formatieren
hold off;
Axis equal;
Axis([-1.5 1.5 -1.5 1.5]);

```

A.B.B. Solve Kinematics

```

Function
[xr1_container, phir1_container, Fn_container, gleiten_container, a_v_container]
=solveKinetics(idk)

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Input %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
m = idk(1,1);           %[kg] Masse des Roboters
Jr = idk(1,2);         %[kgm^2] Massenträgheitsmoment des Roboters

xs = idk(2,:);         %[m] Lage es Roboterschwerpunkts
rw = idk(3,:);         %[m] "Radius" des Radaufstandspunkts vom Ursprung
phi = idk(4,:);        %[rad] Winkel zwischen dem Radius des
                        % Radaufstandspunktes und der positiven x-Achse
psi = idk(5,:);        %[rad] Winkel zwischen dem Radius des Rad-
                        % aufstandspunktes und der Rollenachse

T = idk(6,1);          %[ms] Endzeit der Simulation
tau = idk(6,2);        %[ms] Simulationsintervall
t = 0:tau:T;           %[ms] Vektor der Zeiten an den Stützstellen

myh = idk(7,1);        %[] Haftreibwert der Rollen
myg = idk(7,2);        %[] Gleitreibwert der Rollen

beta=idk(8,1);         % Fahrtrichtung(Winkel zur positiven Y-Achse)

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Konstante %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
g = 9.81;              %[m/s^2] Erdbeschleunigung
radius=0.06;           %[m] Radius des Omniwheels

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% "Globale" Variable %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
Fn = [m*g/3;m*g/3;m*g/3];
Fv_r= [0;0;0];         %[N] Beträge der Vortriebskräfte der einzelnen
Räder
Fv_res = [0;0;0];     %[N] Resultierende Vortriebskraft aller Motoren
M_res = 0;             %[Nm] Resultierendes Moment aller motoren

phir_1= 0;             %[rad] Orientierung des Roboters im Raum im WCS
xr_1 = [0;0;0];        %[m] Lage des Roboters im Raum
ar_r = [0;0;0];        %[m/s^2] Beschleunigung des Roboters im
roboterfesten CS
vr_r = [0;0;0];        %[m/s] Geschwindigkeit des Roboters im roboterfesten CS

alphar = 0;
omegar = 0;

gleiten = [0;0;0];     %

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Container %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

xr1_container = zeros(2,length(t));
a_v_container = zeros(2,length(t));
phir1_container = zeros(1,length(t));
gleiten_container = zeros(3,length(t));
Fn_container = zeros(3,length(t));
Fvreserve_container = zeros(3,length(t));
Mr_container = zeros(3,length(t));

for ii=1:length(t)

    t_lok = t(ii);     % Zeit des aktuelllen Iterationsschritt

```

Anhang

```
%%%%%%%%%%%% Berechnung der Radaufstandskräfte %%%%%%%%%%%%%%

A = [[ 1, 1, 1 ];
      [rw(1)*sin(phi(1)),rw(2)*sin(phi(2)),rw(3)*sin(phi(3)) ];
      [rw(1)*cos(phi(1)),rw(2)*cos(phi(2)),rw(3)*cos(phi(3)) ]];

b = [ (m*g) ; (m*g*xs(2) - m*ar_r(2)*xs(3)) ; (m*g*xs(1) -
m*ar_r(1)*xs(3))];
Fn = inv(A)*b;
Fn_container(:,ii)= Fn;

%%%%%%%%%%%% Prüfung auf abhebende Räder %%%%%%%%%%%%%%
if min(Fn) < 0
    error('Fahrwerksanalyse:SolveKinematics:Radaufstandskraf < 0','Zumindest
eines der Räder hebt vom Boden ab');
end

%%%%%%%%%%%% Generieren der Motormomente %%%%%%%%%%%%%%
M_lok = getTorque_straightMax(Fn,beta,rw,phi,psi);

%%%%%%%%%%%% errechnen der Vortriebskräfte %%%%%%%%%%%%%%
Fv_res = [0;0];
M_res = 0;
for jj = 1:3 %Für jeden Motor
    if gleiten(jj) == 1
        myMy = myg;
    else
        myMy = myh;
    end

    Fr_max = Fn(jj)*myMy;
    Fv_soll= M_lok(jj)/radius;
    Fvreserve_container(jj,ii) = abs(Fr_max/Fv_soll);

    if(Fr_max > abs(Fv_soll))
        Fv = Fv_soll;
        gleiten(jj) = 0;
    else
        Fv = Fn(jj)*myg*sign(Fv_soll);
        gleiten(jj) = 1;
    end

    alpha = phi + psi;
    Fv_res = Fv_res +[cos(alpha(jj))*Fv ; sin(alpha(jj))*Fv ];
    M_res = M_res + rw(jj)*Fv*cos(psi(jj))
end

%%%%%%%%%%%% Bewegungsanalyse %%%%%%%%%%%%%%
A = [cos(phir_1), -sin(phir_1); sin(phir_1),cos(phir_1)];
xr_1 = xr_1 + A*vr_r*tau/1000

ar_r = Fv_res/m
vr_r = vr_r+ar_r*tau/1000

omegar = omegar + alphas*tau/1000;
phir_1 = phir_1+omegar*tau/1000;

%%%%%%%%%%%% Container befüllen %%%%%%%%%%%%%%
xr1_container(:,ii) = xr_1;
a_v_container(1,ii) = norm(ar_r);
a_v_container(2,ii) = norm(vr_r);
gleiten_container(:,ii) = gleiten;
Fv_container(:,ii) = Fv;
phir1_container(:,ii) = phir_1;
Mr_container(:,ii) = M_lok;
```

Anhang

end

A.B.C. Get Torque_straightMax(Fn,beta,rw,phi,psi)

```
function [M_r] = getTorque_straightMax(Fn,beta,r,phi,psi)

my_grenz = 0.3900;
radius    = 0.06;

%F_soll = [-1*sin(beta);1*cos(beta)];

F_soll = [-1*sin(beta);1*cos(beta)];
theta = phi+psi;

A = [[ cos(theta(1)) , cos(theta(2)) , cos(theta(3)) ];
      [ sin(theta(1)) , sin(theta(2)) , sin(theta(3)) ];
      [ r(1)*sin(psi(1)) , r(2)*sin(psi(2)) , r(3)*sin(psi(3))]];
b= [ F_soll(1) ; F_soll(2) ; 0];
%A * Fv = b

Fv_soll = inv(A) *b;

Mr_soll = Fv_soll*radius;

Mr_grenz = Fn() * my_grenz * radius;
Sh = abs(Mr_soll./Mr_grenz);
Sh_max = max(Sh);

M_r = Mr_soll/Sh_max;
```

A.C. Rundlaufberechnung

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
clear all;
clc;
close all;

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
Konstanten %%%%%%%%%
pi=3.141521;

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
Variable %%%%%%%%%
dr = 25.1           %[mm] Durchmesser der Rolle
Rr = 108.9;        %[mm] Radius der Rollenerzeugenden
er = 47.5;         %[mm] Exzentrizität der Rollenachse am Rad
dw = 2*(er+dr/2)   %[mm] Aussendurchmesser der Hüllkurve

delta_vect = (-45/2:1:45/2).*pi/180           %[rad] Winkel der Rollenkontur
vectorlength= length(delta_vect);           %[] Länge der Verwendeten Datensätze
one_vect_etha = ones(1,vectorlength);        %[] Vektor voller Einsen
zero_vect_etha = zeros(1,vectorlength);      %[] Vektor voller Nullen

alpha = 45*pi/180;    %[rad] Verdrehwinkel zwischen Rollenachse und Radachse
epsilon = 0.0001;    %[] Zulässige Abweichung bei der Numerischen Lösung
scale = 10;          %[] Skalierungsfaktor der Rundlauffehler

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
Berechnung %%%%%%%%%
c=zeros(1,vectorlength);
c3d=zeros(3,vectorlength);
for ii = 1:vectorlength;           %% Für alle Delta-Winkel...
    delta = delta_vect(ii);        %% Aktuelles Delat...

    %%%%%%%%% Suche entspr. phi %%%%%%%%% %% Es wird der Winkel Delta gesucht, bei
    %dem derentstehende Punkt direkt unterhalb der y-Achse liegt (x=0)
    x_search = 1000;               %%Zur Lösung des Problems wird ein
    %Bisectionsverfahren verwendet, bis x kleiner epsilon

    phi_search = [];
    phi_t = 45*pi/180;             %% Oberer Schätzwert für x
    phi_b = -45*pi/180;           %% Unterer Schätzwert für x
    counter =100;
    while abs(x_search)>epsilon     %% Bisektion
        phi_search = (phi_b+phi_t)/2;
        x_search = cos(delta)*cos(alpha)*Rr*sin(phi_search) + sin(delta)*(-
            Rr*cos(phi_search)+ Rr-1/2*dr-er);

        if x_search >0
            phi_t = phi_search;
        else
            phi_b = phi_search;
        end
    end
    end
    phi_local=phi_search;

    %%%%%%%%% zeichne Kurve %%%%%%%%%
    cx = 0;
    cy = sin(alpha) * Rr*sin(phi_local);
    cz = -sin(delta)*cos(alpha)*Rr*sin(phi_local) + cos(delta)*(-
        Rr*cos(phi_local)+ Rr-1/2*dr-er);

    c3d(:,ii) = [cx;cy;cz];
    cz_vect(:,ii) = cz;

end

```

Anhang

```
%%%%%%%%%% Messwerte Laden %%%%%%%%%%%
fid = fopen('rl.txt','r+');
mw = fscanf(fid,'%5lf');

dr_mw=zeros(1,length(mw)/2);
phi_mw=zeros(1,length(mw)/2);

for ii=1:(length(mw)/2);
    dr_mw(ii) = mw(2*ii)/100;
    phi_mw(ii) = mw(2*ii-1) ;
end

%%%%%%%%%% Darstellung %%%%%%%%%%%
dcp_max = 0.25;
beta = 0:pi/91:pi;
dcp = sin(beta)*dcp_max-ones(size(beta))*dcp_max/2;
dcp = [dcp,dcp];

i_start = 92
ce = (cz_vect+dw/2)
cp = -scale * (ce+dcp(i_start:i_start+45)) + dw/2;
cref = -scale * (ce) + dw/2;
cref = [cref,cref,cref,cref,cref,cref,cref,cref];
cpr = [cp,cp,cp,cp,cp,cp,cp,cp];
cpphi = [delta_vect, delta_vect+pi/4, delta_vect+pi/2 , delta_vect+pi*3/4 ,
delta_vect+pi, delta_vect+pi*5/4, delta_vect+pi*3/2, delta_vect+pi*7/4];
cpx = cpr.*cos(cpphi);
cpy = cpr.*sin(cpphi);

cx = cref.*cos(cpphi);
cy = cref.*sin(cpphi);

%% Referenzlinie %%
phi_ref = (0:1:359)*pi/180;
r_ref = ones(size(phi_ref))* dw/2;
cpx_ref = r_ref.*cos(phi_ref);
cpy_ref = r_ref.*sin(phi_ref);

%% Messwerte %%
deltaphi = -45; % Ausrichtung der Messwerte nach der..
deltar = -22; % errechneten Kontru
cpr_mw = scale * (dr_mw-0.22) + dw/2;
cpr_mw = ones(size(cpr_mw))
cpphi_mw = (phi_mw + ones(size(phi_mw))*deltaphi).* pi/180;
cpx_mw = cpr_mw.*cos(cpphi_mw);
cpy_mw = cpr_mw.*sin(cpphi_mw);

%% Darstellung %%
figure(1); hold on;
plot(cpx_ref, cpy_ref,':b');
plot(cx, cy,':k');
plot(cpx, cpy);
%plot(cpx_mw, cpy_mw,'r');

%legend('Theoretische Abweichung','Gemessene Abweichung');
Grid on
axis equal;
%axis([0,60,-20,20])
```

A.D. Simulation der Prallschutzfeder

```

%%%%%%%%%% INIT %%%%%%%%%%%
clear all;
clc;
close all;

%%%%%%%%%% Konstanten %%%%%%%%%%%
pi = 3.141521;

s = 18;    %[mm]   Länge der Federhebel
cf = 28.6; %[N/mm] Federrate der Einzelfedern
f0 = 32.9; %[mm]   Unbelastete Federlänge (incl Federträger)

a = 42.5; %[mm]   Siehe Skizze
b = 10;    %[mm]   Siehe Skizze

%%%%%%%%%% Variable %%%%%%%%%%%
yf0= 30;   %[mm]Ruhende Länge von der hinteren bis zur vorderen Achse
dyf= 0:0.1:10.4; % [mm]  Verfahrenweg des Absorbers
nf = 24    %[] Anzahl der insg verbauten Spiralfedern

ones_vect = ones(size(dyf));    %[mm] Vector geeigneter Länge voller a
my  = 0.2;                      %[]   Reibwert zwischen Hebel und Achse
dr  = 5                          %[mm]  Achsendurchmesser

%%%%%%%%%% Berechnung %%%%%%%%%%%
%%% Geometrien %%%

    yf = ones_vect*yf0-dyf;

    yL = yf/2;                    % [mm] y-Koordinate des Punktes L
    xL = sqrt( ones_vect*s.^2 - (yL).^2); % [mm] x-Koordinate des Punktes L
    phi = atan2(xL,yL) ;

    a_vect = a*ones_vect;        % [mm] Vector geeigneter
Länge voller a
    b_vect = b*ones_vect;        % [mm] Vector geeigneter
Länge voller b

    f = sqrt((a_vect-xL).^2 + (yL-b_vect).^2);
    yab_vect = ones_vect * -0    % [mm] Y-Abweichung des
Federangriffpunkts an federträger klein
    dpsi_vect = ones_vect * (-5)*3.1415/180
    psi = atan2((yL+yab_vect-b_vect),(a_vect-xL))
    %psi2 = atan2((yL+yab_vect-b_vect),(a_vect-xL))+dpsi_vect;
    f0=f(1)+0

%%% Kräfte %%%
    Ff1 = (cf*(ones_vect*f0-f)) * (nf/2);    % [N] Kraft des Federpakets

    S1Z = my*dr*cos(psi).*sin(phi) - 2*s*cos(psi).*cos(phi) -
        my*dr*sin(psi).*cos(phi) + 2*s*sin(psi).*sin(phi);
    S1N = my^2*dr^2*cos(phi).*sin(phi) - 2*my*dr*s*cos(phi).*cos(phi) -
        2*my*dr*s*sin(phi).*sin(phi) + 4*s^2*sin(phi).*cos(phi);
    S1_R = -Ff1*s *(S1Z/S1N);
    Fr = 2*S1_R .* (cos(phi) + sin(phi)*my*dr/2/s);

    my = 0.0
    S1Z = my*dr*cos(psi).*sin(phi) - 2*s*cos(psi).*cos(phi) -
        my*dr*sin(psi).*cos(phi) + 2*s*sin(psi).*sin(phi);
    S1N = my^2*dr^2*cos(phi).*sin(phi) - 2*my*dr*s*cos(phi).*cos(phi) -
        2*my*dr*s*sin(phi).*sin(phi) + 4*s^2*sin(phi).*cos(phi);
    S1_R = -Ff1*s *(S1Z/S1N);
    F = 2*S1_R .* (cos(phi) + sin(phi)*my*dr/2/s); % [N] Absorbentstuetzkraft

```

Anhang

```
%%%%%%%%%% Darstellung %%%%%%%%%%%
```

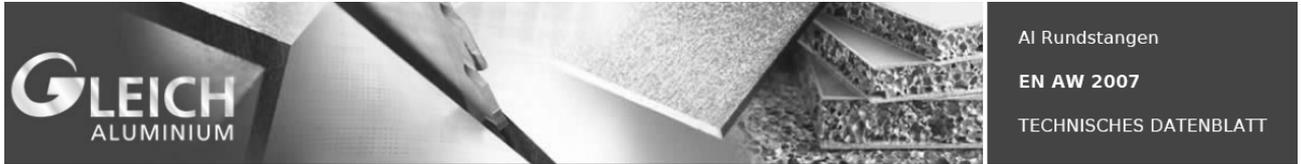
```
figure(1); hold on  
Xlabel('Verformung [mm]')  
Ylabel('Krafte [N]')  
plot(dyf, F);  
plot(dyf, Fr, 'r:');  
plot(dy_12, F_12, 'ro');
```

```
%%%%%%%%%% Ausdruck %%%%%%%%%%%
```

```
out = [dyf;F;Fr];  
fid = fopen('Federberechnung_F24.txt','wt');  
fprintf(fid,'%6.2f %6.2f %6.2f\n',out);  
fclose(fid);
```

B. Datenblätter

B.A. Werkstoffe



EN AW 2007

Werkstoffangaben	
Legierung	EN AW 2007 [AlCu4PbMgMn]
Werkstoffzustand	T4,T4510,T4511
Oberfläche	pressblank

Mechanische Eigenschaften		typische Werte
Dehngrenze	[MPa]	210 - 250
Zugfestigkeit	[MPa]	330 - 370
Bruchdehnung A ₅	[%]	7 - 8

Physikalische Eigenschaften		typische Werte
Dichte	[g/cm ³]	2,85
Elastizitätsmodul	[GPa]	~ 70
Elektrische Leitfähigkeit	[m / Ω mm ²]	18 - 22
Wärmeausdehnungskoeffizient	[K ⁻¹ · 10 ⁻⁶]	23,0
Wärmeleitfähigkeit	[W/m · K]	130 -160
Spezifische Wärmekapazität	[J/kg · K]	900

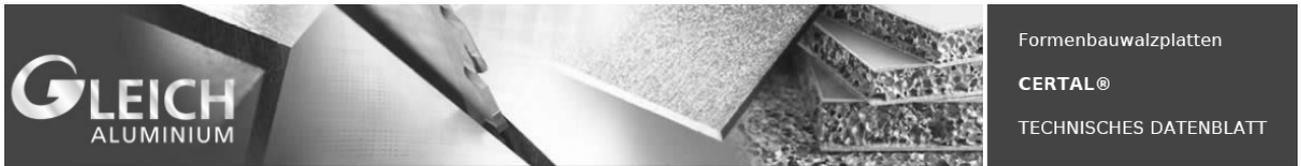
Technologische Eigenschaften ²⁾	
Formstabilität/Eigenspannung	2
Zerspanbarkeit	1
Erodierbarkeit	1
Schweißen (Gas / WIG / MIG / Widerstand / EB)	6/6/6/6/6
Korrosionsbeständigkeit (Meerwasser / Witterung / SpRK)	5/5/4
Temperatureinsatz (max°C bei Dauer / Kurzeinsatz)	90/120
Verformbarkeit	4
Anodisieren (technisch / dekorativ / Hart-) ²⁾	5/6/4
Polierbarkeit	3
Eignung zum Strukturätzen	5
Kontakt mit Lebensmitteln (nach DIN EN 602)	nein

Toleranzen			
bei Dicke [mm]	Ebenheit [mm] ⁴⁾	Dicke [mm]	Länge & Breite [mm]

Lieferformate (lageregeführte Abmessungen)	
Formate	3000 mm bei Dicken von 10 - 300 mm

Stand: 16.02.2011

- 1) Typische Werte bei Raumtemperatur
- 2) Relative Bewertung der Aluminiumwerkstoffe von 1 (sehr gut) bis 6 (ungeeignet)
- 3) Ausschl. technisches Anodisieren. Keine Gewährleistung auf Farbgestaltung/-ausbildung
- 4) Die Ebenheitstoleranzen werden ausschließlich an ganzen Platten (pro Meter) auf Messtischen ermittelt.



CERTAL®

Werkstoffangaben	
Legierung	EN AW 7022 [AlZn5Mg3Cu], Sondertyp
Legierungstyp	aushärtbar
Werkstoffzustand	T651, entspannt durch Recken
Oberfläche	Walzhaut

Mechanische Eigenschaften		typische Werte
Dehngrenze	[MPa]	490 - 495
Zugfestigkeit	[MPa]	545 - 555
Bruchdehnung A ₅₀	[%]	7 - 9
Härte HBW	[2,5/62,5]	165 - 170

Physikalische Eigenschaften		typische Werte
Dichte	[g/cm ³]	2,76
Elastizitätsmodul	[GPa]	~72
Elektrische Leitfähigkeit	[m / Ω mm ²]	18 - 22
Wärmeausdehnungskoeffizient	[K ⁻¹ · 10 ⁻⁶]	23,6
Wärmeleitfähigkeit	[W/m · K]	120 - 150
Spezifische Wärmekapazität	[J/kg · K]	862

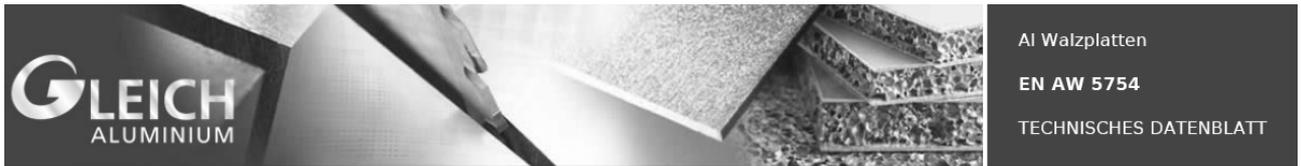
Technologische Eigenschaften ²⁾	
Formstabilität/Eigen Spannung	3 - 4
Zerspanbarkeit	1
Erodierbarkeit	1
Schweißen (Gas / WIG / MIG / Widerstand / EB)	6/6/6/2/4
Korrosionsbeständigkeit (Meerwasser / Witterung / SpRK)	5/5/4
Verformbarkeit	6
Anodisieren (technisch / dekorativ / Hart-) ²⁾	3/6/2
Polierbarkeit	1
Eignung zum Strukturätzen	2
Kontakt mit Lebensmitteln (nach DIN EN 602)	nein

Toleranzen			
bei Dicke [mm]	Ebenheit [mm] ⁴⁾	Dicke [mm]	Länge & Breite [mm]
bis 140	gem. DIN EN 485-3	gem. DIN EN 485-3	DIN ISO 2768-1m

Stand: 16.02.2011

- 1) Typische Werte bei Raumtemperatur
- 2) Relative Bewertung der Aluminiumwerkstoffe von 1 (sehr gut) bis 6 (ungeeignet)
- 3) Ausschl. technisches Anodisieren. Keine Gewährleistung auf Farbgestaltung/-ausbildung
- 4) Die Ebenheitstoleranzen werden ausschließlich an ganzen Platten (pro Meter) auf Messtischen ermittelt.

CERTAL® ist ein eingetragenes Warenzeichen der ALCAN Valais



EN AW 5754

Werkstoffangaben	
Legierung	EN AW 5754 [AlMg3]
Legierungstyp	nicht aushärtbar, naturhart
Werkstoffzustand	H111
Oberfläche	walzblank oder gebürstet

Mechanische Eigenschaften		typische Werte
Dehngrenze	[MPa]	80
Zugfestigkeit	[MPa]	190
Bruchdehnung A ₅₀	[%]	12
Härte HBW	[2,5/62,5]	50

Physikalische Eigenschaften		typische Werte
Dichte	[g/cm ³]	2,67
Elastizitätsmodul	[GPa]	~ 70
Elektrische Leitfähigkeit	[m / Ω mm ²]	18 - 22
Wärmeausdehnungskoeffizient	[K ⁻¹ · 10 ⁻⁶]	23,0
Wärmeleitfähigkeit	[W/m · K]	130 -160
Spezifische Wärmekapazität	[J/kg · K]	900

Technologische Eigenschaften ²⁾	
Formstabilität/Eigen Spannung	2
Zerspanbarkeit	1
Erodierbarkeit	1
Schweißen (Gas / WIG / MIG / Widerstand / EB)	6/6/6/6/6
Korrosionsbeständigkeit (Meerwasser / Witterung / SpRK)	5/5/4
Temperatureinsatz (max°C bei Dauer / Kurzeinsatz)	90/120
Verformbarkeit	4
Anodisieren (technisch / dekorativ / Hart-) ²⁾	5/6/4
Polierbarkeit	3
Eignung zum Strukturätzen	5
Kontakt mit Lebensmitteln (nach DIN EN 602)	nein

Toleranzen			
bei Dicke [mm]	Ebenheit [mm] ⁴⁾	Dicke [mm]	Länge & Breite [mm]

Lieferformate (lagergeführte Abmessungen)			
Formate	3000 mm	bei Dicken von 10 - 300 mm	

- 1) Typische Werte bei Raumtemperatur
- 2) Relative Bewertung der Aluminiumwerkstoffe von 1 (sehr gut) bis 6 (ungeeignet)
- 3) Ausschl. technisches Anodisieren. Keine Gewährleistung auf Farbgestaltung/-ausbildung
- 4) Die Ebenheitstoleranzen werden ausschließlich an ganzen Platten (pro Meter) auf Messtischen ermittelt.

TECARAN

The following information corresponds with our current knowledge and indicates our products and possible applications. We cannot give a legally binding guarantee of certain properties or the suitability for a specific application. Existing commercial patents must be observed. A definitive quality guarantee is given in our general conditions of sales. Unless otherwise stated, these values represent averages taken from injection moulding samples. We reserve the right of technical alterations.

Properties	Unit	Test method DIN ASTM	
Mechanical			
Density	g/cm ³	53 479	1.06
Tensile strength at yield	MPa	53 455	45
Tensile strength at break	MPa	53 455	
Elongation at break	%	53 455	20
Modulus of elasticity in tension	MPa	53 457	2400
Modulus of elasticity in flexure	MPa	53 457	
Ball indentation hardness	MPa	53 456	90
Impact strength (Charpy)	kJ/m ²	53 453	no br
Creep rupture strength after 1000 hrs with static load	MPa		28
Time yield limit for 1% elongation after 1000 hrs.	MPa		17
Coefficient of friction against hardened and ground steel p = 0,05 N/mm ² , v = 0,6 m/s	-		0.5
Wear conditions as above	µm/km		8.4
Thermal			
Crystalline melting point	°C	53 736	-
Glass transition temperature	°C	53 736	85-100
Heat distortion temperature Method A Method B	°C °C	ISO 75 ISO 75	82 - 104 96 - 108

Properties	Unit	Test method DIN ASTM	
Thermal			
Max. service temperature short term long term °C	°C		100 85
Coefficient of thermal conductivity	W/(m · K)		0.17
Specific heat	J/(g · K)		1.2
Coefficient of thermal expansion	10 ⁻⁵ /K		8
Electrical			
Dielectric constant at 10 ² Hz		53 483	3.3
Dielectric loss factor at 10 ⁵ Hz		53 483	0.015
Specific volume resistance	Ω · cm	53 482	> 10 ¹⁵
Surface resistance	Ω	53 482	
Dielectric strength 1 mm	kV/mm	53 481	>22
Tracking resistance		53 480	KA 3b
Miscellaneous			
Moisture absorption: Equilibrium in standard atmosphere (23 °C / 50 % relative humidity)	%	53 714	0.3
Water absorption at saturation at 23 °C	%	53 495	0.7
Resistance to hot water, washing soda			not resistant
Flammability		UL 94	HB
Resistance to weathering			not resistant

* after storage in a standard 23/50 atmosphere (DIN 50 014) to equilibrium

ENSINGER: Production and stock programme

- ! Semi-finished product, finished parts, injection moulded parts and profiles in more than 500 materials and modifications.
- ! Engineering plastics: PA extruded or cast, POM, PC, PET, PBT, PPE, PP, PE
- ! High temperature plastics: PI, TPI, PEEK, PPS, PES, PPSU, PEI, PSU, PVDF, PCTFE, PTFE
- ! Stock length: Standard 3 metres
- ! Pressed/sintered semi-finished product: PI, PEEK, PPS, PTFE/PI and modifications, as well as PCTFE in special sizes ie, large discs, tubes and rings with diameters up to about 1400 mm
- ! Material modifications: eg glass, carbon and aramid fibre, talc, MoS₂, graphite, PTFE, PE, silicone oil, internal lubrication
- ! Pultruded stock shapes: matrix polyester, vinylester and epoxy resin with glass or carbon continuous fibre

B.B. Motoren



Bürstenlose DC-Servomotoren

191 mNm

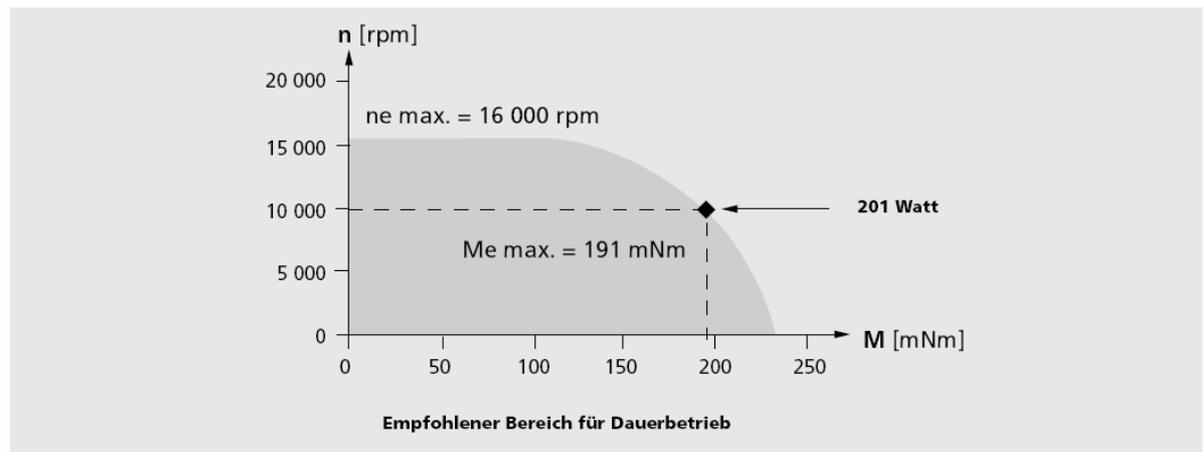
Kombinierbar mit
 Getriebe:
 38A, 44/1
 Encoder:
 IE3-1024, IE3-1024 L, 40B
 Steuerungen:
 Speed Controller, Motion Controller

Serie 4490 ... B

	4490 H	024 B	036 B	048 B	
1 Nennspannung	U _N	24	36	48	Volt
2 Anschlusswiderstand, Phase-Phase	R	0,237	0,445	0,720	Ω
3 Abgabeleistung ¹⁾	P ₂ max.	201	201	200	W
4 Wirkungsgrad	η max.	86	86	86	%
5 Leerlaufdrehzahl	n ₀	9 550	10 450	11 000	rpm
6 Leerlaufstrom (bei Wellen ø 6,0 mm)	I ₀	0,554	0,432	0,354	A
7 Anhaltmoment	M _H	2 406	2 637	2 758	mNm
8 Reibungsdrehmoment, statisch	C ₀	3,65	3,65	3,65	mNm
9 Reibungsdrehmoment, dynamisch	C _v	1,0 · 10 ⁻³	1,0 · 10 ⁻³	1,0 · 10 ⁻³	mNm/rpm
10 Drehzahlkonstante	k _n	401	292	231	rpm/V
11 Generator-Spannungskonstante	k _E	2,495	3,422	4,335	mV/rpm
12 Drehmomentkonstante	k _M	23,83	32,68	41,40	mNm/A
13 Stromkonstante	k _i	0,042	0,031	0,024	A/mNm
14 Steigung der n-M-Kennlinie	Δn/ΔM	4,0	4,0	4,0	rpm/mNm
15 Anschlussinduktivität, Phase-Phase	L	76	143	236	μH
16 Mechanische Anlaufzeitkonstante	T _m	5	5	5	ms
17 Rotorträgheitsmoment	J	130	130	130	gcm ²
18 Winkelbeschleunigung	α max.	185	203	212	· 10 ³ rad/s ²
19 Wärmewiderstände	R _{th 1} / R _{th 2}	1,35 / 3,94			K/W
20 Thermische Zeitkonstante	T _{w1} / T _{w2}	29 / 1 756			s
21 Betriebstemperaturbereich		- 30 ... +125			°C
22 Wellenlagerung		Kugellager, vorgespannt			
23 Wellenbelastung, max. zulässig:					
– radial bei 3 000/10 000 rpm (13,5 mm vom Befestigungsflansch)		103 / 66			N
– axial bei 3 000/10 000 rpm (auf Druckbelastung)		45 / 30			N
– axial im Stillstand (auf Druckbelastung)		135			N
24 Wellenspiel:					
– radial	≤	0,015			mm
– axial	≡	0			mm
25 Gehäusematerial		Aluminium, schwarz eloxiert			
26 Gewicht		750			g
27 Drehrichtung		ansteuerungsbedingt			
Wicklungsbeschaltung		Δ Dreieckschaltung			
Empfohlene Werte - diese gelten unabhängig voneinander					
28 Drehzahl bis ²⁾	n ₀ max.	16 000	16 000	16 000	rpm
29 Dauerdrehmoment bis ^{1) 2)}	M _e max.	191,8	191,9	191,1	mNm
30 Thermisch zulässiger Dauerstrom ^{1) 2)}	I _e max.	8,62	6,29	4,95	A

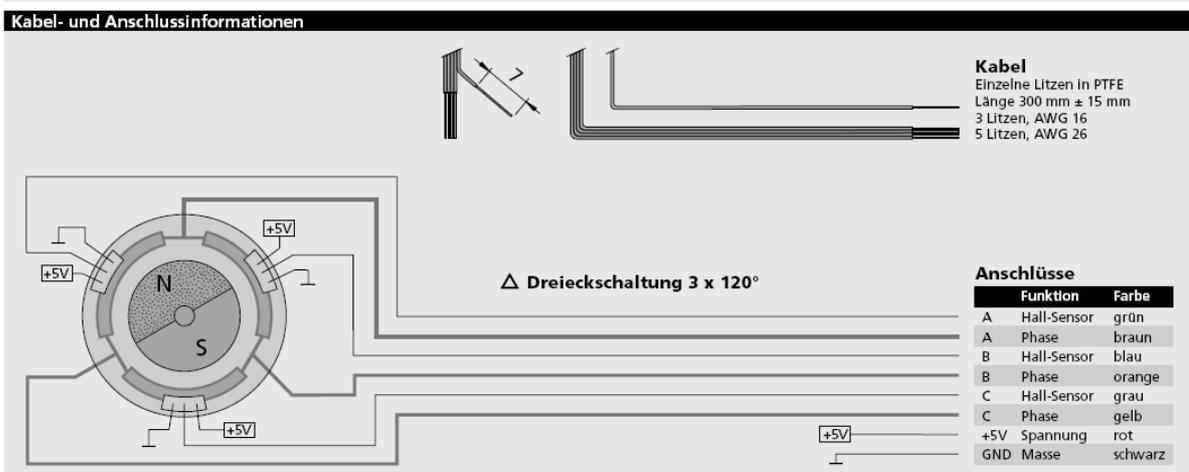
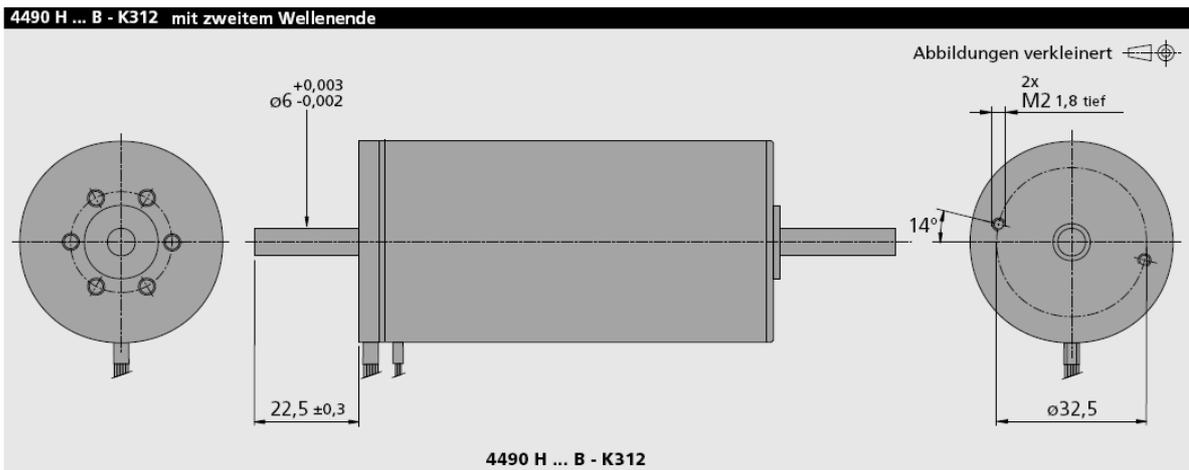
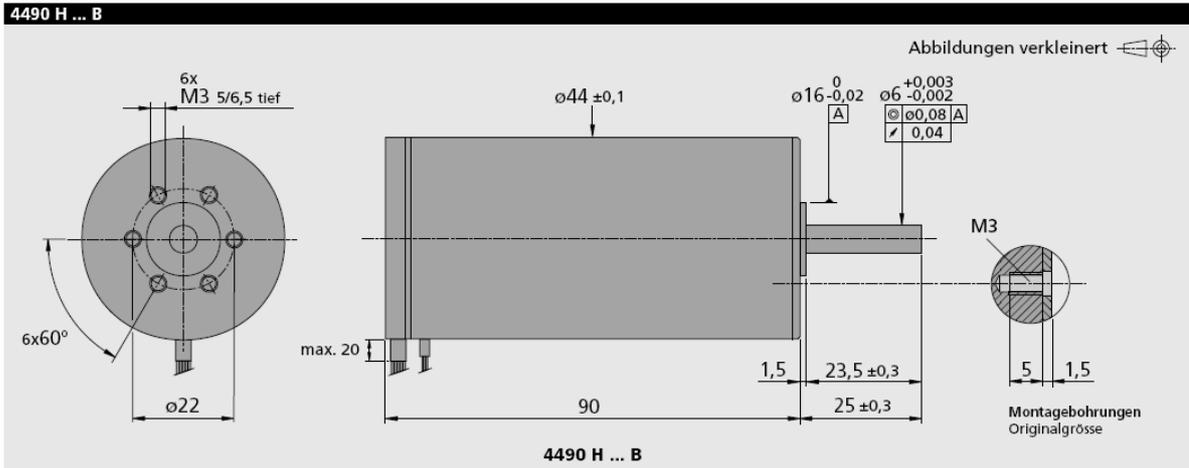
¹⁾ bei 10 000 rpm

²⁾ Wärmewiderstand R_{th 2} um 55% reduziert



Angaben zu Gewährleistung und Lebensdauer sowie weitere technische Erläuterungen siehe „Technische Informationen“. Edition 2011 – 2012

Sonderausführungen
K1155:
Motoren mit linearen Hall-Sensoren.



Angaben zu Gewährleistung und Lebensdauer sowie weitere technische Erläuterungen siehe „Technische Informationen“. Edition 2011 – 2012

B.C. Getriebe



Planetengetriebe

16 Nm

Kombinierbar mit
DC-Kleinstmotoren:
3863
Bürstenlosen DC-Servomotoren:
4490

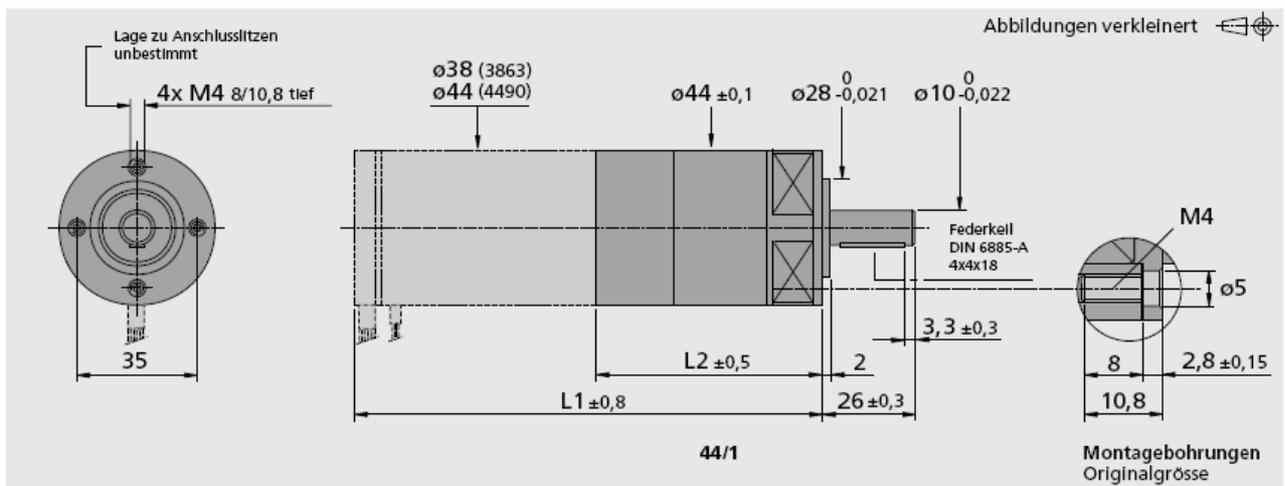
Serie 44/1

	44/1
Gehäusewerkstoff	Metall
Zahnräderwerkstoff	Metall
Max. empfohlene Eingangsdrehzahl für: – Dauerbetrieb	3 500 rpm
Getriebeispiel, unbelastet	≤ 1°
Abtriebswellenlager	Kugellager, vorgespannt
Maximal zulässige Wellenbelastung: – radial (12 mm vom Befestigungsflansch)	≤ 400 N
– axial	≤ 350 N
Maximale Aufpresskraft	≤ 500 N
Wellenspiel: – radial (12 mm vom Befestigungsflansch)	≤ 0,03 mm
– axial	= 0 mm
Betriebstemperaturbereich	– 30 ... + 125 °C

Technische Daten

Untersetzungs- verhältnis (nominal)	Gewicht ohne Motor g	Länge ohne Motor L2 mm	Länge mit Motor		Drehmoment		Drehsinn der Welle (reversibel)	Wirkungs- grad %
			4490 H L1 mm	3863 H L1 mm	Dauer- betrieb M max. Nm	Kurzzeit- betrieb M max. Nm		
4,8 :1	480	62,2	152,2	126,1	16	20	=	90
23 :1	600	77,8	167,8	141,8	16	20	=	80
111 :1	720	93,2	183,2	157,2	16	20	=	70
531 :1	840	108,6	198,6	172,6	16	20	=	65
2 548 :1	960	124,0	214,0	188,0	16	20	=	60

Hinweis: Die angegebenen Untersetzungsverhältnisse sind gerundet, exakte Werte sind auf Anfrage erhältlich.



Angaben zu Gewährleistung und Lebensdauer sowie weitere technische Erläuterungen siehe „Technische Informationen“.
Edition 2010 – 2011

© DR. FRITZ FAULHABER GMBH & CO. KG
Änderungen vorbehalten.
www.faulhaber.com

