



FACHHOCHSCHUL - BACHELORSTUDIENGANG  
AUTOMATISIERUNGSTECHNIK

---

# Differenzialantriebseinheit mit inkludiertem Wegmesssystem für mobile Roboter

Als Bachelorarbeit eingereicht

zur Erlangung des akademischen Grades

Bachelor of Science in Engineering

von

**CHRISTIAN PRECHTL**

Februar 2009

---

Betreuung der Bachelorarbeit durch  
**Prof(FH) Dipl. Ing. Walter Rokitansky**



Campus **Wels**

Ich erkläre ehrenwörtlich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und ohne fremde Hilfe verfasst, andere als die angegebenen Quellen nicht benutzt, die den benutzten Quellen entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe und dass die Arbeit mit der vom Begutachter beurteilten Arbeit übereinstimmt.

Die Arbeit wurde bisher in gleicher oder ähnlicher Form keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt und auch nicht veröffentlicht.

.....  
«Vorname, Name»

.....  
«Wohnort», «Datum»

---

## Kurzfassung

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit Fragestellungen aus dem Bereich der Antriebseinheiten mobiler Roboter.

Aufbauend auf einer Internetrecherche und auf Literaturstudien wurde im Zuge der ersten Bachelorarbeit an der FH-Wels im Wintersemester 08/09 eine Differenzialeinheit entwickelt. Ausgehend von den theoretischen Grundlagen wurde ein Konzept entwickelt, das in Folge verwirklicht wurde. Ein Verweis auf die relevanten Grundlagen erfolgt durch Verweis auf entsprechende Quellen aus dem Internet, aber auch durch Referenz auf entsprechende Literaturen und Lehrveranstaltungen aus dem Studium. Neben den Ergebnissen der Arbeit werden auch alternative und frühere Konzepte beschrieben.

Des Weiteren gibt diese Arbeit einen Ausblick auf das Gesamtkonzept MARK2009 und auf alternative Einsatzmöglichkeiten. Im Anhang der Arbeit sind die entsprechenden Datenblätter und Konstruktionszeichnungen angeführt.

Infolgedessen kann diese Arbeit verwendet werden um einerseits einen Überblick über Antriebskonzepte zu bekommen, andererseits als Grundlage für die Realisierung eines Roboterkonzepts mit entsprechender Differenzialantriebseinheit.

# Inhaltsverzeichnis

<b>Inhaltsverzeichnis</b>	<b>III</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1 Abgrenzung zum Fächerübergreifenden Projekt „Mark09“	2
1.2 Gliederung der Bachelorarbeit	2
<b>2 Theoretische Grundlagen</b>	<b>3</b>
2.1 Mechanik	4
2.2 Gleichstrommaschine	6
2.3 Inkrementalgeber	8
<b>3 Konzept „Antriebseinheit“</b>	<b>10</b>
3.1 Konzept „Neu“	11
3.2 Alternative Konzepte	12
3.3 Frühere Konzepte	13
<b>4 Verwirklichung, Ergebnisse und Gesamtkonzept „Mark09“</b>	<b>14</b>
4.1 Verwirklichung	15
4.1.1 Testaufbau	15
4.1.2 Endgültige Version	15
4.2 Ergebnisse	18
4.3 Gesamtkonzept „MARK09“	20
4.3.1 Modulares mechanisches System	20
4.3.2 Alternative Einsatzmöglichkeiten	21
<b>5 Fazit und Dank</b>	<b>23</b>
<b>6 Verzeichnisse</b>	<b>24</b>
Abbildungsverzeichnis	25
Tabellenverzeichnis	26
Literaturverzeichnis	27
<b>7 Anhang</b>	<b>28</b>

# Kapitel 1

## Einleitung

---

*„Aller Anfang ist leicht und die letzten Stufen werden am schwersten und seltensten erstiegen.“*

**Johann Wolfgang von Goethe(1749-1832), dt. Dichter**

---

In den letzten Jahren stieg die Anzahl der Roboter in vielen Bereichen enorm an. Roboter werden nicht nur für industrielle Zwecke eingesetzt, sondern sie unterstützen den Menschen auch bei immer wiederkehrenden Aufgaben des täglichen Lebens. Beispielsweise dienen sie zur Unterhaltung, dringen in, für den Menschen, gefährliche Gegenden vor oder geben Hilfestellung bei operativen Eingriffen. Um die Entwicklung für solche Roboter schnell voranzutreiben, gibt es eine Reihe von Roboterwettbewerben. Die größten Wettbewerbe in Europa sind die Robotchallenge in Wien und die Eurobot.

Ziel dieser Arbeit ist es, eine Antriebseinheit zu entwickeln, die als solide Basis eines Roboters dienen soll. Die wichtigsten Ansprüche an die Antriebseinheit sind die Dynamik, also eine hohe Endgeschwindigkeit und Beschleunigung, und die Positioniergenauigkeit. Die Antriebseinheit soll nicht für widriges Gelände, sondern für ebene Flächen ausgelegt werden. Hauptziel ist, es mit Hilfe der Antriebseinheit, den Roboter schnellstmöglich und so genau als erforderlichlich von A nach B zu bewegen. Weitere Ziele sind die lange Haltbarkeit und die gute Einbindung in das Gesamtkonzept.

## 1.1 Abgrenzung zum Fächerübergreifenden Projekt „Mark09“

„MARK09“ ist ein mobiles, autonomes Roboterkonzept für die Eurobot 2009 in Frankreich. Ziel der Projektarbeit im 5.Semester des Bachelor Studiengangs Automatisierungstechnik ist es, einen Roboter für den oben genannten Bewerb zu entwickeln. Aus dem Gesamtkonzept „MARK09“ heraus, ergibt sich die Entwicklung einer strapazierfähigen und verlässlichen Antriebseinheit. Das modulare mechanische und elektronische System, sowie die Gegnererkennung werden in anderen Arbeiten teils von mir, teils von anderen Projektmittgliedern eigens behandelt.

## 1.2 Gliederung der Bachelorarbeit

Einführend wird in **Kapitel 1** die Abgrenzung zum Fächerübergreifenden Projekt „Mark09“ und die Gliederung der Diplomarbeit behandelt.

Die durch die Recherche erarbeiteten theoretischen Grundlagen, beginnend mit der Mechanik über die Gleichstrommaschine bis zum Inkrementalgeber, werden in **Kapitel 2** genauer betrachtet.

In **Kapitel 3** wird auf das erarbeitete Konzept, sowie alternative und ältere Konzepte eingegangen.

**Kapitel 4** behandelt die Verwirklichung des Konzepts, zeigt Ergebnisse auf und gibt einen Überblick über das Gesamtkonzept.

Die Bachelorarbeit wird in **Kapitel 5** und **Kapitel 6** zusammengefasst. Ebenfalls beinhalten diese Kapitel ein Fazit und geben einen Ausblick auf weitere Entwicklungen.

Die in **Kapitel 7** aufgelisteten Verzeichnisse dienen zur Anführung der verwendeten Literatur, Abbildungen, Tabellen, Formeln und Abkürzungen.

In **Kapitel 8**, dem Anhang, werden die Datenblätter etwaiger Zukaufteile, sowie technische Zeichnungen angeführt.

## Kapitel 2

# Theoretische Grundlagen

---

*„Eine gute Theorie ist das Praktischste, was es gibt.“*

**Gustav Robert Kirchhoff (1827-87), dt. Physiker**

---

In diesem Kapitel werden die, für die Bachelorarbeit, relevanten theoretischen Grundlagen kurz und prägnant angeführt. Dabei wird in die Teilgebiete „Mechanik“, „Gleichstrommaschine“ und „Inkrementalgeber“ unterteilt. Im Bereich der „Mechanik“ wird auf die mechanische Modellbildung verstärkt eingegangen.

Zu beachten ist, dass die Datenblätter der in diesen Kapitel behandelten Gleichstrommaschine und Inkrementalgeber im **Kapitel 8** angeführt sind.

## 2.1 Mechanik

Anfangs wird die Antriebseinheit mittels eines mechanischen Modells betrachtet.

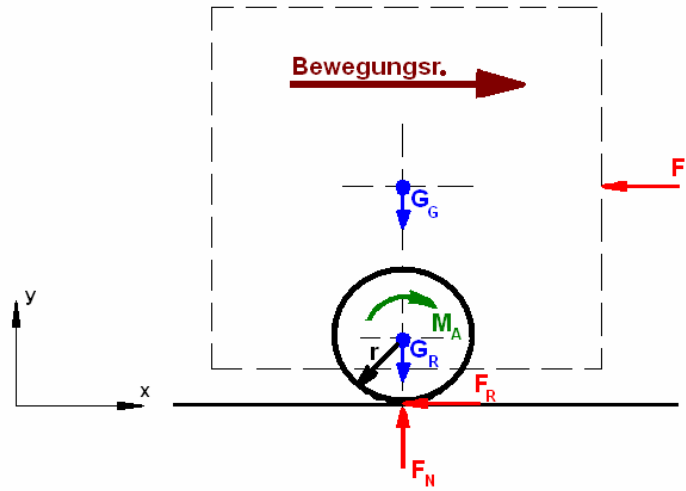


Abbildung 2.1.1: mechanisches Modell Antriebseinheit

Ausgehend vom mechanischen Modell (Abb. 2.1.1) werden die Bewegungsgleichungen aufgestellt. In Glg. 2.1.1 sind die Summe aller Kräfte in Y-Richtung und in Glg. 2.1.2 sind die Summe aller Kräfte in X-Richtung angeführt.

Der halben Gewichtskraft  $G_G$  des Roboters, sowie der Gewichtskraft  $G_R$  des Rades steht die Normalkraft  $F_N$  gegenüber:

$$m_R \cdot \ddot{y} = \sum F(y) = -G_R - \frac{1}{2}G_G + F_N \quad (2.1.1)$$

Die Reibkraft  $F_R$  und die halbe Luftwiderstandskraft  $F_L$  wirken sich negativ auf die Bewegungskraft aus:

$$m_R \cdot \ddot{x} = \sum F(x) = -F_R - \frac{1}{2}F_L \quad (2.1.2)$$

Glg.2.1.3 zeigt den Drallsatz. Das Antriebsmoment  $M_A$  und die Reibkraft  $F_R$  sind jeweils rechtsdrehend und daher mit einem negativen Vorzeichen behaftet.

$$I_R \cdot \ddot{\varphi} = \sum M = -M_A - F_R \cdot r \quad (2.1.3)$$

Die Gewichtskraft  $G_G$  sowie die Luftwiderstandskraft  $F_L$  wurden nur mit der Hälfte angesetzt, da sich die Bewegungsgleichungen jeweils nur auf ein Rad, der zweirädigen Antriebseinheit, bezieht.

Des Weiteren ist zu beachten, dass man von Haftreibung spricht, wenn gilt

$$F_R \leq \mu \cdot F_N \quad (2.1.4)$$

und man von Rollreibung spricht, wenn gilt

$$F_R > \mu \cdot F_N. \quad (2.1.5)$$

(vgl. Tipler, 2004, S. 105 - S. 117)

Aus diesem Ansatz heraus, wird im **Unterkapitel 4.2 (Ergebnisse)** errechnet, welches Moment aufgebracht werden muss, um die Antriebseinheit zu bewegen.

Um die Beschleunigung der Antriebseinheit zu berechnen, wird die Formel 2.1.3 nach  $F_R$  aufgelöst und in Formel 2.1.2 eingesetzt.

$$\ddot{x}(\dot{x}) = \frac{2 \cdot M_A}{r} - F_L}{m_G - 2 \cdot I_R} \quad (2.1.6)$$

Setzt man für das Trägheitsmoment  $I_R = \frac{1}{2} \cdot m_R \cdot r^2$  und für den Luftwiderstand  $F_L = 0.5 \cdot c_W \cdot A \cdot \rho_{Luft} \cdot \dot{x}^2$  in die Formel 2.1.6 ein, erhält man

$$\ddot{x}(\dot{x}) = \frac{\frac{2 \cdot M_A}{r} - 0.5 \cdot c_W \cdot A \cdot \rho_{Luft} \cdot \dot{x}^2}{m_G - m_R \cdot r^2} \quad (2.1.7)$$

Anhand der endgültigen Formel 2.1.7 erkennt man, dass die Beschleunigung  $a = \ddot{x}$  durch den Luftwiderstand  $F_L$  geschwindigkeitsabhängig ist.

Formel 2.1.1 kann vernachlässigt werden, da die Summe aller Kräfte 0 ergibt.

Die Endgeschwindigkeit  $v_{end}$  der Antriebseinheit lässt sich mit der Formel

$$v_{end} = \frac{2 \cdot \prod \cdot r \cdot n_{Motor}}{60 \cdot i_{Getriebe}} \quad (2.1.8)$$

berechnen. (vgl. Tipler, 2004, S. 19 - S. 48)

Weitere Ergebnisse und Aussagen über Beschleunigungs- und Geschwindigkeitsverhalten der Antriebseinheit sind unter dem Unterkapitel 4.2 (**Ergebnisse**) ersichtlich.

## 2.2 Gleichstrommaschine

**Aufbau einer Gleichstrommaschine:** Im Wesentlichen besteht eine Gleichstrommaschine aus dem Ständer, dem Läufer, meist Anker genannt, dem Stromwender (Kollektor oder Kommutator) und den Bürsten.

Im Gegensatz zu herkömmlichen DC-Motoren besteht der Anker bzw. Läufer des bei der Antriebseinheit eingesetzten DC-Kleinstmotor nicht aus einer Stahlwelle mit aufgedrücktem Läuferblechpaket aus Elektroblech, sondern aus einer freitragenden, in Schrägwicklung hergestellten Kupferspule. Durch diese Ausführung besitzt der Motor eine hohe Dynamik bzw. ein geringes Trägheitsmoment.

Der Stromwender besteht aus einzelnen, voneinander mit Glimmer isolierten Lamellen aus Kupfer.

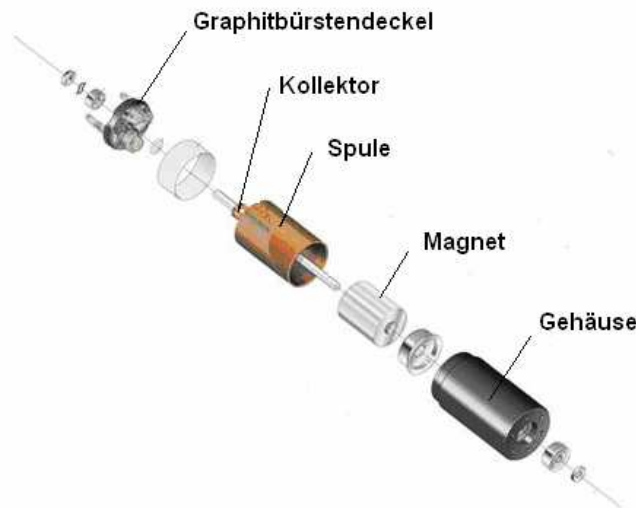


Abbildung 2.2.1: DC-Kleinstmotor mit Graphitkommutierung (vgl. Faulhaber, 2008, S. 27)

Aufgrund der kleinen und kompakten Bauweise sind beim verwendeten DC-Kleinstmotor weder Wendepole noch Kompensationswicklungen vorgesehen, was wiederum zu den negativen Eigenschaften der Ankerrückwirkungen führt:

- die Induktionskurve wird verzerrt → höhere Flussdichte unter einer Polhälfte
- durch die magnetische Sättigung wird das Feld ungleichmäßig verstärkt bzw. geschwächt → kleineres Gesamtfeld als im Leerlauf
- die neutrale Zone wird aus der Mitte der Polllücke um einen Winkel verschoben

**Drehzahl-Drehmoment-Kennlinie:** Ersatzschaltung einer Gleichstrommaschine bei stationären Betriebsverhalten:

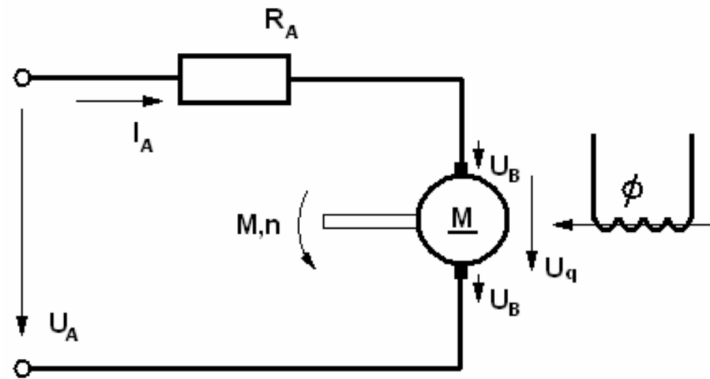


Abbildung 2.2.2: Ersatzschaltung DC-Motor (Blaimschein, 2008, S32)

Aus Abb.2.2.2 ergibt sich die Spannungsgleichung

$$U_A = U_q + I_A \cdot R_A \quad (2.2.1)$$

Der Bürstenspannungsabfall  $U_B$  wird dabei vernachlässigt.

Setzt man für die induzierte Spannung  $U_q = c \cdot \phi \cdot n$  ein und stellt die Formel auf  $n$  um, erhält man

$$n = \frac{U_A}{c \cdot \phi} - \frac{I_A \cdot R_A}{c \cdot \phi} \quad (2.2.2)$$

Bezieht man noch das Motormoment

$$M = \frac{c}{2 \cdot \Pi} \cdot \phi \cdot I_A \quad (2.2.3)$$

mit ein, ergibt sich die endgültige Drehzahl-Drehmoment-Gleichung

$$n = \frac{U_A}{c \cdot \phi} - \frac{2 \cdot \Pi \cdot R_A}{(c \cdot \phi)^2} \cdot M. \quad (2.2.4)$$

Aus dieser Formel ergibt sich für die Leerlaufdrehzahl

$$n_0 = \frac{U_A}{c \cdot \phi} \quad (2.2.5)$$

und für die Drehzahländerung ein

$$n_{\Delta} = \frac{2 \cdot \prod \cdot R_A}{(c \cdot \phi)^2} \cdot M. \quad (2.2.6)$$

**Drehzahländerung:** Um die Drehzahl des Antriebsmotors und dadurch auch die Geschwindigkeit der Antriebseinheit zu ändern, wird die Ankerspannung ( $U_A \leq U_{AN}$ ) verändert.

Alternativen wären:

- die Feldschwächung ( $\phi \leq \phi_N$ )
- ein Ankervorwiderstand ( $R_V$ )

Im Gegensatz zur Feldschwächung bleibt bei Veränderung der Ankerspannung das Drehmoment des Motors konstant. Trotzdem beeinflusst diese Veränderung die Leerlaufdrehzahl und die Steigung der Drehzahl-Drehmoment-Kennlinie. (vgl. Fischer, 2006, S. 32 -S. 81)

## 2.3 Inkrementalgeber

Man unterscheidet 2 Arten von Impulsgebern (Abb. 2.3.1): den Inkremental- und den Absolutwertgeber (Winkelkodierer). Inkrementalgeber werden für Drehzahl- und Drehwinkelerkennung verwendet und Absolutwertgeber für die Ermittlung genauer Positionen. Im Gegensatz zum Inkrementalgeber erkennt der Absolutgeber zu jedem Zeitpunkt an welcher Position er steht, beispielsweise sofort nach dem Einschalten.

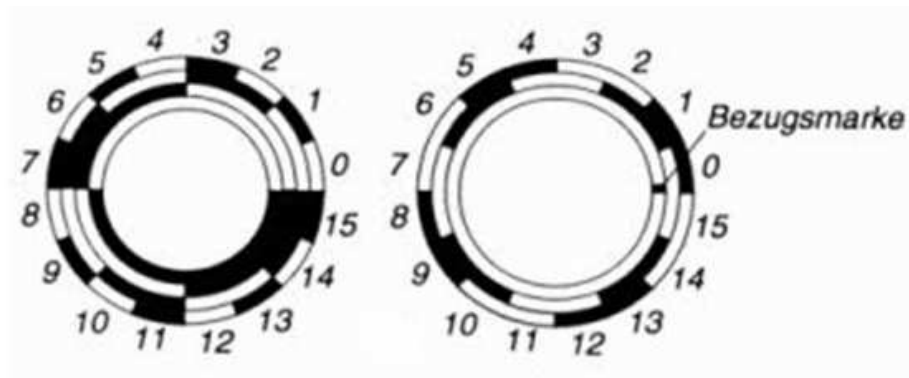


Abbildung 2.3.1: Absolut- und Inkrementalgeber

Für die Erfassung der linearen Bewegung der Antriebseinheit wird ein Inkrementalgeber eingesetzt.

**Aufbau des Inkrementalgebers:** Im Wesentlichen besteht ein Inkrementalgeber aus einer gelagerten Welle und einer daran befestigten Teilscheibe. Des Weiteren befindet sich links von der Teilscheibe eine Lichtquelle, sowie rechts davon mehrere Phototransistoren (Abb. 2.3.2).

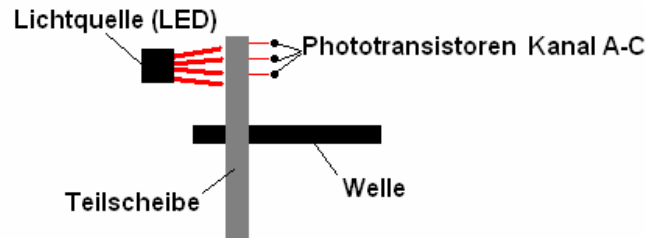


Abbildung 2.3.2: Aufbau Inkrementalgeber

Um die geforderte Positioniergenauigkeit zu erreichen, wird ein optoelektronischer Geber mit einer Auflösung von 1000 Pulsen pro Umdrehung (Teilscheibe mit 1000 Schlitzen) verwendet.

**Funktionsprinzip optoelektronischer Geber:** Je nach Auflösung ist die Teilscheibe des Gebers in eine bestimmte Anzahl von Schlitzen aufgeteilt. Die Teilscheibe wird an einem, von einer Lichtquelle (LED) beleuchteten, Strichgitter vorbeigeführt. Der Phototransistor gegenüber bzw. hinter der Teilscheibe erfasst die Lichtimpulse und wandelt sie in ein Rechtecksignal um.

Durch die Auswertung des „High-Signals“ der Rechteckspannung, werden die Inkremente addiert oder subtrahiert. Wertet man noch zusätzlich das „Low-Signal“ bzw. die steigende und die fallende Flanke aus, kann man die Auswerteauflösung vervierfachen. Um die Drehrichtung zu ermitteln, wird nicht nur ein Signal, sondern zusätzlich auch noch ein zweites um  $90^\circ$  faserverschobenes Signal ausgewertet (Kanal A und Kanal B). Der Referenzimpuls des dritten Signals (Kanals C) markiert bei jeder Umdrehung eine absolute Position. Die Teilscheibe eines Inkrementalgebers ist im rechten Teil der Abb. 2.3.1 ersichtlich.

## Kapitel 3

# Konzept „Antriebseinheit“

---

*„Man muss nicht nur mehr Ideen haben als andere, sondern auch die Fähigkeit besitzen, zu entscheiden, welche dieser Ideen gut sind.“*

**Linus Carl Pauling (1901-94), amerik. Chemiker**

---

Wie in der Einleitung erwähnt, ist es das Ziel dieser Arbeit eine Antriebseinheit zu entwickeln, die sich durch hohe Dynamik, Positioniergenauigkeit und Zuverlässigkeit auszeichnet. Um trotz der hohen Dynamik die Positioniergenauigkeit sicherzustellen, ist es erforderlich den Antriebstrang von der Messeinheit zu trennen, um Problemkriterien wie Schlupf und Getriebefehler zu kompensieren bzw. auszuschließen.

Es wurde versucht die Vorteile alternativer und früherer Konzepte in das neue Konzept der Antriebseinheit mit einfließen zu lassen und somit diesen und anderen Anforderungen gerecht zu werden. Die folgenden Seiten gehen auf diese Konzepte, sowie auf das Konzept der neuen Antriebseinheit konkret ein.

### 3.1 Konzept „Neu“

Die Gründe für die Neukonstruktion der Antriebseinheit waren einerseits mangelnde Positioniergenauigkeit, sowie zu geringe Stabilität und andererseits war es bei den früheren Lösungen nicht möglich sie ein wiederholtes Male einzusetzen. Besonders der Aspekt der Wiederverwendbarkeit war eines der Hauptkriterien bei der Konzeptionierung der Antriebseinheit. In Abb. 3.1.1 ist das Konzeptbild der Antriebseinheit abgebildet.

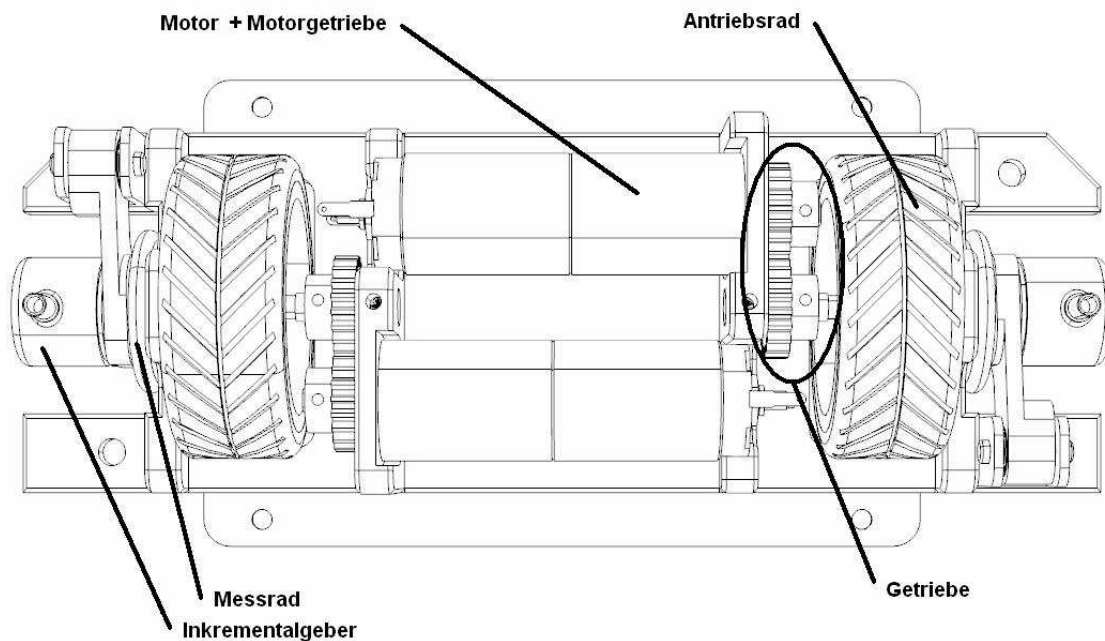


Abbildung 3.1.1: Konzeptbild „Antriebseinheit“

Um die höchstmögliche Dynamik zu gewährleisten, ist es unumgänglich die Motoren stark genug zu dimensionieren, den Radstand größtmöglich zu wählen, sowie für die Bereifung des Antriebsrades die bestmöglichen Reibwerte auszuwählen. (Ergebnisse siehe dazu Kapitel 4.1 **Verwirklichung**).

Neben diesen Anforderungen ist es notwendig die Einheit sehr kompakt zu gestalten und dafür zu sorgen, dass keine unerwünschten Kräfte auf den Motor bzw. Inkrementgeber wirken. Um zu verhindern, dass Radial- bzw. Axialkräfte auf den Motor übertragen werden, wird zwischen Motor und Antriebsrad ein zusätzliches Getriebe eingeplant. Durch die gefederte Lagerung des Inkrementgebers wird ebenfalls die überdurchschnittliche Belastung durch Radialkräfte verhindert. Des weiteren bewirkt diese Lagerung, dass das Geberrad auch bei Unebenheiten immer am Untergrund aufliegt und Messfehler dadurch kompensiert bzw. ausgeschlossen werden können. Um bei Drehbewegungen des Roboters den größtmöglichen Messradius zu erzielen, wurden die Messräder so weit als möglich aussen angeführt.

Die vorher angesprochene Kompaktheit wird einerseits durch die parallele Ausführung der Motoren und andererseits durch die kleinen Abstände zwischen Getriebe, Antriebsrad und Inkrementgeber erreicht. Um das Gewicht der Einheit gering zu halten, sind die mechanischen Teile, bis auf Antriebswelle, aus einem Material mit geringer Dichte, beispielsweise Aluminium oder Magnesium zu fertigen.

### 3.2 Alternative Konzepte

Neben der Differenzialantriebseinheit gibt es noch eine Reihe weiterer Lösungen. Eine dieser Lösungen wird in diesem Kapitel näher erläutert.

**Omnidirektionaler Antrieb:** Mit einem omnidirektionalen Antrieb ist es im Gegensatz zur Differenzialantriebseinheit jederzeit möglich in eine beliebige Richtung zu navigieren. Bei Fußballrobotern, die sich durch eine sehr hohe Wendigkeit auszeichnen, wird diese Art von Antrieb vermehrt eingesetzt.

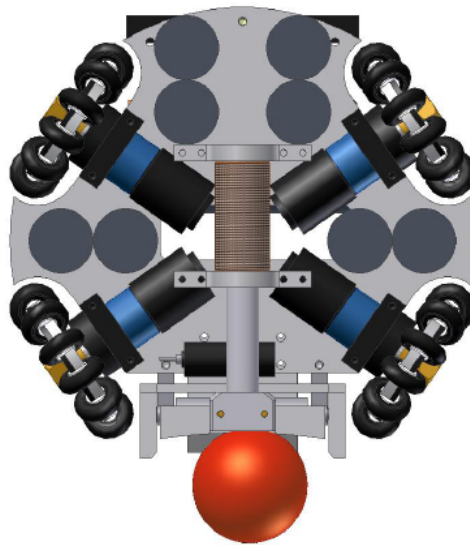


Abbildung 3.2.1: Omnidirektionaler Antrieb (Rojas, n.d., S. 2)

Die Basis eines omnidirektionalen Antriebs sind in den meisten Fällen drei oder vier sogenannte Omniwheels (Abb.3.2.1). Ein Omniwheel besteht aus dem Hauptrad und aus den, auf der Umlauffläche befestigten, meist tonnenförmigen Hilfsrädern.

Wie in Abb. 3.2.2 ersichtlich, sind die Hilfsräder im rechten Winkel zur Drehachse des Hauptrades angeordnet. Je nach Bewegungsrichtung des Roboters drehen sich die Hilfsräder und vermindern dadurch die Reibung bei Querfahrten. Des Weiteren ist es möglich, dass sie blockieren und dann bei Längsfahrten als Antriebsflächen dienen.



Abbildung 3.2.2: Omniwheel (vgl. robotikhardware.de, 2009)

Die Nachteile dieses Systems liegen in dem eher unruhigen Lauf, in der Implementierung des Antriebes und in der Schwierigkeit die Position des Roboters in jeder Lage genau festzustellen. Außerdem nimmt die komplexe Mechanik des Antriebes viel Raum ein, was bei kleinen Robotern sehr schnell zu Platzproblemen führen kann.

Trotz alledem wäre die Wendigkeit des Roboters ein großer Vorteil, der sich besonders bei Handlingsarbeiten oder in engen Arealen bemerkbar machen würde. Findet man für die Weg- bzw. Positionsmessung eine präzise funktionierende Lösung, wäre dieses System eine gute Alternative zur Differenzialantriebseinheit.

### 3.3 Frühere Konzepte

Neben den alternativen Konzepten werden auch die früheren Konzepte zur Neukonzeptionierung der angestrebten Lösung herangezogen. Hauptaugenmerk wird auf die Ergebnisse und Erkenntnisse aus früheren Bewerben bzw. Testphasen gelegt. Resultierend aus diesen Erfahrungen kommt man zum Entschluß, dass es wohl unumgänglich ist, die Antriebseinheit vom Messstrang zu trennen.

Denn die Lösung in der die Wegmessung über den Antriebsmotor erfolgt, führt zu Messfehlern. Diese Fehler, die durch Schlupf und Getriebespiel auftreten werden, können auf diese Weise nicht kompensiert werden. Folgen dieser Messfehler sind Schwierigkeiten bei der Positionierung, sowie völlige Ausfälle des gesamten Messsystems bei Gegner Kollisionen.

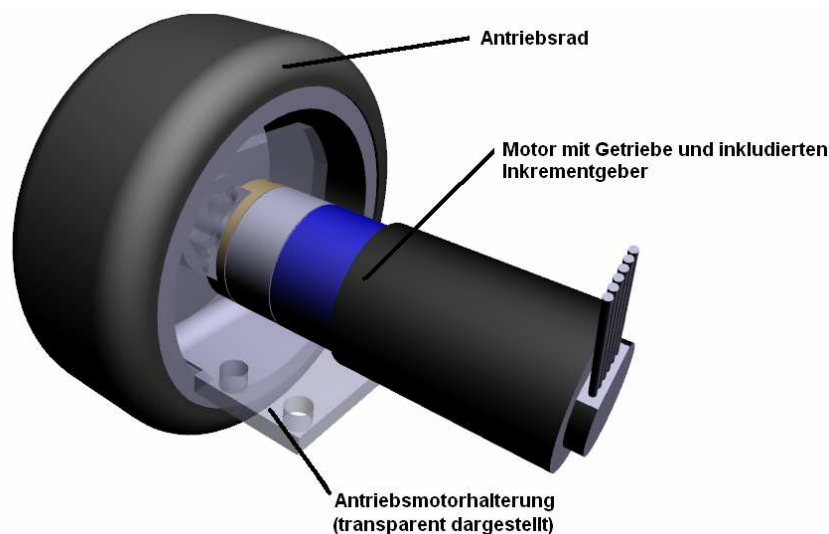


Abbildung 3.3.1: Antriebsmotor, MARK2008

Abb. 3.3.1 zeigt den Antriebsstrang, des letztjährigen Roboters MARK2008. Da der Motor bei dieser Ausführung nicht gesondert gelagert ist, entsteht ebenfalls eine zusätzliche Belastung auf den Motor bzw. auf das Getriebe, was wiederum zu frühzeitigen Ausfällen des Motors führt.

Die Vorteile liegen in der Einfachheit des Konzeptes und in der geringen Anzahl an benötigten Sonderbauteilen.

## Kapitel 4

# Verwirklichung, Ergebnisse und Gesamtkonzept „Mark09“

---

*„Es ist schwer zu sagen, was unmöglich ist, denn der Traum von gestern ist die  
Hoffnung von heute und die Wirklichkeit von morgen.“*

**Robert Goddard (1882-1945), amerik. Physiker**

---

Der Inhalt dieses Kapitels umfasst die Verwirklichung der Differenzialantriebseinheit, mit Testaufbau und endgültiger Version. Des Weiteren gibt dieses Kapitel einen Überblick über das Gesamtkonzept „Mark09“, sowie alternative Einsatzmöglichkeiten der Differenzialantriebseinheit im Bereich der mobilen Roboterprototypen und zeigt Ergebnisse der Antriebseinheit, bezogen auf die Mechanik, auf.

## 4.1 Verwirklichung

Nach der Fertigung der mechanischen Einzelkomponenten, Bestückung der Elektronik und Einkauf der Zukaufteile begann der Zusammenbau der Antriebseinheit. Die mechanischen Teile, ausgenommen der Führungen, Zahnräder und Achsen, wurden aus Aluminium gefertigt, um, wie schon im Unterkapitel 3.1 (**Konzept-Neu**) erwähnt, das Gewicht der Einheit gering zu halten. Die Aluminiumbauteile wurden sandgestrahlt. Für die Federnführungen und die Antriebsachsen wählte man den gut zerspanbaren, hochfesten und nichtrostenden Stahl X20Cr13 bzw. 1.4021.

Für die Messräder und die Halterungen der Platinen verwendete man als Werkstoff einen weißen Polyoxymethylen- Kunststoff, der ebenfalls eine hohe Festigkeit und gute Zerspanbarkeit aufweist. Bei den Antriebsrädern entschied man sich für Kunststoffräder aus dem Modellbaubereich. Die Räder bestehen aus einer Kunststofffelge und einem Reifen aus weichem Kunststoff mit sehr hohen Reibwerten. Durch diese Materialwahl ist die Einhaltung der Anforderungen, sowie die Langlebigkeit der Antriebseinheit sichergestellt.

Die 3-D Zeichnungsableitungen der mechanischen Sonderbauteile sind im Kapitel 7 (**Anhang**) angeführt. Ebenfalls ist es anzumerken, dass die Erläuterung der Programmierung bzw. der Elektronik in der Bakk-Arbeit eines Projektpartners ersichtlich ist.

### 4.1.1 Testaufbau

In Abb. 4.1.1 ist der Testaufbau der Differenzialantriebseinheit ersichtlich. Die Gleichstrommaschinen der Firma Faulhaber mit der Bezeichnung 2642W012CR, die in Abb. 4.1.1 ersichtlich sind, können für die Antriebseinheit nicht verwendet werden, da der konzeptionierte Motor zu stark für diese Verwendung ist.

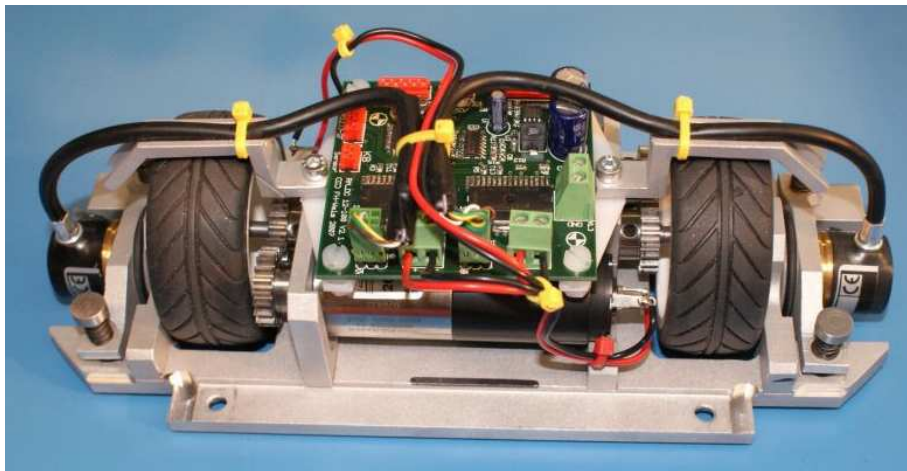


Abbildung 4.1.1: Testaufbau Differenzialantriebseinheit

Aus diesen Gründen entschied man sich für eine Umkonzeptionierung der Antriebseinheit und wählte statt der Motoren 2642W012CR, die etwas leistungsschwächeren Motoren 2232U012SR der ähnlichen Baureihe der Firma Faulhaber.

### 4.1.2 Endgültige Version

Wie bereits im Unterkapitel 4.1.1 (**Testaufbau**) erläutert, wurde der Motorentyp vom Testaufbau zur endgültigen Version verändert. Dies hatte zur Folge, dass der Lagerbock und das Zahn-

radgetriebe auf die neuen, etwas kleineren Motoren angepasst werden mussten. Zu beachten ist, dass unter Kapitel 7 (**Anhang**) die abgeänderten Bauteile, der Lagerbock und die Antriebswelle mit V1 für Version 1 und mit V2 für Version 2 in den 3-D Zeichnungsableitungen gekennzeichnet sind. Des weiteren wechselte man bei den Zahnrädern den Motordaten entsprechend, von Modul 1 auf Modul 0,5.

Die endgültige Version der Antriebseinheit ist in Abb. 4.1.2 abgebildet.

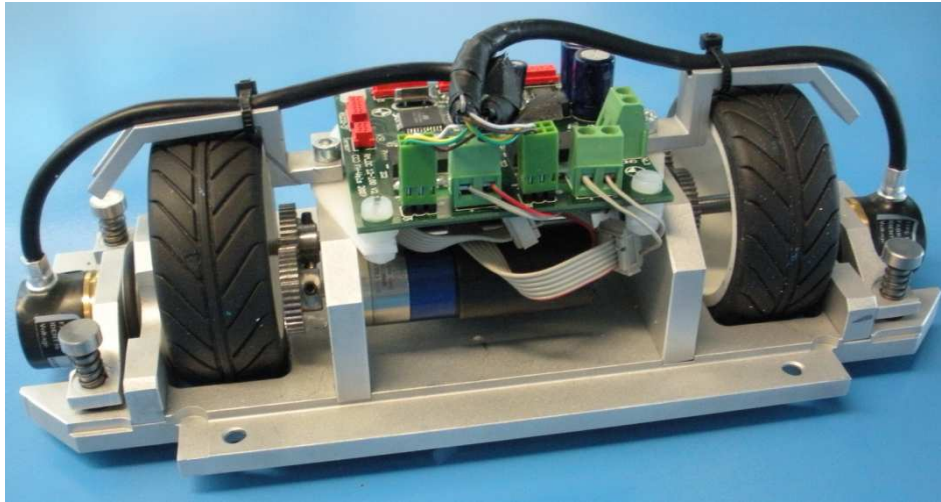


Abbildung 4.1.2: Differenzialantriebseinheit

Die Grundplatte der Antriebseinheit ist so ausgeführt, dass sie einen sauberen Abschluß der Bodenplatte eines Roboters bildet und durch einen Anbringung von Schrägen an zwei Kanten der Platte nicht falsch in den Roboter eingesetzt werden kann (Abb.4.1.3). Ebenfalls kann durch lösen von drei Kabelsteckverbindungen und vier Schrauben die Einheit aus dem Roboter aus- bzw. eingebaut werden.



Abbildung 4.1.3: Grundplatte der Differenzialantriebseinheit

Der Inkrementalgeber bzw. die Inkrementalgeberraufhängung wurde von der Konzeptionierung über die Testversion zur endgültigen Version nicht abgeändert, da die Wegmessung bereits bei der Testversion präzise funktionierte (Abb.4.1.4).

Der Vollständigkeit halber ist noch anzumerken, dass der optoelektronische Inkrementgeber D24-1000-N-04-09-64-01-S der Firma Elra verwendet wird. Das Datenblatt des Inkrementgebers und

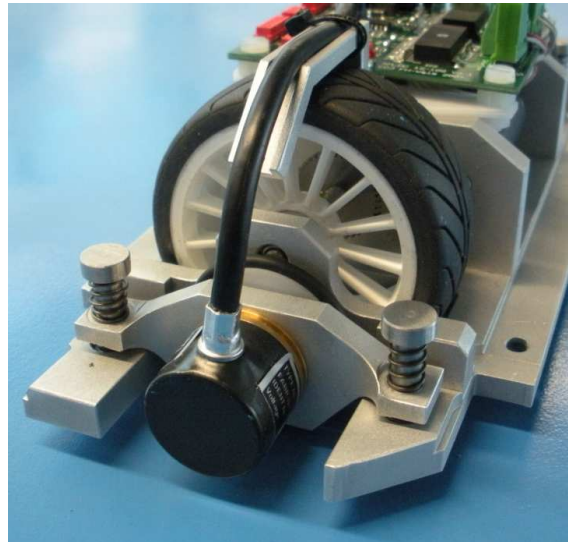


Abbildung 4.1.4: Inkrementgeber mit Inkrementgeraufhängung

des konzeptionierten Motors bzw. des verwendeten Motors, weitere Datenblätter zu den Zukaufteilen, und die für die Fertigung der mechanischen Bauteile benötigten Konstruktionszeichnungen sind unter Kapitel 7 (**Anhang**) angeführt.

## 4.2 Ergebnisse

Wie schon bereits in Kapitel 2 (**Theoretische-Grundlagen**) erwähnt, wird in diesem Unterkapitel auf das Beschleunigungs- und Geschwindigkeitsverhalten der Antriebseinheit, sowie auf weitere Ergebnisse eingegangen.

**Beschleunigungs- und Geschwindigkeitsverhalten:** Aus Formel 2.1.7 lässt sich die Beschleunigung, abhängig von der Geschwindigkeit, berechnen. Um eine gute Übersicht zu gewährleisten wird die Formel 2.1.7 hier noch einmal angeführt:

$$\ddot{x}(\dot{x}) = \frac{\frac{2 \cdot M_A}{r} - 0.5 \cdot c_W \cdot A \cdot \rho_{Luft} \cdot \dot{x}^2}{m_G - m_R \cdot r^2} \quad (4.2.1)$$

Um die Beschleunigung zu berechnen werden die Zahlenwerte in die Formel 4.2.1 eingesetzt. Das Motormoment  $M_A$  ist dem Datenblatt des Motors zu entnehmen, der Radius  $r$ , sowie die Masse  $m_R$  des Antriebsrads ist in den Konstruktionszeichnungen angeführt. Die vertikale Querschnittsfläche des Roboters  $A$  und die gesamte Gewichtskraft  $m_G$  des Roboters beruht auf einer Annahme für die spätere Ausführung des Roboters. Der Luftwiderstandsbeiwert der  $c_W$ -Wert wird sehr hoch angenommen, da wegen der niedrigen Geschwindigkeiten die aerodynamische Ausführung des Roboters vernachlässigt wird. Für die Luftdichte  $\rho_{Luft}$  wird der Wert bei üblichen  $20^\circ\text{C}$  herangezogen. Die Geschwindigkeit  $\dot{x} = v$  berechnet sich aus der Formel 2.1.8. Wiederum wird die Formel 2.1.8 an dieser Stelle noch einmal angeführt:

$$v_{end} = \frac{2 \cdot \prod \cdot r \cdot n_{Motor,end}}{60 \cdot i_{Getriebe}} M \quad (4.2.2)$$

Die Zahlenwerte werden ebenfalls in dieser Formel eingesetzt um die Endgeschwindigkeit  $v_{end}$  zu berechnen. Die Motordrehzahl  $n_{Motor,end}$ , sowie das Motormoment  $M_A$  ist dem Datenblatt des Motors zu entnehmen. Das Übersetzungsverhältnis  $i_{Getriebe}$  ist dem Datenblatt des Getriebes zu entnehmen.

Tab. 4.2.1 beinhaltet alle oben erwähnten Werte.

Bezeichnung	Kurzbezeichnung	Einheit	Wert
<i>Motormoment</i>	$M_A$	$Nm$	0,132
<i>Radius des Antriebsrads</i>	$r$	$m$	0,034
<i>Masse des Antriebsrads</i>	$m_R$	$kg$	0,03
<i>Masse des Roboters</i>	$m_G$	$kg$	6
<i>vertikale Querschnittsfläche des Roboters</i>	$A$	$m^2$	0,109
<i>Luftwiderstandsbeiwert</i>	$c_W$	–	0,9
<i>Luftdichte bei <math>20^\circ\text{C}</math></i>	$\rho_{Luft}$	$kg/m^3$	1,204
<i>Geschwindigkeit</i>	$\dot{x}$	$m/s$	0,2- $v_{end}$
<i>Endgeschwindigkeit</i>	$v_{end}$	$m/s$	1,53
<i>Endmotordrehzahl</i>	$n_{Motor,end}$	$U/min$	6000
<i>Übersetzungsverhältnis</i>	$i_{Getriebe}$	–	14

Tabelle 4.2.1: Zahlenwerte für die Beschleunigungsberechnung

Setzt man die Geschwindigkeit  $\dot{x}$  in die Formel 4.2.1 von 0,2 bis  $v_{end}$  in 0,2er Schritten ein, erhält

man die geschwindigkeitsabhängige Beschleunigung. Diese Beschleunigung ist in Tab. 4.2.2 und in Abb. 4.2.1 ersichtlich.

Kurzbezeichnung	Einheit								
$\dot{x}$ bzw. $v$	$m/s$	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	1,2	1,4	1,53
$\ddot{x}$ bzw. $a$	$m/s^2$	1,294	1,293	1,291	1,288	1,284	1,280	1,275	1,270

Tabelle 4.2.2: Geschwindikeitsabhängige Beschleunigung

Wie in Tab. 4.2.2 ersichtlich, wirkt sich die Geschwindigkeit nur wenig auf die Beschleunigung aus. Das liegt daran, dass der Luftwiderstand bei niedrigen Geschwindigkeiten nur gering einwirkt. Der quadratische Abfall der Beschleunigung ist aber trotzdem in der stark vergrößerten Abb.4.2.1 ersichtlich.

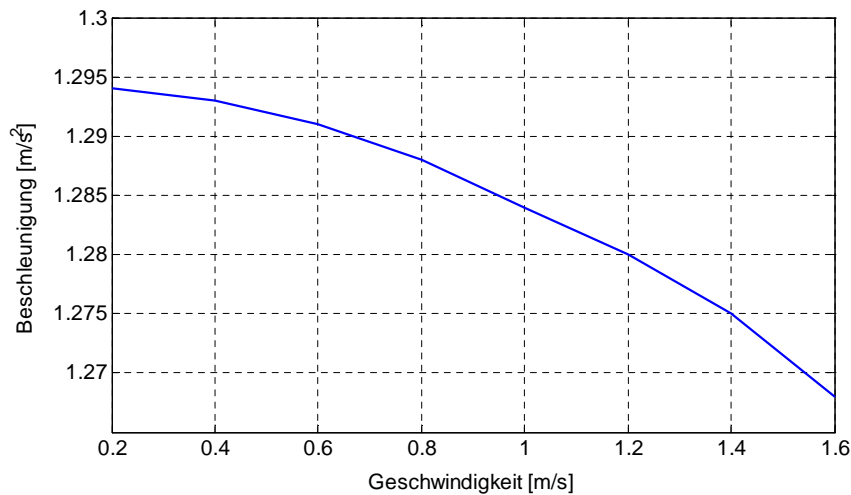


Abbildung 4.2.1: Quadratischer Abfall der Beschleunigung

Das Ergebnis der Geschwindigkeits- und Beschleunigungsberechnung zeigt, dass das Erreichen der Höchstgeschwindigkeit in kurzer Zeit möglich ist.

Abschließend zu diesem Unterkapitel ist noch anzumerken, dass alle oben erwähnten Datenblätter und Konstruktionszeichnungen im Kapitel 7 (**Anhang**) zu finden sind.

### 4.3 Gesamtkonzept „MARK09“

In erster Linie wurde die Differenzialtriebseinheit für die Eurobot bzw. für den Roboter „MARK09“ entwickelt. Neben diesem Ziel wurde wie schon vorher erwähnt, besonders auf die Wiederverwendbarkeit der Einheit geachtet, sowie auf die Verwendbarkeit für alternative Roboterprototypen.

In diesem Teil der Arbeit wird das modulare mechanische System des Roboters „MARK09“ und alternative Einsatzmöglichkeiten angeführt.

#### 4.3.1 Modulares mechanisches System

Wie bereits im Unterkapitel 1.1 (**Abgrenzung zum Fächerübergreifenden Projekt „Mark09“**) dargestellt, beruht das mobile, autonome Roboterkonzept für die Eurobot 2009 einerseits auf einem modularen elektronischen System und andererseits, wie hier erläutert, auf einem modularen mechanischen System.

Grund dieser modularen Bauweise sind die jährlich wechselnden Wettbewerbsbedingungen. Um

In Abb. 4.3.1 ist ein Auszug aus den teils verwirklichten, teils geplanten bzw. konzeptionierten Komponenten des modularen Systems abgebildet.

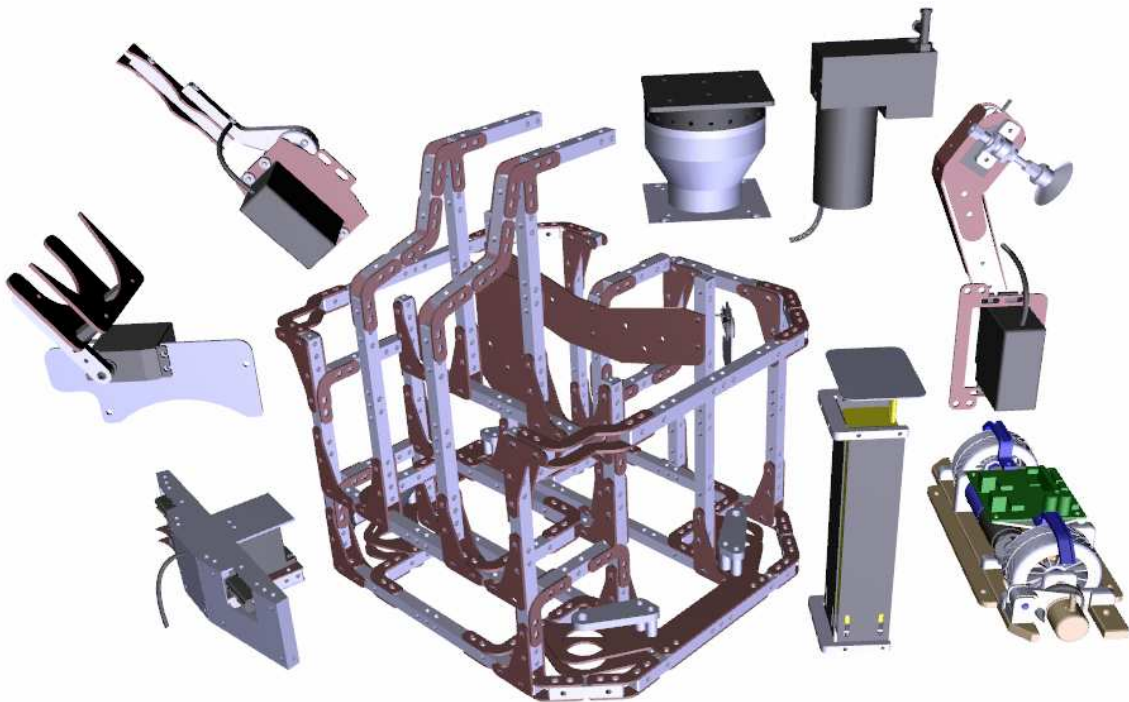


Abbildung 4.3.1: Auszug aus den mechanischen Modulen

Den Wettbewerbsumständen entsprechend, ist es nicht gewährleistet, alle Komponenten des Systems jedes Jahr wiederzuverwenden. In Zukunft sollte es aber möglich sein, eine Vielzahl von Komponenten zu entwickeln, die dann in Zwei- oder Dreijahresrhythmen verwendet werden können.

### 4.3.2 Alternative Einsatzmöglichkeiten

Neben dem mobilen Roboterkonzept für die Eurobot gibt es eine Reihe von Einsatzmöglichkeiten für die Differenzialantriebseinheit. Wiederum werden zwei Einsatzmöglichkeiten in diesem Kapitel angeführt.

**Antriebseinheit für Standard Sumo:** „Je zwei Roboter treten gegeneinander an und versuchen den jeweils anderen von einer runden Platte zu schieben. (...) Das Spielfeld besteht aus einer Scheibe. Die inner Fläche ist schwarz lackiert und von einem weißen Rand umgeben. In der Mitte der Platte befinden sich zwei parallele braune Startlinien.“ (Österreichische Gesellschaft für innovative Computerwissenschaften, 2008) (Abb.4.3.2)

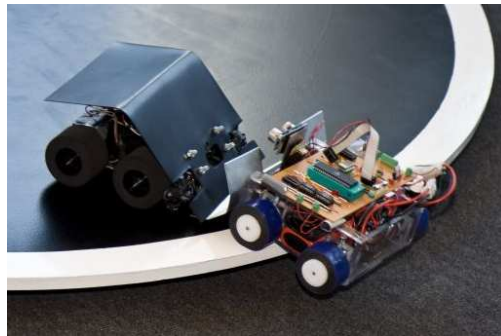


Abbildung 4.3.2: Standard Sumo Wettkampf

Abb.4.3.3 zeigt das Konzeptimage eines Standard Sumos mit Differenzialantriebseinheit. Die Eigenschaften wie hohe Beschleunigung, hohe Endgeschwindigkeit, sowie das hohe Drehmoment der Antriebseinheit wären für den Standard Sumo Bewerb eine sehr gute Basis.

Genauso wie bei der Eurobot könnte man die Antriebseinheit für mehrere Standard Sumo Roboter verwenden und würde nebenbei wiederum die Entwicklungskosten und Entwicklungszeiten gering halten. Die inkludierten Inkrementgeber könnten besonders bei Gegnerkollisionen von Vorteil sein, da es für die Wegmessung nicht von Bedeutung wäre, ob die Räder blockieren oder nicht.

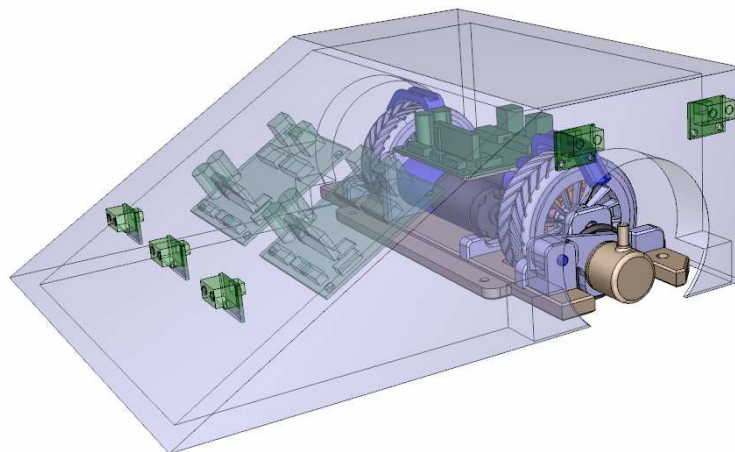


Abbildung 4.3.3: Konzeptbild Standard Sumo

**Antriebseinheit für ein „Fahrerloses Transportsystem“:** Die Ansprüche an fahrerlose Transportsysteme (Abb.4.3.4 )sind sehr präzise Positionierung, Zuverlässigkeit und Wendigkeit. Die Differenzialantriebseinheit erfüllt diese Anforderungen.

Lediglich die Übersetzung der Motoren müßte verändert werden, da bei FTS die Geschwindigkeit niedriger, als bei den in den vorhergehenden Kapiteln erwähnten Wettkämpfen, ist. Diese Applikation ist sehr einfach durchzuführen.



Abbildung 4.3.4: FTS-“Fahrerloses Transportsystem“ (Zopf, 2008, S. 59)

Anzumerken ist aber, dass die Antriebseinheit nur für kleine Zuladungen bis 10kg geeignet wäre. Einsatzbereiche solcher Kleinbau FTS wären im Montagebereich kleiner qualitativ hochwertiger Geräte, wie beispielsweise Ferngläser, Kameras, oder Mobiltelefone.

Die FTS könnten zwischen den einzelnen Montagestationen über Reinraumkanäle verkehren und durch ihre Flexibilität auf die wechselnden Anforderungen schnell reagieren. Weitere Vorteile solcher Kleinbau FTS wären der vollautomatische Ablauf, sowie die schrittweise Automatisierung.

## Kapitel 5

# Fazit und Dank

Im Rahmen dieser Arbeit wurde eine Antriebseinheit entwickelt, die sich durch hohe Dynamik, Positioniergenauigkeit und durch ihre stabile Ausführung auszeichnet. Das Erreichen dieser Punkte gewährleistet gleichzeitig den erfolgreichen Abschluss dieser Arbeit.

Abschließend bedanke ich mich bei Herrn Dipl. Ing. Walter Rokitansky für die gute Betreuung meiner Arbeit. Dank gilt auch meiner Freundin Christina Egger für das Korrekturlesen.

## Kapitel 6

# Verzeichnisse

# Abbildungsverzeichnis

2.1.1 mechanisches Modell Antriebseinheit . . . . .	4
2.2.1 DC-Kleinstmotor mit Graphitkommutierung (vgl. Faulhaber, 2008, S. 27) . . . . .	6
2.2.2 Ersatzschaltung DC-Motor (Blaimschein, 2008, S32) . . . . .	7
2.3.1 Absolut- und Inkrementalgeber . . . . .	8
2.3.2 Aufbau Inkrementalgeber . . . . .	9
3.1.1 Konzeptbild „Antriebseinheit“ . . . . .	11
3.2.1 Omnidirektionaler Antrieb (Rojas, n.d., S. 2) . . . . .	12
3.2.2 Omniwheel (vgl. robotikhardware.de, 2009) . . . . .	12
3.3.1 Antriebsmotor, MARK2008 . . . . .	13
4.1.1 Testaufbau Differenzialantriebseinheit . . . . .	15
4.1.2 Differenzialantriebseinheit . . . . .	16
4.1.3 Grundplatte der Differenzialantriebseinheit . . . . .	16
4.1.4 Inkrementgeber mit Inkrementgeraufhängung . . . . .	17
4.2.1 Quadratischer Abfall der Beschleunigung . . . . .	19
4.3.1 Auszug aus den mechanischen Modulen . . . . .	20
4.3.2 Standard Sumo Wettkampf . . . . .	21
4.3.3 Konzeptbild Standard Sumo . . . . .	21
4.3.4 FTS-“Fahrerloses Transportsystem“(Zopf, 2008, S. 59) . . . . .	22

# Tabellenverzeichnis

4.2.1 Zahlenwerte für die Beschleunigungsberechnung . . . . .	18
4.2.2 Geschwindikeitsabhängige Beschleunigung . . . . .	19

# Literaturverzeichnis

- [1] Fischer, Rolf (2006): Elektrische Maschinen, Carl Hanser Verlag München, Wien, S. 32 -S. 81
- [2] Blaimschein, Peter (2008): Elektrische Antriebssysteme - 2. Gleichstrommaschine, S. 32
- [3] Tipler, Paul A./Mosca, Gene (2004): Physik - Für Wissenschaftler und Ingenieure, Spektrum Akademischer Verlag, München, S. 19 - S. 48, S. 105 - S. 117
- [4] Faulhaber (2008): Antriebssysteme, Minimotor SA, Schweiz, S. 27
- [5] Rojas, Raul (n.d.): Omnidirectional Control, <http://ftp.itam.mx/pub/alfredo/ROBOCUP/SSLDocs/PapersTDPs/omnidrive.pdf> , S. 2 (dl 2009-01-29)
- [6] robotikhardware.de, 2009: OmniWheels, <http://www.roboternetz.de/wissen/index.php/OmniWheels> (dl 2009-01-29)
- [7] Österreichische Gesellschaft für innovative Computerwissenschaften (2008): Robot Sumo, <http://www.robotchallenge.at/reglement/mini-sumo> (dl 2009-01-23)
- [8] Zopf, Peter (2008): Planung von Montage- und Fertigungsanlagen, S. 59

**Kapitel 7**

**Anhang**