

# Hochschule München

## Projektarbeit Wackelroboter

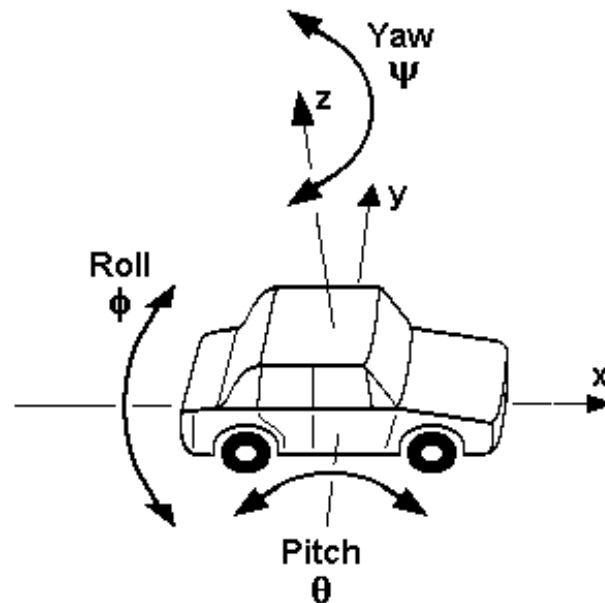


Betreuer	Prof. Dr. Norbert Nitzsche
Verfasser	Valentyn Chepil, Stephan Morongowski, Severin Schendel, Aleksandar Stoiljkovic, Timo Veit
Fachbereich	Maschinenbau - MBB
Abgabetermin	28.2.2018

# Inhaltsverzeichnis

# Abbildungsverzeichnis

# 1 Definition eines roboterfesten Koordinatensystems



**Abbildung 1:** Roboterkoordinatensystem  
(Quelle: [roboterKS\_Bild])

Zur einheitlichen Bezeichnung wurde das roboterfeste Koordinatensystem (im Folgenden mit KS bezeichnet) wie in Abbildung ?? zu sehen, ähnlich ISO 88551 festgelegt. Entgegen der häufig anzutreffenden Bezeichnungen der Winkel um die jeweiligen Koordinatenachsen werden im Folgenden die Winkel um

- die x-Achse mit  $\alpha$
- die y-Achse mit  $\beta$
- die z-Achse mit  $\gamma$

bezeichnet.

Der Ursprung des KS liegt auf der Radachse mittig zwischen den beiden Rädern. Das KS ist ein rechtshändiges KS.

Die Verdrehung der jeweiligen Räder wird mit  $\varphi_l$  bzw.  $\varphi_r$  bezeichnet. Dabei bezeichnet  $l$  das in positive x-Richtung blickend links liegende Rad und  $r$  das in positive x-Richtung blickend rechts liegende Rad.

## 2 Umsetzung eines Direktantriebes

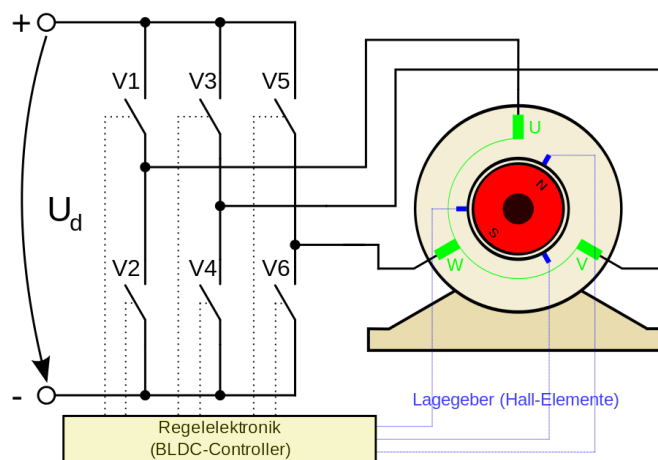
### 2.1 Vergleich der Antriebsarten

#### 2.1.1 Bürstenloser Gleichstrommotor

„Bürstenlose Gleichstrommotoren, kurz BLDC („Brushless DC-Motoren), sind - entgegen ihrer Bezeichnung - Drehstrom-Synchronmaschinen: Der Läufer folgt einem magnetischen Drehfeld, die Bewegung ist synchron zur Wechselspannung, die an die Wicklungen angelegt wird. Dieser Motortyp wird häufig als „Bürstenloser Gleichstrommotor“ bezeichnet, da er in vielen Applikationen bürstenbehaftete Gleichstrommotoren („brushed DC“, Kommutatormotoren) ersetzt. Bei einem bürstenbehafteten Gleichstrommotor wird eine Gleichspannung angelegt, die durch einen mechanischen Wechselrichter im Motor - die Bürsten - einen drehzahlunabhängigen Wechselstrom erzeugt.

Zusammen mit einer elektronischen Ansteuerung, die die Funktion der Bürsten übernimmt und aus den eingespeisten Gleichstrom in Wechselstrom umwandelt, entspricht der BLDC-Motor im Verhalten einem bürstenbehafteten Gleichstrommotor ohne die in der Lebensdauer begrenzten Bürsten. BLDC-Motoren werden deshalb auch als EC („electronically commutated“)-Motoren bezeichnet, um sie von mechanisch kommutierten bürstenbehafteten Motoren abzugrenzen.“

(Quelle: [BLDCNanotec])



**Abbildung 2:** BLDC Prinzipschaltung, V1-V6 MOSFETS

(Quelle: [PrinzipBLDC])

## 2.1.2 Schrittmotoren

### 2.1.2.1 Allgemeines

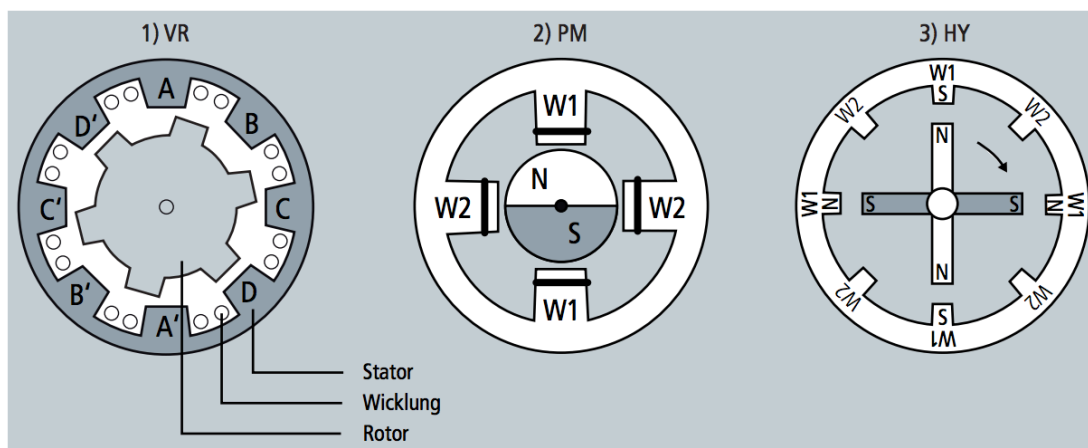
Schrittmotoren sind eine spezielle Bauform der Synchronmaschine, bei denen der Rotor als Permanentmagnet ausgeführt ist, während der Stator aus einem Spulenpaket besteht. Im Unterschied zum Synchronmotor hat der Schrittmotor eine große Zahl an Polpaaren. Die Drehung des Rotors kommt dadurch zustande, dass das elektromagnetische Feld der Stators Sprungweise geschaltet wird und sich um einen Schrittwinkel bewegt.

Zum Betrieb des Motors wird eine spezielle Ansteuereinheit(Treiber) benötigt.

### 2.1.2.2 Arten des Schrittmotors

Es gibt drei Grundtypen des Schrittmotors.

- Reluktanzschrittmotor (VR)
- Permanenterregter Schrittmotor(PM)
- Hybridschrittmotor(HY)



**Abbildung 3:** Schrittmotortypen  
(Quelle: [roboterKS\_Bild])

Für unseren Anwendungsfall kommt nur der Hybridschrittmotor in Frage, aufgrund des Haltemomentes von 03 bis 1000 cNm und des kleinen Schrittwinkel von 0,36°.

### 2.1.2.3 Hybridschrittmotor

Der Hybridschrittmotor vereint die positiven Eigenschaften des Reluktanzschrittmotor und des Permanenterregten Schrittmotor. Sein Rotor besteht aus einem axialen Permanentmagneten, an dessen Enden gezahnte Kappen befestigt sind. Beide sind

um eine halbe Zahnbreite gegeneinander versetzt, so das sich Nord- und Südpole abwechseln.

### 2.1.2.4 Arten der Ansteuerung

Es gibt drei Möglichkeiten Schrittmotoren anzusteuern.

- Vollschritt
- Halbschritt
- Mikroschritt

In unserem Fall wird der Mikroschrittbetrieb benötigt um ein genaues Positionieren zu ermöglichen.

### 2.1.2.5 Mikroschritt Betrieb

Ein Schrittmotor führt Mikroschritte aus, wenn man die durch die Phasen fließenden Ströme nicht nur ein- oder ausschaltet, sondern in definierter Weise anwachsen und abnehmen läßt. Die Genauigkeit des Mikroschritts hängt davon ab, wieviele verschiedene Stromstärken vorgesehen sind und wie genau diese eingehalten werden. Die Theorie zeigt, daß eine sinusförmige Erregung am zweckmäßigsten ist. Es handelt sich dann eher um ein kontinuierliches Weiterdrehen als um ein ruckweises weiterschalten. Diese Betriebsweise hat einige Vorteile:

- ruhigerer Lauf
- keine Resonanzeffekte
- Geräuschminderung
- Schonung der Lager und ggf. nachgeordneter Antriebsteile
- bessere Auflösung bzw. Positioniergenauigkeit

Die sinuförmige Erregung erreicht man durch Stromsteuerung, genauer durch Beeinflussung der Referenzspannung. Für jede Wicklung wird eine Referenzspannung gebildet, deren Zeitverlauf aufeinanderfolgenden Sinushalbwellen entspricht. Beide Referenzspannungen sind gegeneinander um  $90^\circ$  phasenverschoben.

## 2.2 Regelung von Schrittmotoren

Da das Verwenden eines Schrittmotors zur Debatte stand, wurde hierzu eine Recherche angestellt. Die Unterschiede zwischen einem BLDC-Motor und einem Schrittmotor sind im wesentlichen:

BLDC-Motor

Verwendung von Drehstrom / 3 Phasen

niedrige Polpaarzahl

Schrittmotor

meist Verwendung von 2 Phasen

hohe Polpaarzahl

### 2.2.1 Auftretende Schwierigkeiten

Zur feldorientierten Vektorregelung bei BLDC Motoren wurden einige Erklärungen und die zugehörigen Berechnungen gefunden. Bei Schrittmotoren wird üblicherweise der Winkel geregelt, zur genauen Realisierung wird das sogenannte Microstepping verwendet. Dabei entstehen aber schwankende Momente. Eine Vorgehensweise um die Vektorregelung beim Schrittmotor mit 2 Phasen umzusetzen wurde nicht gefunden, ist aber grundsätzlich möglich. Ein weiteres Problem ergibt sich aus der hohen Polpaarzahl. Bei 50 Polpaaren und einer einigermaßen guten Nachbildung des elektrischen Winkels mit 50 Stützstellen ergibt sich eine notwendige Decoderauflösung von 2500 Impulsen pro Umdrehung. Entsprechende Decoder sind wiederum teurer, dies macht den Preisvorteil des kostengünstigeren Schrittmotors zu nichts. Die notwendige, hohe Auflösung führt ebenfalls dazu, dass zur Steuerung schon bei geringen Drehzahlen sehr hohe Frequenzen gebraucht werden.

Pole  $p = 50$

Stützstellen  $s = 50$

$U = 500 \text{ U/min}$

Frequenz am Decoder:

$f = U / 60 * p * s = 20,8 \text{ kHz}$

### 2.2.2 Fazit

Die Regelung des BLDC Motors ist einfacher umzusetzen und der geringere Preis des Schrittmotors wird durch die teureren Decoder wieder marginalisiert.



## 2.3 Auswahl der Motoren

Grundsätzlich soll der Roboter mit einem Synchronmotor mit feldorientierter Regelung angetrieben werden, um diesen per Solldrehmoment regeln zu können.

In Abhängigkeit des verfügbaren Stromes von 100A (begrenzt durch den Motortreiber, siehe Abschnitt ??) ergibt sich für das gewünschte Spitzenmoment von ca. 1Nm eine Mindestdrehmomentkonstante von  $k_d \approx 0,01 \frac{Nm}{A}$  bzw. eine Drehzahlkonstante von  $k_v \approx 820 \frac{rpm}{V}$ . Die Untergrenze für die Drehzahlkonstante ergibt sich aus der Maximalgeschwindigkeit des Roboters von  $5 \frac{km}{h}$  und damit ca.  $330 \frac{U}{min}$  zu ca.  $15 \frac{rpm}{V}$  bei  $U_{bat} = 22,2V$ . Dabei darf die maximal erlaubte Spannung des Motors 22,2V nicht überschreiten, um mit der verfügbaren Batteriespannung das maximale Moment auch erreichen zu können. Um eine möglichst kleine Baugröße zu erhalten, wurde vornehmlich nach Außenläufern gesucht, da bei dieser Bauform das mögliche Moment grundsätzlich größer ist, als bei Innenläufern.

Eine Liste der in Frage kommenden Motoren ist in Anhang ... beigefügt.

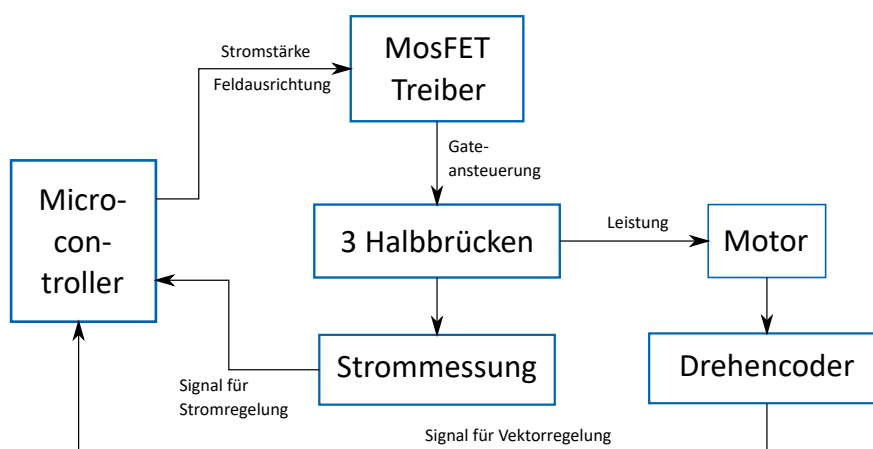
Ausgewählt wurde der „Roxxy BL Outrunner C50-55-45“. Bei einem mittleren Preis bietet dieser Motor ein sehr hohes Moment von ca. 1,5Nm bei einer Nennspannung von nur 12V sowie einem ebenfalls geringen Spitzenstrom von 16A. Damit werden alle Anforderungen erfüllt. Des Weiteren entstehen Vorteile wie geringere Kabelquerschnitte bei der Stromzuführung und geringere thermische Belastung des Motortreibers.

## 2.4 Eigenbau eines Motortreibers

Aufgrund der schlechten Verfügbarkeit eines zur feldorientierten Regelung von Synchronmotoren geeigneten Motortreibers wurde überlegt, einen solchen Treiber innerhalb der Projektarbeit zu entwickeln und zu bauen. Zur Eruierung des zeitlichen und kostenmäßigen Aufwandes wurden zunächst grobe Anforderungen festgelegt und anschließend eine Marktrecherche sowie eine Machbarkeitsstudie durchgeführt.

### 2.4.1 Anforderungen an den zu entwickelnden Treiber

Eine Skizze zur prinzipiellen Anordnung der nötigen Komponenten ist in Abbildung ?? gegeben.



**Abbildung 4:** notwendige Komponenten eines potentiellen Motortreibers  
(Quelle: eigene Darstellung, SM)

#### Notwendige Komponenten für zwei Motoren:

Microcontroller	12-24 Pwm-Ausgänge pro Motor bei min. 20kHz 4-6 digitale Eingänge für Quadraturencoder 4 digitale Eingänge für Sollmomentvorgabe (Moment und Richtung) 4 analoge Eingänge für Strommessung pro Motor
Leistungstransistoren	6 Halbbrücken (High-Side-Ansteuerung über Ladepumpe oder Pull-Up Widerstand zur Motorversorgungsspannung)
Sensorik	4 mal Strommessung

#### Gewünschte Technische Daten:

Motorspannung	bis 25V
Strom	dauerhaft 30A, Spitze 50A
Schnittstellen	I2C, USB, PWM

Die Herstellungskosten sollten XXX,- € nicht übersteigen.

## 2.4.2 Marktanalyse

### 2.4.2.1 VESC

Der VESC - vector electronic speed control [**vESC**] ist ein openSource Projekt von Benjamin Vedder. Der Treiber wurde ausgelegt, um ein Skateboard mit einem bürstenlosen Gleichstrommotor anzutreiben und ist in der Lage, 240A Spitzenstrom und 50A Dauerstrom bei bis zu 60V Versorgungsspannung zu liefern. Er verfügt über eine umfangreiche Konfigurationssoftware, über die vom PC aus alle nötigen Voreinstellungen vorgenommen werden können. Das ganze Projekt wirkt auf den ersten Eindruck sehr ausgereift.

#### Technische Daten:

Microcontroller	STM32F4
MOSFET Treiber	DRV8302
MOSFETS	6 IRFS7530
Motorspannung	8V - 60V
Strom	dauerhaft 50A, Spitze 240A
Schnittstellen	PPM signal (RC servo), analog, UART, I2C, USB, CAN-Bus
Größe	40mm mal 60mm

#### Kosten im Eigenbau für zwei Stück:

Bauteile	ca. 120,- €
Platinen	ca. 100,- €
Lötzubehör	ca. 20,- €
<b>Summe</b>	<b>ca. 240,- €</b>

Beschaffungskosten für zwei fertig aufgebaute Platinen: **ca. 280,-€**

### 2.4.2.2 ODrive

Der ODrive ist eine Entwicklung verschiedener Personen, da grundsätzlich jeder an der Entwicklung des Treibers teilnehmen kann. Dieser Treiber steuert bis zu zwei Motoren mit je ca. 100A Spitzenstrom. Das Projekt befindet sich noch in der Entwicklungsphase. Die Konfiguration des Treibers muss in die Firmware kompiliert werden.

#### Technische Daten:

Microcontroller	STM32F4
MOSFET Treiber	DRV8301
MOSFETS	28 NTMFS4935NT1G
Motorspannung	8V - 30V
Strom	dauerhaft ?, Spitze > 100A
Schnittstellen	USB, CAN, UART, PWM, and step/dir interface
Größe	110mm mal 50mm

#### Kosten im Eigenbau pro Stück:

Bauteile	ca. ???,- €
Platinen	ca. ???,- €
Lötzubehör	ca. 20,- €
<b>Summe</b>	<b>ca. ???,- €</b>

Beschaffungskosten als fertig aufgebaute Platine: **ca. 120,-€**

### 2.4.2.3 Predriver

Zur effizienteren Nutzung der MosFET wird von verschiedenen Herstellern ein Predriver angeboten. Zur Verfügung steht z.B. der DRV8305 von TI. Er stellt als Funktionen die nötige Ladepumpe, eine Möglichkeit zur Strommessung, optimierte Schaltung der FETs und andere Funktionen zur Verfügung.

### 2.4.2.4 fertige Halbbrücke als Smd-Bauteil

Infineon hat fertige Halbbrücken im Programm, die einige der benötigten Anforderungen bereits ohne externe Komponenten erfüllen. Als Beispiel sei hier der BTN8962TA vorgestellt:

#### BTN8962TA

Strom	dauerhaft 30A, Spitze 70A
Spannung	bis 40V
Ladepumpe	integriert
Strommessung	integriert
PWM	bis 25kHz
Ansteuerung	logic level
benötigte Menge	6 Stück
Einzelpreis	ca. 4,22€
<b>Gesamtkosten</b>	<b>ca. 25,-€</b>

#### 2.4.2.5 Aufbau der Halbbrücken aus Einzelkomponenten

##### Benötigte Komponenten

MosFETs	6 n-FETs	ca. 3,-€
	6 p-FETs	ca. 3,-€
Predriver	zB	ca. 5,-€
Strommessung	4 Shuntwiderstände	ca. 3,-€
<b>Gesamtkosten</b>		<b>ca. 14,-€</b>

#### 2.4.2.6 Auswahl eines Microcontrollers

##### Benötigte Eigenschaften pro Motor

6 Pwm-Ausgänge pro Motor bei min. 20kHz

6 digitale Ausgänge pro Motor

2-3 digitale Eingänge für Quadraturencoder

2 digitale Eingänge für Sollmomentvorgabe (Moment und Richtung)

2 analoge Eingänge für Strommessung pro Motor

Zusätzlich zu den o.g. Angaben muss der Controller gut programmierbar sein und sollte keine, für die Projekt- und Labormitarbeiter völlig neuartige, Programmierumgebung darstellen. Auf Grund dieser Vorgabe wird die Auswahl eingeschränkt auf Controller, die entweder von dem Arduino-Framework oder dem mbed-Framework unterstützt werden.

##### mögliche Kandidaten

Atmega 1280 ca. 9,-€

Atmega 2560 ca. 10,-€

STM32F4 ca. 9,-€

STM32F7 ca. 10,-€

Die Controller von Atmel liegen bei gleichem Preis in ihrer Leistung deutlich unter der Leistung der Controller von ST.

### 2.4.2.7 Komplettlösungen als integrierter Schaltkreis

Auf dem Markt finden sich verschiedene Ein-Chip-Lösungen für den Betrieb eines Synchronmotors. Jedoch sind diese in der Regel für sensorlosen Antrieb ausgelegt und damit im Stillstand nicht gut betreibbar. Des Weiteren liegen die erreichbaren Ströme weit unter den Projektanforderungen.

### 2.4.3 Fazit

Der Ankauf fertiger Motortreiber ist zu teuer. Ein eigenständiger Nachbau der Controller Vesc (siehe ??) oder ODrive (siehe ??) wird in etwa die gleichen Kosten produzieren, wie die Anschaffung der fertig bestückten Platinen und zusätzliche Arbeit schaffen. Andere fertige Lösungen stehen derzeit nicht zur Verfügung.

Es erscheint demnach am Sinnvollsten, einen an die Projektanforderungen angepassten Controller im Eigenbau neu zu entwerfen.

## 3 Navigation

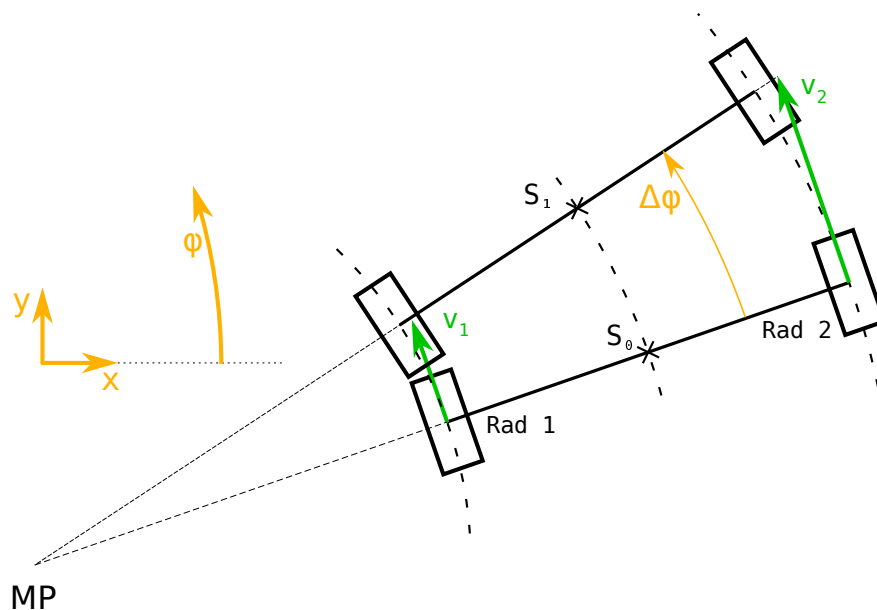
### 3.1 Sensorik

Zur Verfügung stehen folgende Sensoren:

- Gyros in allen drei Raumachsen
- Beschleunigungssensoren in allen drei Raumachsen
- Inkrementalgeber der Räder
- Ultraschallsensoren

### 3.2 Inkrementalgeber

Zur Bestimmung der Position des Roboters in einem festen Koordinatensystem können die Inkrementalgeber der Antriebsmotoren benutzt werden.



**Abbildung 5:** Rotation um den Momentanpol  
(Quelle: eigene Darstellung, SM)

Zur Ermittlung der aktuellen Position ist in Abbildung ?? die Kinematik einer Kurvenfahrt dargestellt, betrachtet für einen gedanklich sehr kleinen Zeitabschnitt. In diesem wird angenommen, dass die Geschwindigkeiten  $v_1$  und  $v_2$  beider Räder konstant bleiben. Dies sorgt für die Vereinfachung, dass der Roboter sich auf einer Kreisbahn um einen für die betrachtete Zeitspanne konstanten Momentanpol bewegt. Im Folgenden sind die durch den Inkrementalgeber erfassten Bogenlängen mit  $arc$  bezeichnet. Es

gilt:

$$arc_{R1} = \Delta\gamma \cdot r_{R1} \quad (1)$$

$$arc_{R2} = \Delta\gamma \cdot r_{R2} \quad (2)$$

$$r_{R1} = r_{R2} + l_a \quad (3)$$

$$\Delta arcs = arc_{R2} - arc_{R1} \quad (4)$$

$$r_S = r_{R2} - \frac{1}{2}l_a \quad (5)$$

Aus (??), (??), (??), (??) und (??) folgen:

$$\Delta\gamma = \frac{1}{l_a} \cdot \Delta arcs \quad (6)$$

$$r_S = \frac{arc_{R2}}{\Delta\gamma} - \frac{1}{2}l_a \quad (7)$$

Durch Aufsummieren von  $\Delta\gamma$  nach jeder Auswertung der Inkrementalgeber kann somit ein ungefährer Absolutwinkel der Roboterachse zu einem festen KS berechnet werden.

Zur Bestimmung des Schwerpunktes in xy-Koordinaten wird die Verschiebung von  $S_0$  zu  $S_1$  mit trigonometrischen Funktionen berechnet und anschließend aufsummiert. Es gilt:

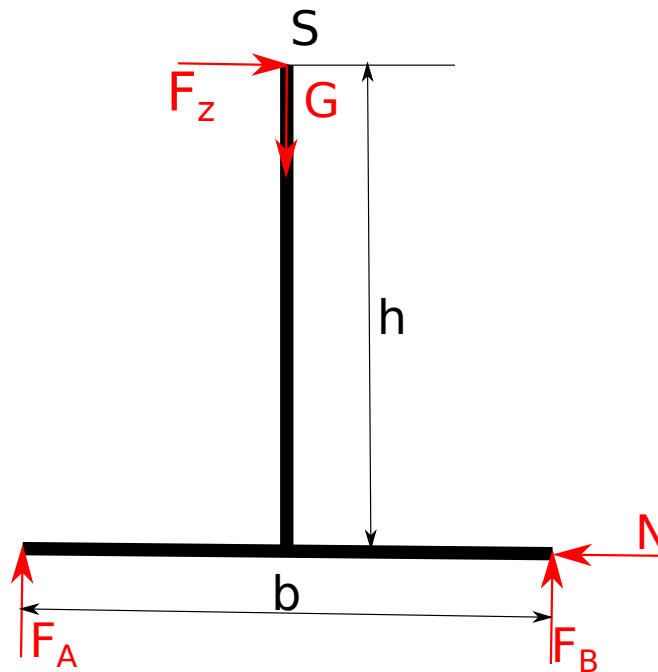
$$\vec{S}_1 = \vec{S}_0 + \begin{pmatrix} -\sin(\Delta\gamma) \cdot r_S \cdot \sin(\gamma_0) - (r_S - \cos(\Delta\gamma) \cdot r_S) \cdot \cos(\gamma_0) \\ \sin(\Delta\gamma) \cdot r_S \cdot \cos(\gamma_0) - (r_S - \cos(\Delta\gamma) \cdot r_S) \cdot \sin(\gamma_0) \end{pmatrix} \quad (8)$$

bzw. vereinfacht:

$$\vec{S}_1 = \vec{S}_0 + \begin{pmatrix} r_S [\cos(\gamma_0 + \Delta\gamma) - \cos \gamma_0] \\ r_S [\sin(\gamma_0 + \Delta\gamma) - \sin \gamma_0] \end{pmatrix} \quad (9)$$



## 4 Auslegung Kurvengeschwindigkeit



**Abbildung 6:** Kräfte bei der Kurvenfahrt  
(Quelle: eigene Darstellung, TV)

Bei der Kurvenfahrt darf der Roboter nicht seitlich umkippen. Um dies zu gewährleisten, muss das Verhältnis zwischen Geschwindigkeit und Kurvenradius passen. Dazu soll der innere Reifen noch mindestens die Hälfte der Last aufnehmen wie im Stand also ein Viertel der Gewichtskraft.

Es gilt:

$$F_A = \frac{1}{4} m \cdot g \quad (10)$$

$$G = m \cdot g \quad (11)$$

$$F_z = m \cdot \ddot{x} \quad (12)$$

$$N = m \cdot \frac{v^2}{r} \quad (13)$$

$$F_A + F_B = G \quad (14)$$

$$N = F_z \quad (15)$$

$$F_A \cdot b = F_z \cdot h \quad (16)$$

Hieraus folgt:

$$\ddot{x} = \frac{v^2}{r} \quad (17)$$

$$\frac{1}{4}m \cdot g \cdot b = m \cdot \frac{v^2}{r} \cdot h \quad (18)$$

Und daraus die Zusammenhänge von Geschwindigkeit zu Radius

$$v = \sqrt{\frac{gb}{4h} \cdot r} \quad (19)$$

$$r = \frac{4h}{gb} \cdot v^2 \quad (20)$$

Der notwendige Reibwert  $\mu$  zwischen Reifen und Boden ergibt sich aus der Haftbedingung.

$$\mu \cdot mg = m \cdot \frac{v^2}{r} \quad (21)$$

$$\mu = \frac{v^2}{rg} \quad (22)$$