Lacher, Markus BEL16a

markuslacher@hotmail.ch

Balancer Robot

Berufsmaturitätsarbeit

F:\BalancerRobot\Aaron Drawings\KS®2836215761.168.tif

Betreuer: H.P. Lutz

Abgabe: 26.11.2019

Berufsmaturitätsschule Zürich

Technik, Architektur, Life Sciences

# Abstract

Im Projekt „Balancer Robot“ werden die physikalischen Effekte eines selbstbalancierenden Fahrzeugs analysiert. Ziel des Projekts ist das Entwerfen einen selbstbalancierenden Fahrzeugs.

Mithilfe von Testversuchen wird das Verhalten eines 3-Achsen Beschleunigungs- und Gyrosensor untersucht. Eine selbstentwickelte Elektronik steuert zwei DC-Bürstenmotoren an. Per Mikrocontroller wird der Sensor konfiguriert und ausgelesen. Nach der Verarbeitung der Daten werden die Motoren mithilfe eines Regelungsalgorithmus angesteuert, mit dem Versuch, das Fahrzeug auszubalancieren.

Die Ergebnisse zeigen: Durch korrektes Verarbeiten der Sensorwerte lässt sich der Winkel des Fahrzeugs bestimmen. Durch eine PWM Ansteuerung können die Motoren reguliert werden. Doch erste Testversuche zeigen, dass für ein Ausbalancieren des Fahrzeugs nicht die Spannung über den Motoren, sondern die Stromaufnahme der Motoren reguliert werden sollte, da sich diese im Gegensatz zur Spannung proportional zum Drehmoment der Motoren verhält. Zudem wurde festgestellt, dass ein simpler PID-Regler als Regelungsalgorithmus nicht ausreicht, um das Fahrzeug auszubalancieren.

Inhalt

[Abstract 1](#_Toc25484656)

[Einleitung 4](#_Toc25484657)

[Fragestellung 4](#_Toc25484658)

[Projektphasen 4](#_Toc25484659)

[Hauptteil 5](#_Toc25484660)

[Konzept 5](#_Toc25484661)

[Physikalisches Grundprinzip 6](#_Toc25484662)

[Sensorik 8](#_Toc25484663)

[Rotation 8](#_Toc25484664)

[Beschleunigung 8](#_Toc25484665)

[Konfiguration 8](#_Toc25484666)

[Datenverarbeitung 9](#_Toc25484667)

[Sensor Auswertung 10](#_Toc25484668)

[Aktoren 12](#_Toc25484669)

[Ansteuerung Motor 12](#_Toc25484670)

[PWM 13](#_Toc25484671)

[Motor Stromaufnahme 14](#_Toc25484672)

[L298 als neuer Motortreiber 16](#_Toc25484673)

[Layout 17](#_Toc25484674)

[Akkumulatoren 21](#_Toc25484675)

[Mechanik 22](#_Toc25484676)

[Motor 22](#_Toc25484677)

[Prototyp 23](#_Toc25484678)

[3D-Model 24](#_Toc25484679)

[Software 25](#_Toc25484680)

[Architektur 25](#_Toc25484681)

[Regelungsalgorithmus 26](#_Toc25484682)

[Allgemein 26](#_Toc25484683)

[PID-Regler 27](#_Toc25484684)

[Umsetzung 28](#_Toc25484685)

[Schluss 29](#_Toc25484686)

[Quellenverzeichnis 31](#_Toc25484687)

[Abbildungsverzeichnis 33](#_Toc25484688)

[Dank 34](#_Toc25484689)

[Anhang 35](#_Toc25484690)

[Schema 35](#_Toc25484691)

[Software 35](#_Toc25484692)

[Balancer Robot 35](#_Toc25484693)

[Python Programm 35](#_Toc25484694)

# Einleitung

## Fragestellung

Ist es möglich, mithilfe eines Beschleunigungs- und Gyrosensors und zwei DC-Motoren ein Fahrzeug auf 2 Rädern auszubalancieren? Welche physikalischen Kräfte wirken und wie funktioniert das Ausbalancieren?

In einem YouTube Video sah ich ein kleines selbstgebautes Fahrzeug, welches sich auf 2 Rädern ausbalanciert, indem es vorwärts und rückwärts fährt. Dieses Prinzip faszinierte mich so sehr, dass ich selber ein Fahrzeug bauen wollte, welches sich ausbalanciert.

Grosse Teile dieses Projekts befassen sich mit der Entwicklung einer Elektronik, welche die Sensorik und die Ansteuerung der Motoren zur Verfügung stellt, damit eine Regelungssoftware das Ausbalancieren des Fahrzeugs bewältigen kann. Es werden Überlegungen zur Physik angestellt, sowie Informationen über Regelungstechnik gesammelt, damit eine Elektronik entwickelt werden kann, die ein Ausbalancieren ermöglicht.

## Projektphasen

Das Projekt lässt sich in folgende 4 Phasen unterteilen:

1. Berechnen, analysieren und verstehen der physikalischen Kräfte

Zu Beginn wurden physikalische Berechnungen durchgeführt, um die wirkenden Kräfte abzuschätzen.

1. Entwickeln der Elektronik und der Mechanik

Aufgrund der Überlegungen zur Physik wurden Motoren und Sensoren bestellt. Danach wurde ein erster Prototyp entwickelt.

1. Entwickeln der Embedded Software

Für den ersten Prototyp wurde Software entwickelt, welche die Hardware steuert. Dies beinhaltet das Konfigurieren und Auslesen des Sensors, das Ansteuern der Motoren, sowie das Überprüfen der Akku-Ladung. Zusätzlich wurde eine Software für den Computer entwickelt, dass die Messwerte des Sensors analysiert werden können.

1. Entwickeln eines Regelalgorithmus

Nachdem der erste Prototyp entwickelt wurde und die Software für das Steuern der Hardware programmiert und getestet wurde, konnten erste Balancier-Versuche mithilfe eines Regelungsalgorithmus durchgeführt werden. Ich informierte mich über PID-Regler und entwickelte einen ersten kleinen Regelungsalgorithmus. Leider mit begrenztem Erfolg, denn das Ausbalancieren funktionierte nur beschränkt.

Im Hauptteil werden diese 4 Phasen chronologisch abgearbeitet. Zuerst wird das grobe Konzept jeder Regelungselektronik sowie das physikalische Grundprinzip erläutert. Nachfolgend sind Information über die Sensorik und die Aktoren dokumentiert. Anschliessend ist die Entwicklung der Leiterplatte, der Mechanik und der Software beschrieben. Abschliessend sind erste Experimente eines Regelalgorithmus dokumentiert.

# Hauptteil

## Konzept

Der Balancer Robot ist im Prinzip nichts anderes als eine Regelungselektronik. Über Sensorik wird eine physikalische Grösse gemessen und mithilfe der Regelung wird ein Aktor angesteuert, sodass sich ein gewollter Sollwert einstellt.

Das Fahrzeug misst mithilfe eines 3-Achsen Gyrosensors und eines 3-Achsen Beschleunigungssensors die Kräfte, die auf das Fahrzeug wirken. Die Messwerte werden von einem Mikrocontroller eingelesen und verarbeitet. Dieser versucht dann die Motoren so anzusteuern, dass das Fahrzeug nicht umfällt.

## Physikalisches Grundprinzip

**Schwerpunkt**

**Motorachse**

**Kippachse**

FG

FK

FR

MK

Die Erdanziehungskraft FG wirkt auf den Schwerpunkt des Fahrzeugs. Die Kraft lässt sich aufteilen in FR und FK.

FR wirkt diagonal in Richtung der Kippachse und ist für die Verschiebung des Fahrzeugs beim Umfallen verantwortlich.

FK steht rechtwinklig zur Kippachse beschleunigt die Rotation um die Kippachse.

Diese Rotation resultiert in einem Drehmoment MK auf der Kippachse. Je schiefer das Fahrzeug steht, desto grösser wird FK und somit auch MK.

FG

MM

MRad

FM

FK

Um nicht umzufallen muss das Fahrzeug vorwärts fahren. Der Motor erzeugt das Drehmoment MRad, das Rad beginnt sich im Uhrzeigersinn zu drehen. Laut Newtons drittem Gesetz folgt auf eine Kraft immer eine Gegenkraft. Dies bedeutet, dass das Drehmoment MRad eine Gegenkraft, bzw. Gegendrehmoment auf die Motorachse ausübt. Diese Gegenkraft wird mit MM bezeichnet.

Das Drehmoment MM der Motorachse erzeugt eine Kraft FM im Schwerpunkt, welche das Fahrzeug wieder aufrichtet.

FM grösser FK resultiert im Aufrichten des Fahrzeugs, FM kleiner FK resultiert im Umfallen des Fahrzeugs.

Dividiert man das Drehmoment des Rades durch dessen Radius, erhält man die Kraft Fa, welche das Fahrzeug relativ zum Boden beschleunigt.

MM

MRad

Fa

r

Die beschleunigende Kraft Fa ist wichtig, da die Reifen einen Reibungskoeffizienten besitzen. Die Gewichtskraft FG multipliziert mit dem Reibungskoeffizienten definiert die maximal mögliche Beschleunigungskraft Fa.

Der erste Prototyp wiegt 788g. Der Reibungskoeffizient des Reifen ist abhängig von der Oberfläche, auf der dieser rollt. Die Schätzung des Reibungskoeffizienten wurde für einen Holzboden als Unterlage getroffen, da der Prototyp hauptsächlich auf selbigem getestet wurde.

0.203Nm

Schätzung Reifen auf Holzboden:

Die Rechnung zeigt auf, dass ein Drehmoment von 0.203Nm pro Reifen nicht überschritten werden sollte, da dieser ansonsten die Haftung zum Boden verliert und durchdreht.

## Sensorik

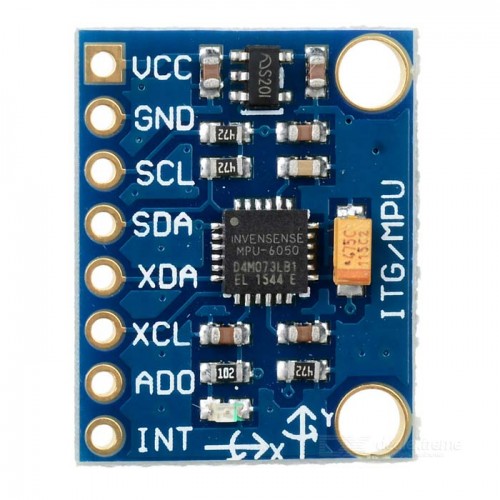


Abbildung 1: Sensorboard MPU-6050

Die rechts abgebildete Leiterplatte ist mit dem Sensor MPU-6050, einen sehr verbreiteten Gyro- und Beschleunigungssensor, bestückt. Dieser misst in allen 3-Achsen die Beschleunigung, sowie die Rotationsgeschwindigkeit. Über die digitale I2C Kommunikationsschnittstelle kann der Sensor konfiguriert und ausgelesen werden.

### Rotation

Der Gyrosensor misst die Rotation um eine Achse in Grad/s. Je nach Konfiguration kann der Sensor bis zu 1000°/s messen. Befindet sich der Sensor in Ruhelage, ist die Rotation aller Achsen gleich 0. Man könnte den Winkel bestimmen, indem man die Rotationsgeschwindigkeit pro Zeiteinheit aufsummiert, jedoch driftet die Berechnung des Winkels ab, da Messfehler addiert werden und somit das Ergebnis mehr und mehr verfälscht wird.

**Y**

**X**

**Z**

Abbildung 2: Achsenansicht von oben

### Beschleunigung

Die Beschleunigung wird in m/s2 gemessen. Je nach Konfiguration kann der Sensor bis zu +/- 16G messen, dass entspricht der 16-fachen Erdbeschleunigung also ca. 160m/s2.

Liegt der Sensor still, ist die einzige Kraft, welche auf ihn wirkt, die Erdbeschleunigung. Würde der Sensor flach auf dem Tisch liegen wie in Abbildung 1, dann misst man auf der Z-Achse eine Beschleunigungskraft von 9.81m/s2. Auf der X- und Y-Achse liegt keine Kraft an. Beginnt man nun den Sensor zu kippen, teilt sich die Kraft der Erdbeschleunigung auf die Achsen auf. Mithilfe von Vektorgeometrie lässt sich dann der Winkel bestimmen.

**g**

**X**

**Z**

Abbildung 3: Kraftvektoren beim Kippen

Um den Roboter auszubalancieren versucht die Regelung den Winkel Alpha immer bei 90° zu halten.

**Z**

**g**

**X**

**α**

Abbildung 4: Kräftedreieck für Winkelberechnung

### Konfiguration

Der Sensor wird so konfiguriert, dass er mit einer Frequenz von 100Hz die Messwerte der 6-Achsen aufzeichnet. Sobald diese bereit zum Auslesen sind, wird dies über den Pin INT (Interrupt) signalisiert. Die Messwerte werden dann sofort vom Mikrocontroller ausgelesen und verarbeitet.

### Datenverarbeitung

Der Sensor besitzt einen internen DMP. Richtig konfiguriert filtert dieser die Messdaten mit einem Tiefpassfilter, damit Störungen bereits intern im Sensor herausgefiltert werden können.

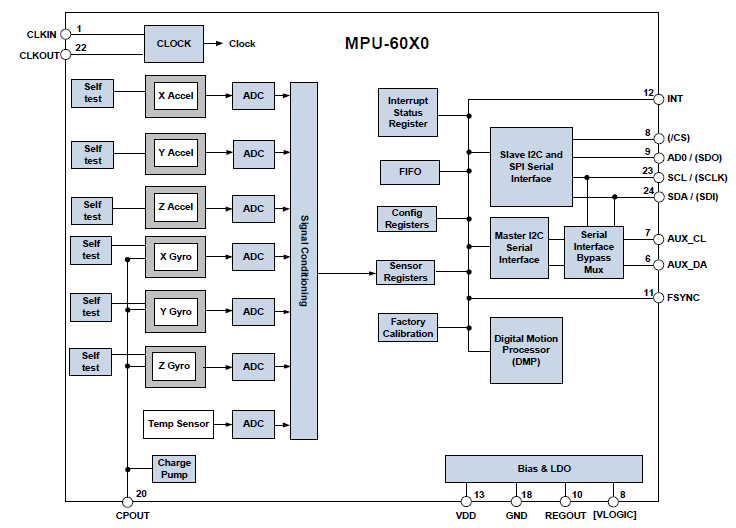


Abbildung 5:Blockschema MPU-6050 (InvenSense, 2019)

Auch per Software werden die Daten nochmals optimiert. Das Daten Verarbeiter Modul der Software glättet die Messwerte mithilfe eines gleitenden Mittelwerts.

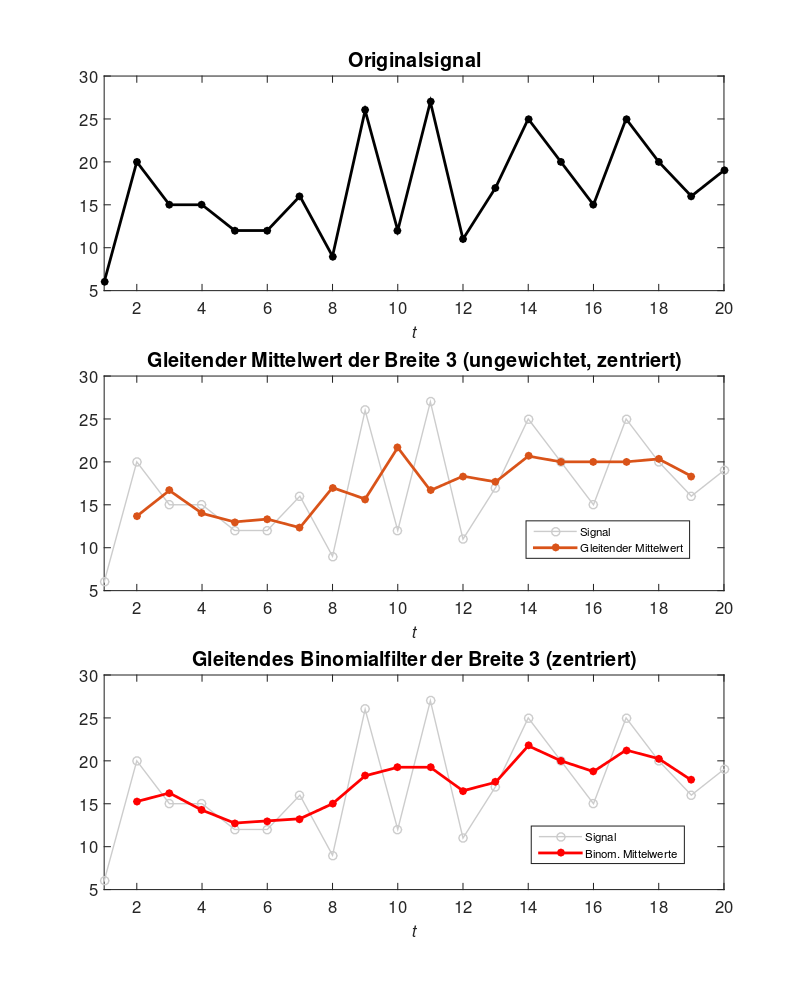


Abbildung 6: Gleitender Mittelwert (Wikipedia, 2019)

Durch das Tiefpassfilter und den gleitenden Mittelwert werden Störungen, Messfehler und Rauschen des Sensor minimiert.

Einziger Nachteil: Durch das Verarbeiten der Daten wird die Zeitverzögerung der tatsächlichen Messung bis zu deren Verarbeitung durch Regler grösser. Dies kann das Verhalten des Reglers negativ beinflussen.

### Sensor Auswertung

Um den Sensor zu testen wurde eine erste Testsoftware für den Mikrocontroller geschrieben, welche die gemessen Werte über die UART-Schnittstelle des Mikrocontrollerboards an einen angeschlossenen PC sendet. Zusätzlich wurde eine Python Software entwickelt, welche die gesendeten Daten verarbeitet und diese in eine Excel Tabelle schreibt. Dadurch konnte das Verhalten des Sensors analysiert werden.

#### Kippen von Hand

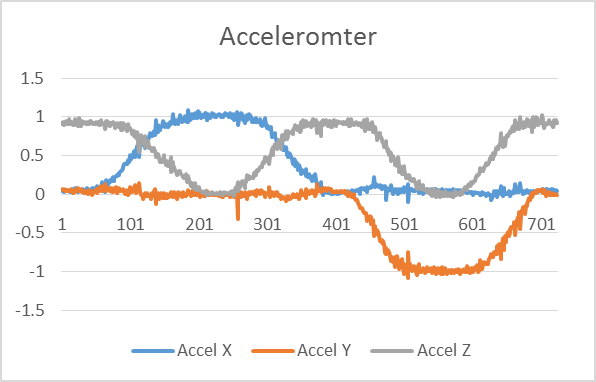


Abbildung 7: Messung des Acceleromters

Der Sensor wurde von Hand um alle drei Achsen gedreht. Die Messwerte sind stark verrauscht, da einerseits die Handbewegungen nicht exakt sind, andererseits das digitale Tiefpassfilter des Sensors noch nicht aktiviert ist.

Die Y-Achse entspricht der Kraft in G und die X-Achse der Nummer des Messwerts.

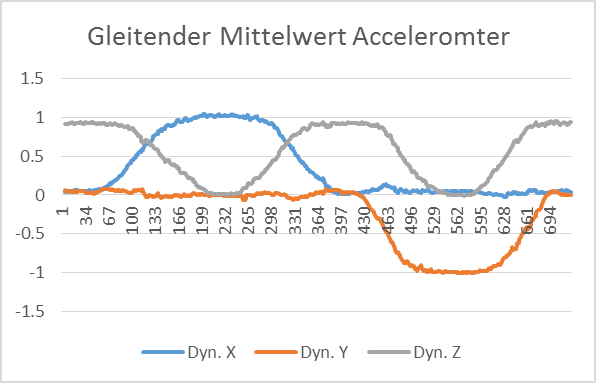


Abbildung 8: Messung mit gleitendem Mittelwert

#### Gleitender Mittelwert

Im Excel wurde der gleitende Mittelwert aus den letzten 5 Werten gebildet. Das Rauschen wurde gedämpft und Störungen bzw. Spitzen wurde geglättet.

Um zu prüfen ob der Sensor den Anforderungen entspricht und auch um ein Verständnis für das Verhalten des Sensors zu entwickeln wurden zwei weitere Tests durchgeführt.

#### Freier Fall

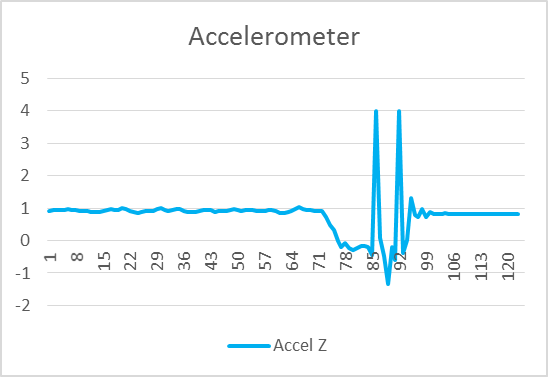


Abbildung 9: Messwerte der Z-Achse im freien Fall

Der Sensor wurde aus 300mm fallen gelassen, um die Kräfte während dem Fall zu messen. Die Z-Achse (graue Linie) misst zu Beginn 1G. Sobald der Sensor fallengelassen wird, sinkt die Kraft auf 0G. Beim Aufprall wirken enorme Kräfte auf den Sensor, weshalb alle 3-Achsen starke Ausreisser aufweisen.

#### Umfallen

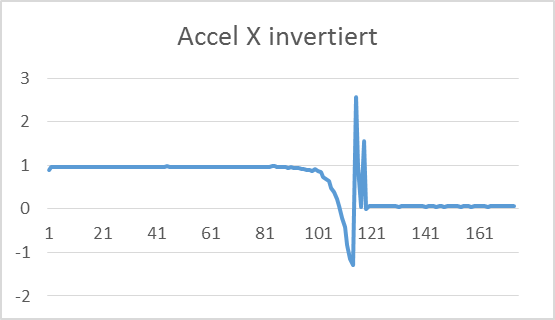


Abbildung 10: Messwerte X-Achse Accelerometer

Um zu testen, ob die Kräfte beim Umfallen im Gegensatz zum freien Fall messbar sind, wurde der Sensor auf ein 300mm langes Lineal montiert. Dieses wurde senkrecht aufgestellt, beim Umfallen wurden dann die Kräfte aufgezeichnet.

Beim Aufbau zeigte die X-Achse nach oben, weshalb diese zu Beginn die Erdanziehungskraft von einem G misst. Ab dem 90. Messwert beginnt die Kraft zu sinken, der Sensor beginnt zu kippen.

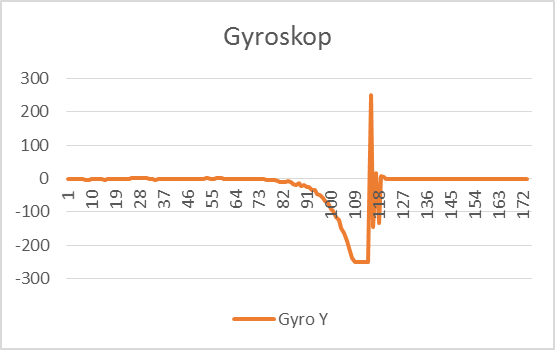


Abbildung 11: Messwerte der Y-Achse Gyroskop

Auch beim Gyroskop sieht man die steigende Rotationsgeschwindigkeit. Etwa beim 110. Messwert ist der Sensor aufgeprallt, die Messwerte danach sind Störungen, bzw. Messungen der enormen Aufprallkräfte.

Interessant zu beobachten ist, dass die Kurve beim Beschleunigungssensor nicht bei 0G stoppt, da dies ja einem Winkel α von 0° entsprechen würde. Dies ist auch auf die Kräfte beim Aufprall zurückzuführen. Nachdem der Sensor ruhig auf dem Boden liegt, sieht man auch die erwartete Kraft von 0G.

## Aktoren

### Ansteuerung Motor

Ein DC-Motor besitzt zwei Anschlüsse. Ändert die Richtung des Stromes, wechselt auch die Drehrichtung des Motors. Um dieses Wechseln des Stromes elektronisch umzusetzen wurde eine H-Brücke, auch Vierquadrantensteller genannt, verwendet.

Prinzip: Die Schaltung besitzt eine Motorspannung U+ und einen GND. Schaltet der Transistor T1 und T4 während T2 und T3 sperren, dann liegt vom linken zum rechten Anschluss des Motors gesehen eine positive Spannung an.

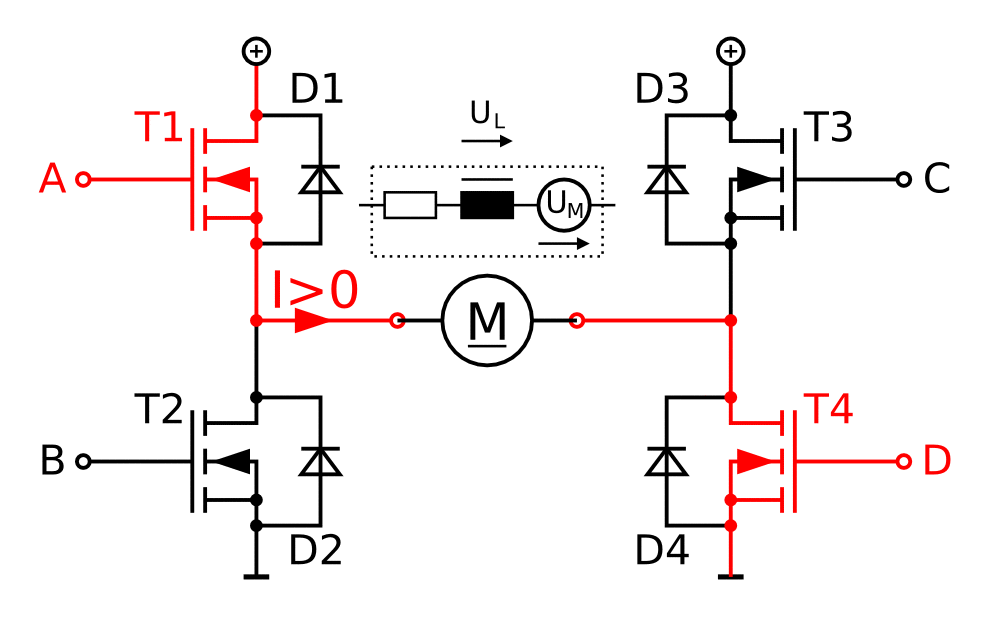


Abbildung 12: (Wikipedia, 2019)

Sperrt T1 und T4 und leiten dafür T2 und T3, dann liegt eine negative Spannung vom linken zum rechten Anschluss an. Die Drehrichtung ändert.

Da ich die Anschlüsse A-D der H-Brücke mit CMOS-Logik (0 – 3.3V, gegeben durch Mikrocontroller) ansteuern möchte, die Motorspannung U+ jedoch bis zu 16V beträgt, müssten für den Anschluss A und C noch zusätzliche Komponenten für die Spannungstransformation verwendet werden. Ausserdem bräuchten die Bauteile einzeln verbaut mehr Platz. Deswegen wird der IC **L293D** verwendet.

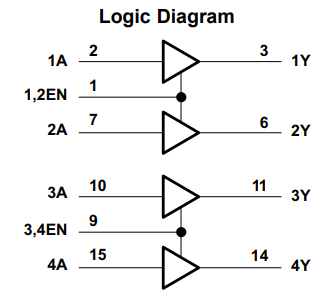


Abbildung 13: (Texas Instruments, 2019)

Der Baustein besitzt 4 High-Voltage Treiber. Über den Eingang A kann mit 0V oder 3.3V der Ausgang Y auf 0V oder auf den Level der Speisespannung geschaltet werden. Die Speisespannung kann bis zu 36V betragen. So kann an 1Y und 2Y der erste Motor und über 3Y und 4Y der zweite Motor angeschlossen werden.

Die Ausgänge können bis zu 1.2A liefern und auch „schlucken“. Mit den beiden Signalen 1,2EN und 3,4EN können die Treiber aktiviert werden.

### PWM

Die Software soll die Leistungsabgabe des Motors steuern können, ansonsten ist eine Regelung nicht möglich. Um diese Steuerung zu erreichen wird die H-Brücke mit einem **PWM** Signal angesteuert. PWM steht für **P**ulse **W**ide **M**odulation.

Die Spannung über dem Motor soll reguliert werden. Da die Hardware jedoch nur zwei Zustände einstellen kann, (siehe H-Brücke) wird mit ständigem Ein- und Ausschalten die Spannung über dem Motor reguliert.

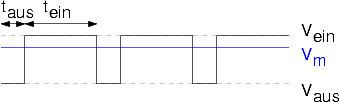


Abbildung 14: (Mikrocontroller.net, 2019)

### Motor Stromaufnahme

#### Problem

Die ersten Tests mit dem L293D mit PWM Ansteuerung verliefen gut. Die Motoren liessen sich in beide Richtungen drehen. Der L293D wurde aber relativ heiss. Doch als ich den Roboter das erste Mal zusammengebaut hatte und diverse Probleme nach einer zeitintensiven Fehlersuche endlich beheben konnte, wollte ich die komplette Software mit einem einfachen Regelungsalgorithmus testen.

Der L293D Baustein wurde noch heisser als sonst und ein Motor arbeitete nicht richtig. Ich vermutete der Baustein sei beschädigt, da ich ihn anfangs falsch angeschlossen hatte. Als ich den Baustein austauschte in der Hoffnung, die Ansteuerung der Motoren würde funktionieren, ging dieser direkt bei Einschalten der Motoren kaputt, der Mikrocontroller funktionierte auch nicht mehr.

#### Theorie

Im Projekt werden Gleichstrom- Bürstenmotoren eingesetzt. Diese erzeugen durch die Rotation der Achse eine Gegeninduktion in der Spule, welche den Strom ausbremst. Je höher die Drehzahl des Motors, desto grösser ist die Gegenspannung und dementsprechend wird der Strom umso kleiner. Dies ist auch der Grund für die Tatsache, dass das Drehmoment bei Elektromotoren bei steigenden Drehzahlen abnimmt.



Abbildung 15: Messaufbau

Parameter:

U0: 15V

RMess 2Ω

RMotor 3Ω

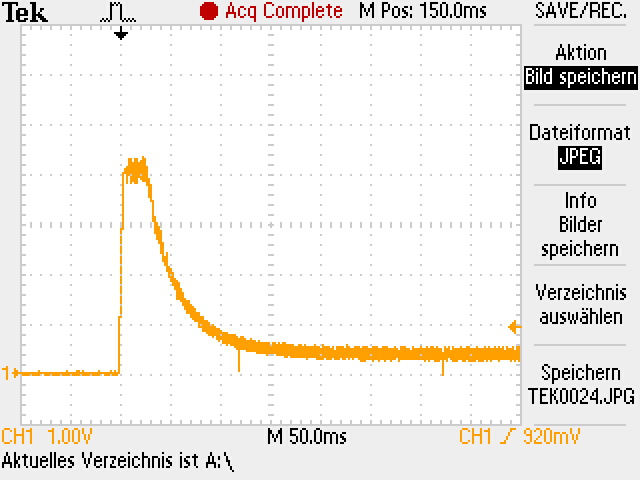


Abbildung 16: Messung 1, Start des Motors

##### Analyse

Um das Problem zu analysieren wurde ein Messversuch durchgeführt. Über einen 2 Ohm Messwiderstand wurde mithilfe eines Oszilloskops die Stromaufnahme des Motors aufgezeichnet. Dieser ist nicht ideal, da der Ohm’sche Widerstand der Motorspule 3Ohm beträgt. Dies führt bei grossen Strömen zur Verminderung der Spulenspannung über dem Motor, da über dem Messwiderstand eine zu grosse Spannung abfällt.

Trotzdem war der Fehler bereits nach der ersten Messung offensichtlich. Im Stillstand induziert die Motorwelle in der Spule noch keine Gegenspannung. Beim Einschalten wirkt somit ganz kurz die Impedanz der Spule, danach nur noch der Ohm’sche Widerstand von 3Ω. Bei 15V entsteht dann über einen Zeitbereich von 40ms ein Strom von über 4 Ampère. Danach sinkt der Strom innerhalb von 60ms auf 200mA. Dies entspricht ziemlich genau den Angaben des Datenblatts, welches bei keiner mechanischen Belastung einen Strom von 180mA angibt.

Der Motortreiber L293D kann pro Ausgang einen konstanten Strom von 1.2A Ampère liefern, was für den Normalbetrieb des Motors ausreichen würde. Doch der kurzzeitige Stromspitz beim Anfahren genügt, um den Motortreiber zu zerstören.

Um der hohen Stromanforderung gerecht zu werden, wurde ein neues IC getestet. Der L298 ist ähnlich aufgebaut wie der alte Treiber L293D, jedoch kann dieser einen Strom von 2A liefern und kurzzeitige Spitzen bis zu 3A Ampère. Dieser wird im Betrieb auch sehr warm, funktioniert jedoch.

Strommessung bei Anfahren mithilfe von PWM. Man sieht die PWM Frequenz von 1kHz sowie das Stromverhalten eines LC Gliedes, da die Kurve einer e-Funktion ähnelt. Da die Spannung nur kurzeitig eingeschaltet ist, steigt der Strom nicht über 1.5A, weshalb der L293D intakt bleibt.

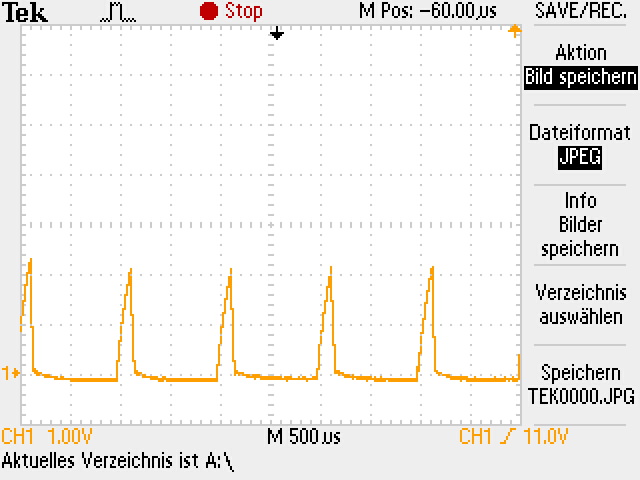


Abbildung 17: Messung des Stroms bei Anfahren mit PWM

Gefährlich wird es, wenn der Motor mit einem hohen PWM Wert anfährt.

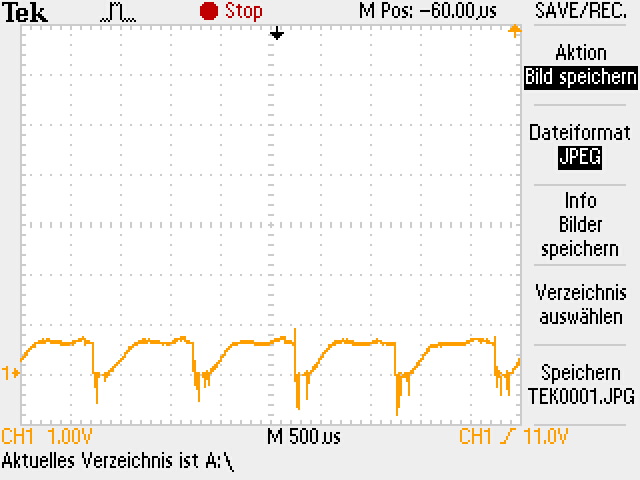


Abbildung 18: Messung des Stroms bei PWM 60%

Messung des Stroms bei laufendem Motor mit einem PWM von 60%. Man sieht gut, dass der Motor im Betrieb weniger Leistung benötigt als beim Anfahren. In der Messung sieht man auch gut, wie der PWM arbeitet. Die negativen Stromspitzen werden beim Abschalten der Spule durch deren Selbstinduktion erzeugt.

### L298 als neuer Motortreiber

Die Messungen zeigten, dass sich der L298 aufgrund der grösseren Ausgangsleistung besser für die Ansteuerung der Motoren eignet. Dieser IC hat ein grösseres Gehäuse mit besserer Kühlfläche und 2 zusätzliche Anschlüsse. Im Gegensatz zum L293D sind die Emitteranschlüsse der beiden H-Brücken nicht direkt mit GND verbunden, sondern über zwei Pins hinausgeführt. Dies ermöglicht das Einsetzen zweier Shunt Widerstände um die Stromaufnahme der beiden Motoren zu messen.

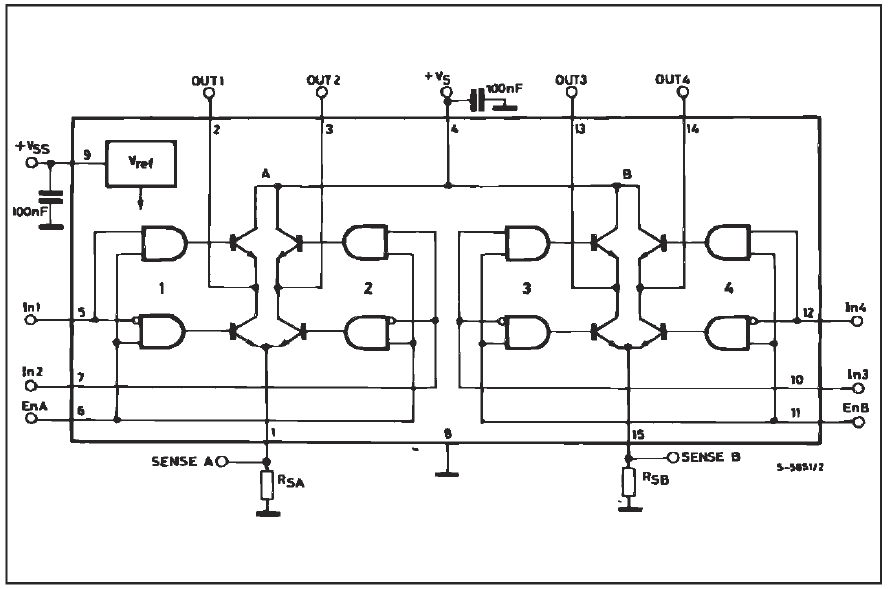


Abbildung 19: Block Diagramm aus L298 Datenblatt (ST Microelectronics, 2019). Die roten Kreise markieren die beiden Anschlüsse für das Messen des Stromes

## Layout

Von Beginn an war klar, dass eine Leiterplatte entwickelt werden muss, damit die vielen Verbindungen nicht mit Kabel umgesetzt werden müssen. Die erste Idee war das Entwickeln zweier Leiterplatten. Eine Leiterplatte ist mit dem Motortreiber bestückt und wird vom Akku gespiesen. Auf der zweiten Leiterplatte befinden sich die Sensorik, der Mikrocontroller sowie der Taster für den Benutzer. Die beiden Leiterplatten sollten übereinander verbaut werden, der Motor Driver zwischen den Akkus und das Controller Board oberhalb davon.

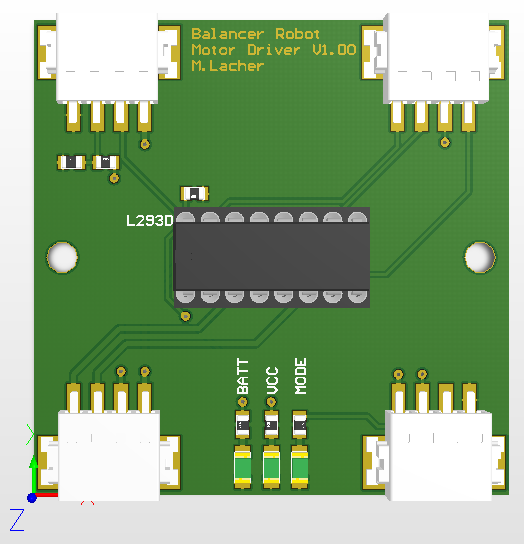


Abbildung 20: Leiterplatte „Motor Driver V1.00“

Abmessung: 50x50mm

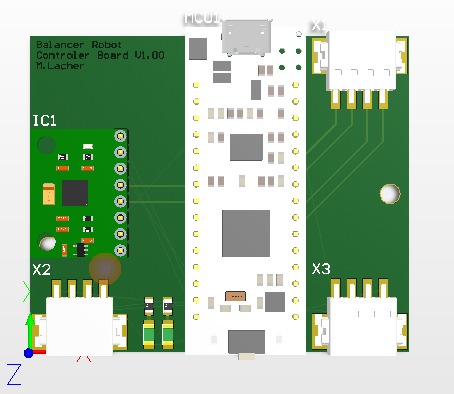


Abbildung 21: Leiterplatte „Controller Board V1.00“

Abmessung: 50x50mm

Da die Akkuhalter sehr lang sind würde das Fahrzeug viel zu breit werden. Deshalb wurde eine zweite Variante entwickelt, in der alle Komponenten auf einer Leiterplatte bestückt sind. Dies vereinfacht einerseits die Verdrahtung der einzelnen Fahrzeugkomponenten, andererseits konnte die Breite des Fahrzeugs um 50mm verringert werden.

Abmessung: 100x60mm

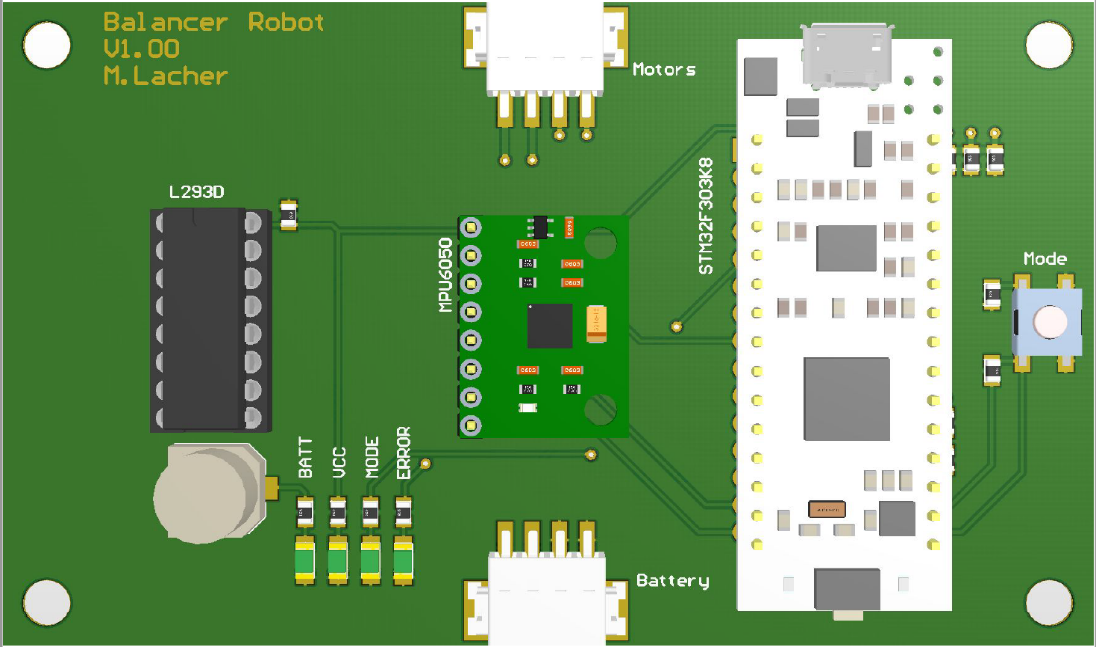


Abbildung 22: Leiterplatte "Balancer Robot V1.00"

Nachdem dem die Probleme mit dem Motortreiber L293D auftraten und ein neuer Treiber evaluiert wurde, musste eine neue Leiterplatte entwickelt werden. Rot eingekreist sieht man den neuen Motortreiber sowie die beiden Shunt-Widerstände für die Strommessung.

Die Bohrungen haben einen Durchmesser von 4.3mm und sind somit für M4 Schrauben ausgelegt. Das Zentrum der Bohrungen ist 4mm vom Rand entfernt.

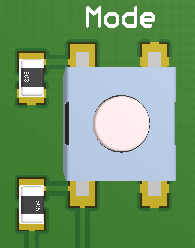


Abbildung 23: Mode-Taster

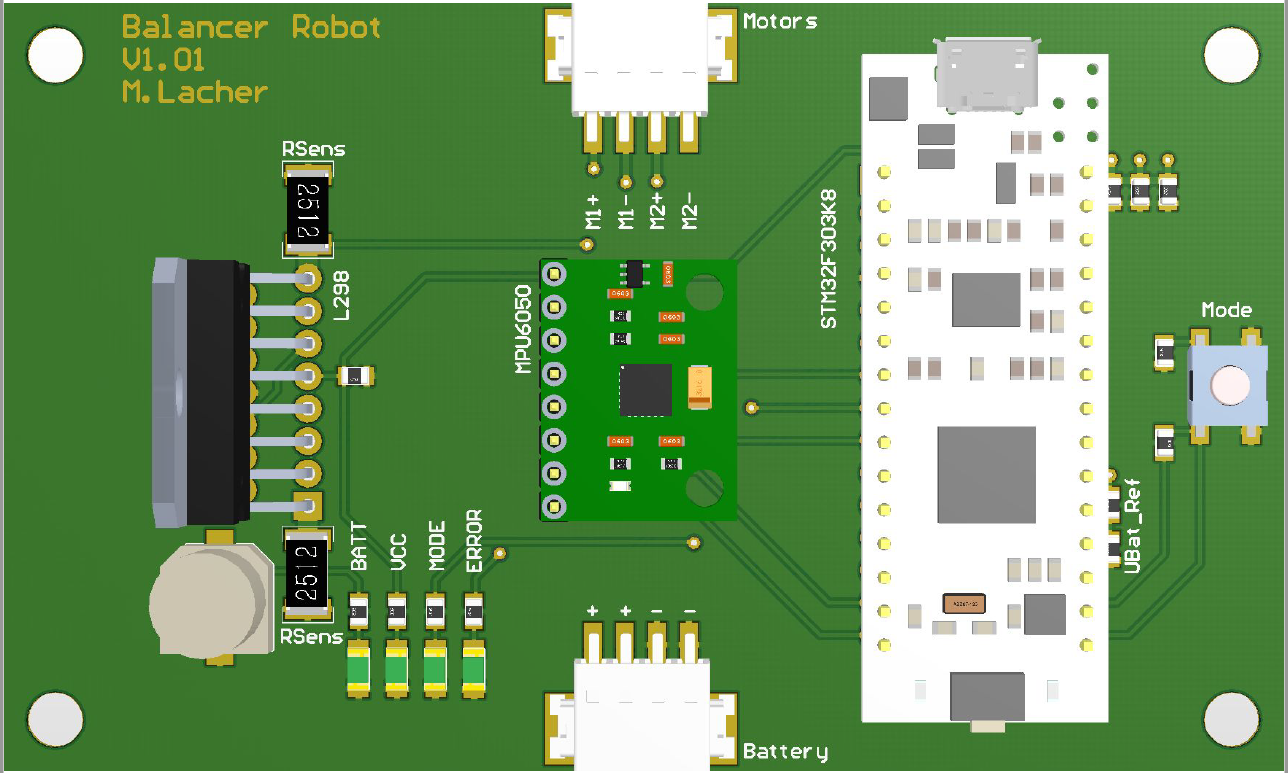


Abbildung 24: Leiterplatte "Balancer Robot V1.01"

Ganz rechts auf dem Layout befindet sich ein Taster. Mithilfe dieses Tasters kann der Benutzer die Software steuern. Im fertigen Produkt wird dann der Mode des Balancer Robots geändert.

Die 4 LED signalisieren dem Benutzer folgende Informationen:

**Batt**: Batteriespeisung vorhanden

**VCC**: 3.3V Speisung vorhanden

**Mode**: Signalisiert den aktuellen Modus mithilfe eines Blink-Codes

**Error**: Signalisiert verschiedene Fehler mithilfe eines Blink-Codes

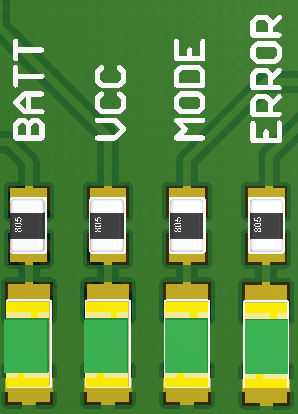


Abbildung 25: LED-Anzeige

Über den Akku-Stecker wird die Schaltung eingespeist. Jeweils zwei Anschlüsse für das positive Spannungspotential und zwei Anschlüsse für das negative Spannungspotential sind miteinander verbunden. Dies ermöglicht einerseits das Weiterführen der Akkuspannung, andererseits können bei grosser elektrischer Belastung zwei Drähte parallel zur Einspeisung verwendet werden.

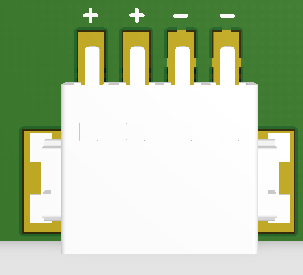


Abbildung 26: Akku-Stecker

An den 4 Anschlüssen des Motor-Steckers werden die beiden Motoren angeschlossen. Pro Motor ist ein Anschluss mit Plus und ein Anschluss mit Minus gekennzeichnet. Auf der mechanischen Grundplatte sind diese Bezeichnungen wiederzufinden.

*Es ist wichtig, dass die Motoren korrekt angeschlossen werden, ansonsten funktioniert das Ausbalancieren nicht.*

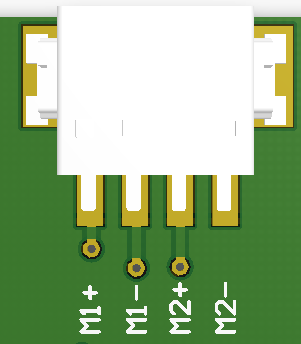


Abbildung 27: Motor-Stecker

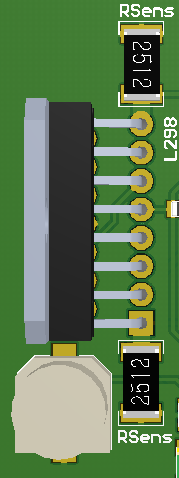


Abbildung 28: L298 Motor Treiber

Der neue Motortreiber L298 ist senkrecht aufgerichtet, damit auf der Rückseite ein Kühlkörper montiert werden kann.

Die beiden Shunt-Widerstände sind so nahe wie möglich am dazugehörigen Pin und danach direkt auf GND angeschlossen, damit der Widerstand der Leiterbahnen möglichst gering bleibt.

Ein SMD-Elektrolytkondensator stützt die Akkuspannung, direkt beim Motor Treiber, damit diese bei schnell ändernder Belastung nicht zusammenbricht.

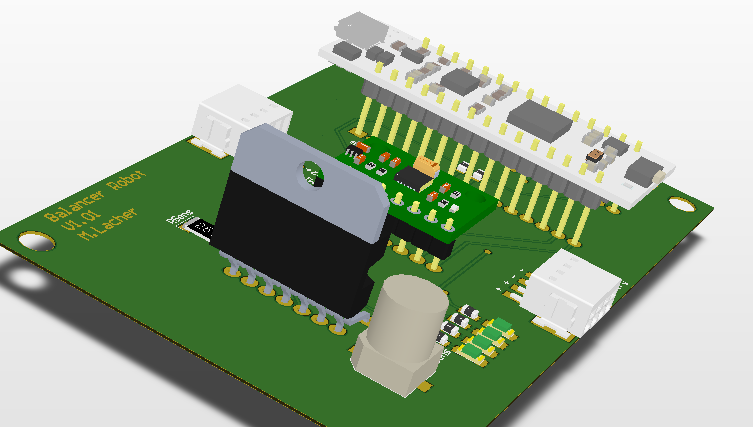


Abbildung 29: Seitenansicht, Rückseite des L298

Das Sensorboard kann in dieser Ausführung online bestellt werden. Es ist bestückt mit dem Beschleunigungs- und Gyrosensor MPU6050 sowie einem Längsregler für die Spannungsversorgung plus diverser zusätzlicher Hardware.

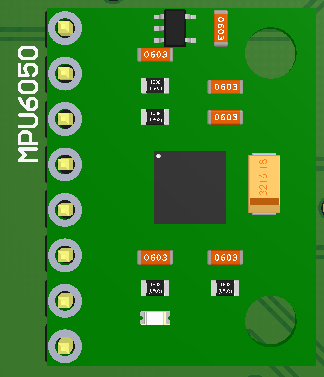


Abbildung 30: Sensorboard MPU-6050

Dieses Board kann so direkt auf den Print gesteckt werden. Dies erleichtert ein allfälliges Ersetzen des Sensors bei einem Defekt. Zusätzlich könnte später ein eigenes Sensorboard entwickelt werden mit zusätzlichen Features, welches dann das aktuelle ersetzt.

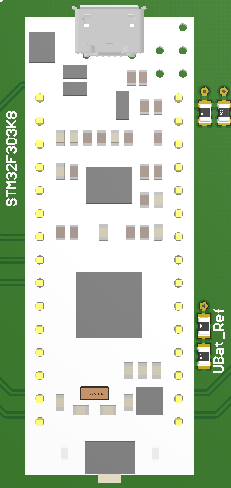


Abbildung 31: Mikrocontrollerboard STM32F303K8

Das Mikrocontrollerboard Nucleo STM32F303K8 ist ein Entwicklungsboard von STMicroelectronics. Es stellt alle nötigen Peripheriebauteile für das Verwenden eines Mikrocontrollers zur Verfügung.

Das Mikrocontrollerboard kann direkt auf den Print gesteckt werden. Dies erleichtert ein allfälliges Ersetzen des Mikrocontrollers bei einem Defekt.

## Akkumulatoren



Abbildung 32: Li-Ion Akkuzelle Typ 18650

Für die Energieversorgung der Elektronik werden handelsübliche Lithium-Ionen Akkuzellen verwendet.

Lithium-Ionen Akkuzellen, auch Li-Ion Akkus genannt, zeichnen sich durch eine sehr hohe spezifische Energiedichte aus, etwa 150 Wh/kg. Auch die Energiedichte von 400 Wh/l macht die Li-Ion Akkus interessant für mobile Anwendungsbereiche. (Wikipedia, 2019)

Nachteil: Die Akkuzellen sind anfällig auf Tiefenentladung sowie Überladung. Es ist also Elektronik notwendig sowohl für das Laden der Akkus, als auch für die Überwachung während des Betriebs.

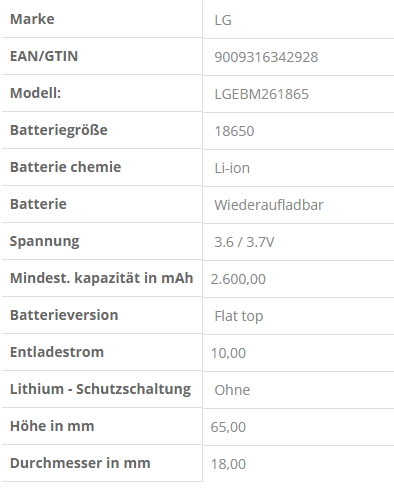


Abbildung 33: Angaben der bestellten Akkuzellen (NKON, 2019)

Die Li-Ion Akkus werden von der Firma NKON aus den Niederlanden geliefert. Der Hersteller garantiert einen maximalen konstanten Strom von 10A, was für die Anwendung völlig ausreichend ist. Obwohl LI-Ion Akkus theoretisch von 4.3V bis runter zu 2.5V schädigungsfrei betrieben werden könnten, empfiehlt der Hersteller eine Spannung von 3V nicht zu unterschreiten.

Ein Spannungsteiler auf der Leiterplatte teilt die Akkuspannung mit dem Verhältnis 1:4.3, sodass der Mikrocontroller per AD-Wandler die Spannung überwachen kann. Sollte die Spannung unter 3.2V pro Zelle sinken, deaktiviert die Software die Motoren, um den Energieverbrauch drastisch zu senken. Eine niedrige Akkuspannung wird mit einem 1Hz Blinken der Error LED signalisiert.

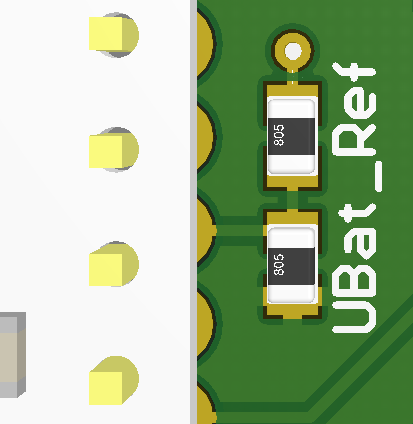


Abbildung 34: Spannungsteiler auf der Leiterplatte

Ingesamt werden 4 Akkuzellen in Serie geschaltet, das ergibt eine Versorgungsspannung zwischen 12V – 16.8V. Mit einer Mindestkapazität von 2600mAh ergibt folgende ungefähre Energie:

Bei einem geschätzten durchschnittlichen Verbrauch von 0.8A ergibt das eine Betriebsdauer von über 3h.

## Mechanik

Die Mechanik spielt eine entscheidende Rolle im Projekt. Der Roboter sollte möglichst leicht sein, damit das benötigte Drehmoment, um den Roboter wieder aufzurichten, möglichst klein bleibt. Ausserdem muss auf die Gewichtsverteilung geachtet werden, um den Schwerpunkt tief zu halten.

Für den ersten Prototyp habe ich eine Grundplatte gezeichnet, welche von einem Mechaniker angefertigt wurde. Auf der Unterseite wurden die Motoren befestigt. Die Oberseite ist bestückt mit den Akkuhaltern und den Distanzbolzen, um weiter oben die Leiterplatte zu montieren.

### Motor



Abbildung 35: MFA 950D501 (Conrad, 2019)

|  |  |
| --- | --- |
| **MFA 950D501** | |
| Lieferant | Conrad.ch |
| Preis | 25.95 CHF |
| Betriebsspannung | 9-15V |
| Gewicht | 156g |
| Wellen-Länge | 15mm |
| Wellen-Durchmesser | 6mm |
| Untersetzung | 50:1 |
| Maximale Effizienz | 61.85% |
| Leistungsabgabe maximale Effizienz (12V) | 6.21W |
| Stromaufnahme maximale Effizienz (12V) | 0.837A |
| Anfahrdrehmoment (12V) | 2.025Nm |
| Drehmoment bei maximaler Effizienz (12V) | 0.346Nm |
| Maximale Drehzahl (12V) | 252U/min |
| Drehzal bei maximaler Effizienz (12V) | 185.6U/min |

Zu Beginn des Projekts wurden zwei verschiedene Motoren ohne Übersetzung auf Conrad.ch bestellt. Doch nach weiteren mechanischen Berechnungen wurde klar, dass das Drehmoment der bestellten Motoren viel klein ist (ca. 0.1Nm). Deswegen wurde ein Motor mit mechanischer Übersetzung bestellt. Dieser besitzt ein Getriebe mit einer Untersetzung von 50:1. Dadurch wird das Drehmoment des Elektromotors mit dem Faktor 50 erhöht, respektive die Drehzahl um den Faktor 50 reduziert. Die mechanischen Verluste des Getriebes sind dabei vernachlässigbar. Der Motor arbeitet linear von 6V bis 15V. Das heisst bei 15V Spannung beträgt das Anfahrdrehmoment sogar 2.531Nm.

### Prototyp

Nachdem die Motoren bestellt waren, wurde zeitgleich zur Leiterplatte die Grundplatte aus Aluminium gezeichnet. Diese wurde dann von einem Mechaniker hergestellt. Nachdem die Leiterplatte bestückt wurde, konnte ein erster Prototyp zusammengebaut werden.

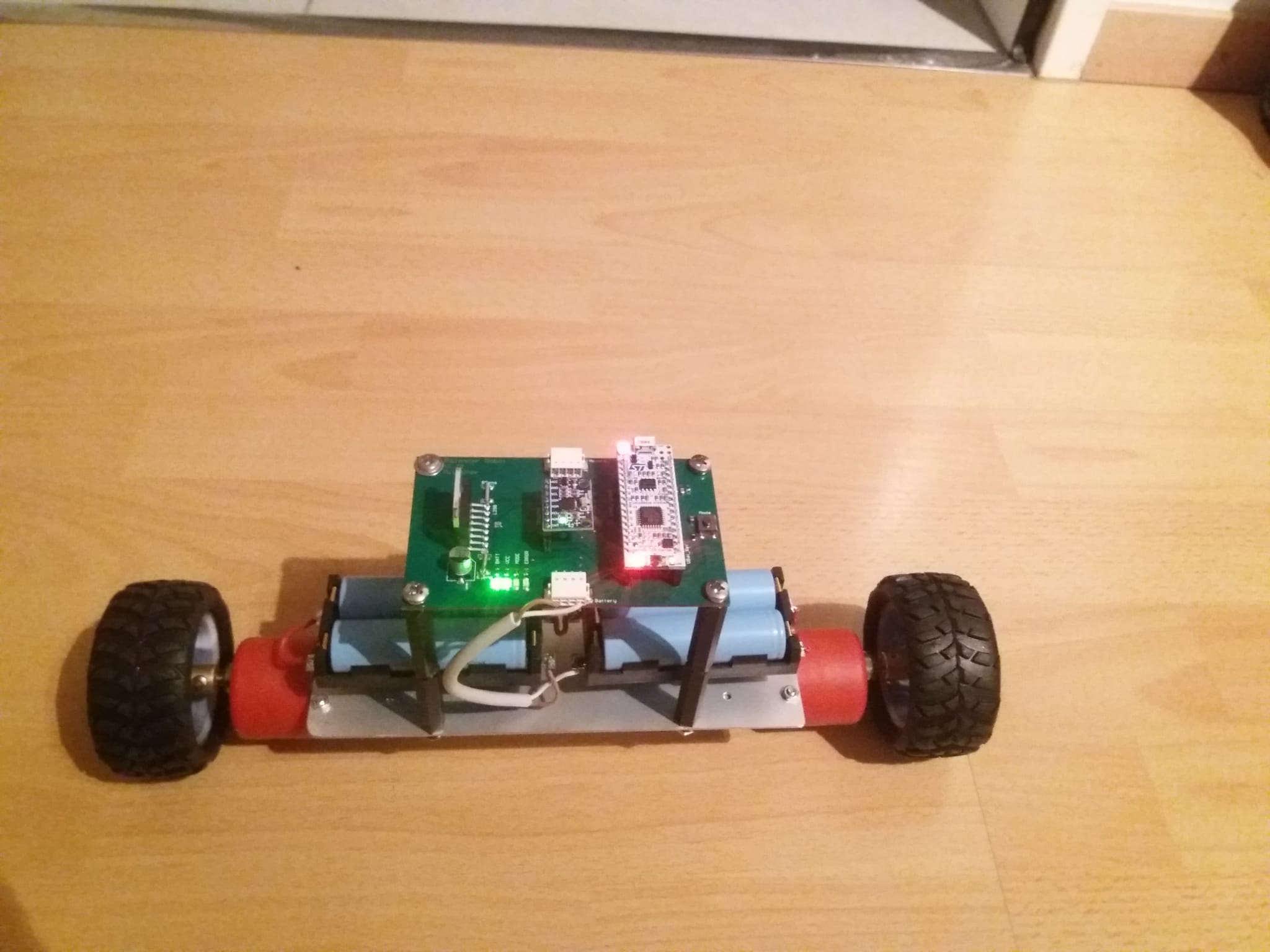


Abbildung 36: Erster Prototyp, Vogelperspektive



Abbildung 37: Erster Prototyp, Seitenansicht

### 3D-Modell

Der Prototyp besteht aus folgenden Komponenten:

1. Leiterplatte (aktuelle Version 1.01)
2. Distanzbolzen, Kunststoff M4 (aktuelle Länge 8mm)
3. 2x Akkuhalter für 4 Akkuzellen Typ 18650
4. Grundplatte, Aluminium
5. 2x Reifen, Durchmesser 70mm + Adapter für die Motorachse
6. 2x Bürstenmotor MFA 950D501

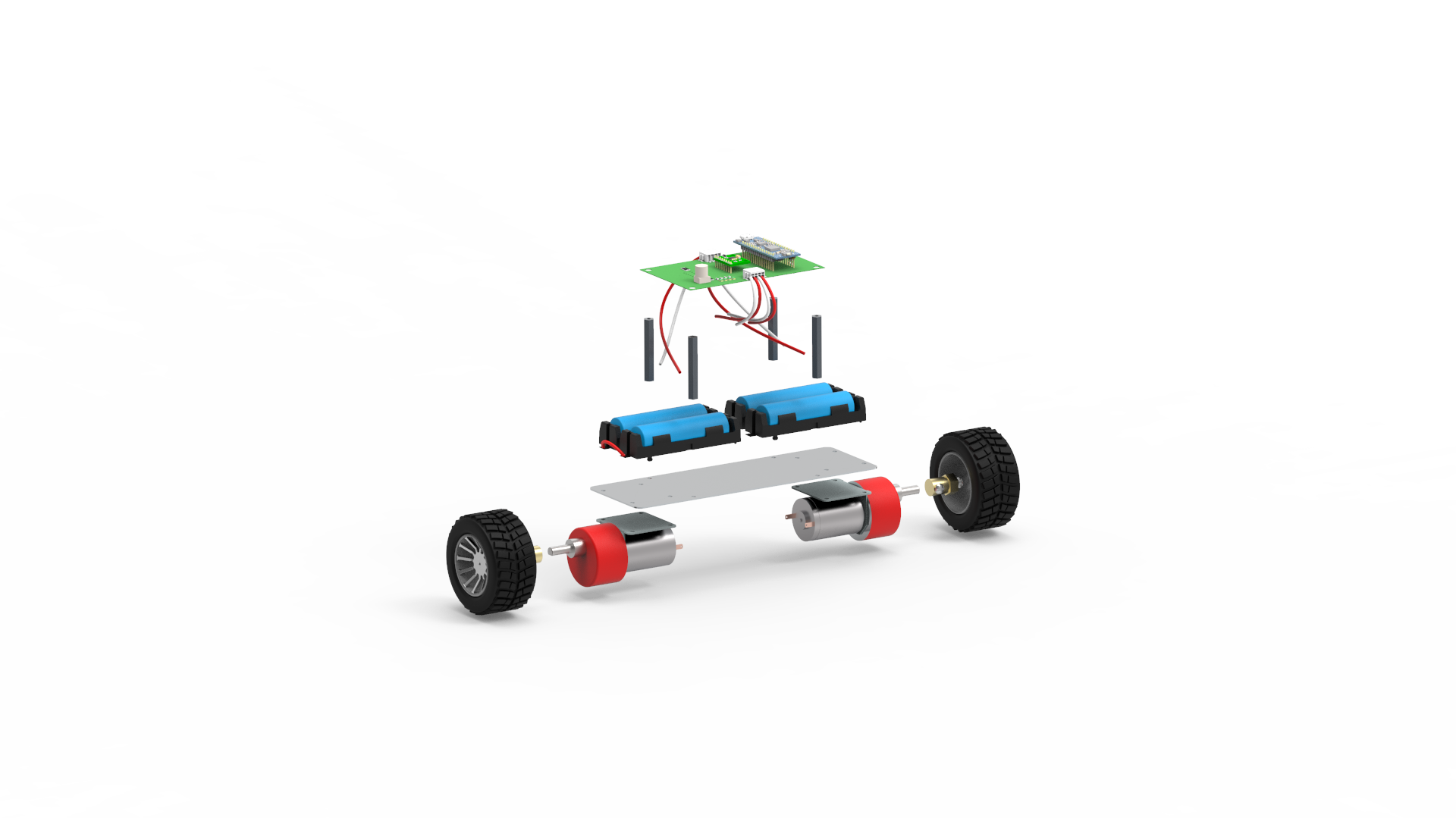


Abbildung 38: 3D-Modell Explosionszeichnung

## Software

### Architektur

MPU6050 Treiber

Daten Verarbeiter

Regler

Motor Treiber

L293D

MPU6050

Interrupt

Kommunikation

Sensordaten

Aufbereitete Daten

Stellgrösse

PWM

Blau: Sensoren

Grün: Mikrocontroller (Software)

Rot: Aktoren

Der MPU6050-Treiber konfiguriert den Sensor, sodass dieser mit einer Frequenz von 100Hz die 3-Achsen des Gyrosensores, sowie die 3-Achsen des Accelerometers misst. Über einen Interrupt Pin wird dem Mikrocontroller signalisiert, dass die Daten bereitstehen. Der Mikrocontroller liest dann sofort die Daten aus.

Die Sensordaten werden dem Datenverarbeiter übergeben. Dieser berechnet den dynamischen Mittelwert der Daten, um diese zu Glätten und Störungen herauszufiltern.

Die aufbereiteten Daten werden dem Regler übergeben. Dieser errechnet mithilfe des Regelalgorithmus die Stellgrösse für die Motoren.

Die Stellgrösse wird dem Motortreiber übergeben. Aufgrund der Stellgrösse steuert der Motor Treiber die Motoren per PWM Signal an.

## Regelungsalgorithmus

### Allgemein

Die Regelungstechnik bildet einen grossen Teil des Projekts. Im Grundprinzip funktioniert jede Regelungsschaltung, ob digital oder analog, auf dem gleichem Grundprinzip. Die Differenz Xd zwischen der Führungsgrösse, also dem gewollten Sollwert und der Rückführgrösse, also die gemessene tatsächliche Grösse, wird einem Regler übergeben. Dieser errechnet die Stellgrösse für den Aktor, welcher in die Regelstrecke eingreift. Ein Sensor misst die Regelstrecke aus. Über die Messeinrichtung wird die Rückführungsgrösse erzeugt und rückgekoppelt.

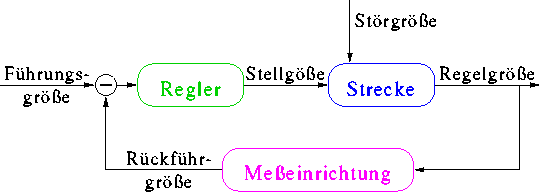


Abbildung 39: (Heuler, 2019)

Konkret auf den Balancer Robot angewendet lässt sich die Regelstrecke folgendermassen beschreiben: Abhängig von der errechneten Stellgrösse wird die Spannung über den Motoren reguliert. Durch äussere Störgrössen, wie z.B. die Erdanziehungskraft, kippt der Roboter in eine Richtung. Der Sensor detektiert die Veränderung des Winkels und somit die Abweichung vom Sollwert. Der Regler berechnet eine neue Stellgrösse um den falschen Winkel wieder zu korrigieren.

### PID-Regler

PID-Regler sind weit verbreitet in der Regelungstechnik. Sie lassen sich in folgende drei Grundanteile einteilen:

#### Proportional-Anteil

Der P-Anteil gibt proportional zur Regeldifferenz Xd eine Ausgangswert Y aus. P-Regler reagieren sofort auf Änderungen, können dafür die Regeldifferenz xd nicht vollständig ausregeln. KP definiert den P-Anteil der gesamten Regelung.

#### Integral-Anteil

Der I-Anteil integriert die Regeldifferenzen auf. Dadurch steigt bei einer konstanten Abweichung zwischen xd und dem Sollwert der Ausgang so lange an, bis die Differenz ausgeregelt wurde. KI definiert den I-Anteil der gesamten Regelung.

#### Differenzial-Anteil

Der D-Anteil differenziert die Regeldifferenzen. Dadurch reagiert der D-Anteil auf schnelle Änderungen der Regeldifferenz xd. Der D-Anteil alleine kann eine Regeldifferenz nicht ausregeln, wird jedoch verwendet, wenn schnelle Reaktionen auf Störsignale und Regeldifferenzabweichungen nötig sind. KD definiert den D-Anteil der gesamten Regelung.

Kombiniert sieht die Formel für den PID-Regler folgendermassen aus:

Die drei Regelanteile KP, KI und KD müssen abhängig der Anforderungen evaluiert werden. Eine grundsätzliche Faustregel besagt, dass der P-Anteil etwa 90% der Regelung übernimmt, der I-Anteil die bleibende Regeldifferenz sowie konstante Abweichungen mit der Zeit korrigiert werden. Der D-Anteil sollte so ausgelegt werden, dass Störungen und schnelle Abweichungen vom Sollwert abgefangen werden.

### Umsetzung

In den ersten Versuchen wurde ein simpler P-Regler implementiert. Es wurde nicht ein tatsächlicher Winkel verwendet, sondern direkt die beschleunigende Kraft auf der Y-Achse. Denn die Kraft auf der Y-Achse ist direkt proportional zum nötigen Drehmoment für das Aufrichten.

#### Erster Versuch

Der Balancer Robot zitterte unaufhörlich und konnte sich selber nicht stabilisieren. Nach diversen Spielereien und Tests an den Regelparametern und der Sensordatenverarbeitung wurde dann folgender Denkfehler klar: Die Regelung der Motoren funktionierte gut, wenn dieser von Hand gekippt wird, doch wenn das Fahrzeug sich selbst aufrichtet, entstehen beschleunigende Kräfte, die jener der Y-Achse gegengerichtet sind. Der Balancer Robot möchte also ständig den Winkel korrigieren, beeinflusst aber direkt den Messwert durch die Korrektur, was eine Richtungsänderung zur Folge hat.

#### Korrektur der Beschleunigungskräfte

Da kommt der Gyrosensor ins Spiel. Die Messwerte des Beschleunigungssensors müssen korrigiert werden, damit der Winkel trotz der wirkenden Kräfte beim Aufrichten korrigiert werden kann.

Durch die Rotationsgeschwindigkeit, gegeben durch den Gyrosensor, und dem Radius zur Motorachse kann die Bahngeschwindigkeit des Sensors bestimmt werden.

Aus der Geschwindigkeitsänderung pro Zeit kann dann die verursachte Beschleunigung errechnet werden.

Subtrahiert man die durch die Aufrichtung entstehende Beschleunigung der Y-Achse, dann bleibt nur noch die Kraft der Erdbeschleunigung übrig.

#### Zweiter Versuch mit korrigiertem Messwert

Nachdem die Korrektur der Messwerte vorgenommen wurde, war eine klare Verbesserung zu sehen. Der Balancer Robot zitterte nicht mehr wie wild umher, sondern versuchte sich tatsächlich entgegen der Kipprichtung aufzurichten. Jedoch klappte das Ausbalancieren noch nicht, da der Roboter nach kurzer Zeit entweder durch ständiges Hin- und Herschwingen umfiel, oder aber bei Anpassungen des Proportionalfaktors zu schwach oder zu spät eingriff.

#### PID-Regler

Etwas Zeit war noch übrig, sodass ein PID-Regler programmiert wurde. Es wurden mehrere Versuche mit verschiedenen Werten der P-, I- und D-Anteile getestet. Doch das Ausbalancieren funktionierte auch mit dann nicht. Vielleicht wäre ein Ausbalancieren mit perfekt abgestimmten Regelanteilen möglich, jedoch fehlte die Zeit und auch das Know-how, um weitere Versuche gezielt durchführen zu können.

# Schluss

Leider ist der Balancer Robot nach aktuellen Stand (21.11.2019) noch nicht fähig, sich selbst auszubalancieren. Die Elektronik läuft, die Mechanik ist auch fertig, sodass ein erster Prototyp gebaut werden konnte. Auch die Software ermöglicht das Konfigurieren des Sensors, die Ansteuerung der Motoren und auch die Überwachung der Akkuspannung. Mithilfe des Tasters auf der Leiterplatte können der Roboter zwischen dem Balancier Modus und dem Standby Modus wechseln.

Die Nachforschungen zeigten auf, dass mithilfe eines Beschleunigungs- und Gyrosensor der Neigungswinkel des Fahrzeugs bestimmt werden kann. Auch wurde nachgewiesen, wie wichtig das saubere Aufbereiten der Daten ist. Mir wurde folgendes bewusst: „Kann man ein System nicht korrekt messen, lässt es sich auch nicht Steuern, beziehungsweise Regeln.“

Die grössten Erkenntnisse wurden überraschenderweise beim Ansteuern der Motoren verursacht. Obwohl für die Ansteuerung der Motoren nicht viel Aufwand eingeplant wurde, brachten diese mit am meisten Schwierigkeiten. Es wurde deutlich, dass bei DC-Bürstenmotoren sehr hoher Anfahrtsstrom benötigt wird. Dadurch musste der Motortreiber gewechselt werden. Auch wurde mir bewusst, dass sich das Drehmoment der Motoren proportional zum Strom verhält. Dies führt auch direkt zum ersten Optimierungsvorschlag: Der Mikrocontroller sollte den Strom der Motoren regulieren können und nicht wie aktuell umgesetzt die Spannung über den Motoren. Dies würde eine zweite Regelung beanspruchen, entweder per Software oder Hardware. So eine Regelung nennt man auch Drehmomentregler. Die neuste Version der Leiterplatte (V1.01) ermöglicht dem Mikrocontroller das messen der Motorströme. Jedoch muss die Software mit der dazugehörigen Regelung noch implementiert werden.

Zweiter Verbesserungspunkt wäre die Motorenauswahl. Anstelle von DC-Bürstenmotor würde ich bei nächsten Mal auf bürstenlose Motoren wechseln. Diese zahlen sich durch einen besseren Wirkungsgrad und weniger Spiel der Motorachsen aus. Bei Bürstenmotoren müssen die internen Bürsten für die Kontaktierung jedes Mal die Richtung wechseln, wenn der Motor die Drehrichtung ändert. Dies resultiert in einer grösseren Verzögerungszeit beim Richtungswechsel, sowie einer geringeren Lebensdauer der Motoren durch die mechanische Belastung der Bürsten. Jedoch sind bürstenlose Motoren komplizierter zum Ansteuern, was eine grosse Änderung der Hardware in Anspruch nehmen würde.

Sehr zufrieden bin ich mit der Software des Balancer Robots. Diese nahm auch sehr viel Zeit in Anspruch, ist dafür voll funktionstüchtig und professionell umgesetzt. Alle gewünschten Features, wie z.B. die LED-Anzeige, das Messen der Akkuspannung, das Steuern der Motoren, das Kommunizieren mit dem Sensor etc. konnten umgesetzt werden.

Interessant war auch das Ausprobieren des P-Regler und PID-Regler Prinzip für den Regelungsalgorithmus. Leider reichte dies nicht für ein vollständiges Ausbalancieren. Ein Elektroingenieur mit Masterabschluss in Regelungstechnik riet mir das einsetzten eines Zustandregelers. Doch die Theorie dahinter wird erst auf dem Niveau eines Masters an der Fachhochschule behandelt, übersteigt also meine Fähigkeiten.

Um meine Leitfrage zu beantworten: Ja es ist definitiv möglich, mithilfe eines Beschleunigungs- und Gyrosensors ein Fahrzeug auf zwei Rädern auszubalancieren. Die Ergebnisse der verschieden Versuche und Experimente zeigen deutlich auf, dass der Winkel des Fahrzeugs bestimmt werden und die Motoren reguliert werden können. Mit einem geeigneten Regelungsalgorithmus müsste ein Ausbalancieren also möglich sein.

# Quellenverzeichnis

Conrad: MFA 950D501 Getriebemotor

https://www.conrad.ch/de/p/mfa-950d501-getriebemotor-12-v-dc-50-1-222373.html

[Stand: 11.09.2019]

[Abrufdatum: 11.09.2019]

Heuler: Regelungstechnik

http://www.heuler.net/stud/pendel/html\_netz/node9.html

[Stand: 07.01.1997]

[Abrufdatum: 23.10.2019]

Mikrocontroller.net: Pulsweitenmodulation.

<https://www.mikrocontroller.net/articles/Pulsweitenmodulation>

[Stand: 30.09.2019]

[Abrufdatum: 30.09.2019]

NKON: Lithium-Ionen Akku

https://www.nkon.nl

[Stand: 25.10.2019]

[Abrufdatum: 25.10.2019]

Texas Instruments: L293D

http://www.ti.com/product/L293D

[Stand: 24.10.2019]

[Abrufdatum: 24.10.2019]

Texas Instruments: L293D PDF

http://www.ti.com/lit/ds/symlink/l293d.pdf

[Stand: Januar 2016]

[Abrufdatum: 30.09.2019]

Wikipedia: Gleitender Mittelwert

https://de.wikipedia.org/wiki/Gleitender\_Mittelwert

[Stand: 24.10.2019]

[Abrufdatum: 24.10.2019]

Wikipedia: Lithium-Ionen-Akkumulator

https://de.wikipedia.org/wiki/Lithium-Ionen-Akkumulator

[Stand: 14.11.2019]

[Abrufdatum: 14.11.2019]

Wikipedia: *Vierquadrantensteller*

https://de.wikipedia.org/wiki/Vierquadrantensteller

[Stand: 10.06.2017]

[Abrufdatum: 30.09.2019]

ST Microelectronics: L298 Datenblatt

PDF-Datei

[Abrufdatum: 24.10.2019]

InvenSense: MPU-6050 Datenblatt.

PDF-Datei

[Abrufdatum: 20.09.2019]

# Abbildungsverzeichnis

[Abbildung 1: Sensorboard MPU-6050 8](file:///C:\Users\Markus.Lacher\Desktop\BalancerRobot\Documentation\BMA-BalancerRobot.docx#_Toc25447793)

[Abbildung 2: Achsenansicht von oben 8](file:///C:\Users\Markus.Lacher\Desktop\BalancerRobot\Documentation\BMA-BalancerRobot.docx#_Toc25447794)

[Abbildung 3: Kraftvektoren beim Kippen 8](file:///C:\Users\Markus.Lacher\Desktop\BalancerRobot\Documentation\BMA-BalancerRobot.docx#_Toc25447795)

[Abbildung 4: Kräftedreieck für Winkelberechnung 8](file:///C:\Users\Markus.Lacher\Desktop\BalancerRobot\Documentation\BMA-BalancerRobot.docx#_Toc25447796)

[Abbildung 5:Blockschema MPU-6050 (InvenSense, 2019) 9](file:///C:\Users\Markus.Lacher\Desktop\BalancerRobot\Documentation\BMA-BalancerRobot.docx#_Toc25447797)

[Abbildung 6: Gleitender Mittelwert (Wikipedia, 2019) 9](file:///C:\Users\Markus.Lacher\Desktop\BalancerRobot\Documentation\BMA-BalancerRobot.docx#_Toc25447798)

[Abbildung 7: Messung des Acceleromters 10](file:///C:\Users\Markus.Lacher\Desktop\BalancerRobot\Documentation\BMA-BalancerRobot.docx#_Toc25447799)

[Abbildung 8: Messung mit gleitendem Mittelwert 10](file:///C:\Users\Markus.Lacher\Desktop\BalancerRobot\Documentation\BMA-BalancerRobot.docx#_Toc25447800)

[Abbildung 9: Messwerte der Z-Achse im freien Fall 11](file:///C:\Users\Markus.Lacher\Desktop\BalancerRobot\Documentation\BMA-BalancerRobot.docx#_Toc25447801)

[Abbildung 10: Messwerte X-Achse Accelerometer 11](file:///C:\Users\Markus.Lacher\Desktop\BalancerRobot\Documentation\BMA-BalancerRobot.docx#_Toc25447802)

[Abbildung 11: Messwerte der Y-Achse Gyroskop 11](file:///C:\Users\Markus.Lacher\Desktop\BalancerRobot\Documentation\BMA-BalancerRobot.docx#_Toc25447803)

[Abbildung 12: (Wikipedia, 2019) 12](file:///C:\Users\Markus.Lacher\Desktop\BalancerRobot\Documentation\BMA-BalancerRobot.docx#_Toc25447804)

[Abbildung 13: (Texas Instruments, 2019) 12](file:///C:\Users\Markus.Lacher\Desktop\BalancerRobot\Documentation\BMA-BalancerRobot.docx#_Toc25447805)

[Abbildung 14: (Mikrocontroller.net, 2019) 13](file:///C:\Users\Markus.Lacher\Desktop\BalancerRobot\Documentation\BMA-BalancerRobot.docx#_Toc25447806)

[Abbildung 15: Messaufbau 14](file:///C:\Users\Markus.Lacher\Desktop\BalancerRobot\Documentation\BMA-BalancerRobot.docx#_Toc25447807)

[Abbildung 16: Messung 1, Start des Motors 14](file:///C:\Users\Markus.Lacher\Desktop\BalancerRobot\Documentation\BMA-BalancerRobot.docx#_Toc25447808)

[Abbildung 17: Messung des Stroms bei Anfahren mit PWM 15](file:///C:\Users\Markus.Lacher\Desktop\BalancerRobot\Documentation\BMA-BalancerRobot.docx#_Toc25447809)

[Abbildung 18: Messung des Stroms bei PWM 60% 15](file:///C:\Users\Markus.Lacher\Desktop\BalancerRobot\Documentation\BMA-BalancerRobot.docx#_Toc25447810)

[Abbildung 19: Block Diagramm aus L298 Datenblatt (ST Microelectronics, 2019). Die roten Kreise markieren die beiden Anschlüsse für das Messen des Stromes 16](file:///C:\Users\Markus.Lacher\Desktop\BalancerRobot\Documentation\BMA-BalancerRobot.docx#_Toc25447811)

[Abbildung 20: Leiterplatte „Motor Driver V1.00“ 17](file:///C:\Users\Markus.Lacher\Desktop\BalancerRobot\Documentation\BMA-BalancerRobot.docx#_Toc25447812)

[Abbildung 21: Leiterplatte „Controller Board V1.00“ 17](file:///C:\Users\Markus.Lacher\Desktop\BalancerRobot\Documentation\BMA-BalancerRobot.docx#_Toc25447813)

[Abbildung 22: Leiterplatte "Balancer Robot V1.00" 17](file:///C:\Users\Markus.Lacher\Desktop\BalancerRobot\Documentation\BMA-BalancerRobot.docx#_Toc25447814)

[Abbildung 23: Mode-Taster 18](file:///C:\Users\Markus.Lacher\Desktop\BalancerRobot\Documentation\BMA-BalancerRobot.docx#_Toc25447815)

[Abbildung 24: Leiterplatte "Balancer Robot V1.01" 18](file:///C:\Users\Markus.Lacher\Desktop\BalancerRobot\Documentation\BMA-BalancerRobot.docx#_Toc25447816)

[Abbildung 25: LED-Anzeige 18](file:///C:\Users\Markus.Lacher\Desktop\BalancerRobot\Documentation\BMA-BalancerRobot.docx#_Toc25447817)

[Abbildung 26: Akku-Stecker 19](file:///C:\Users\Markus.Lacher\Desktop\BalancerRobot\Documentation\BMA-BalancerRobot.docx#_Toc25447818)

[Abbildung 27: Motor-Stecker 19](file:///C:\Users\Markus.Lacher\Desktop\BalancerRobot\Documentation\BMA-BalancerRobot.docx#_Toc25447819)

[Abbildung 28: L298 Motor Treiber 19](file:///C:\Users\Markus.Lacher\Desktop\BalancerRobot\Documentation\BMA-BalancerRobot.docx#_Toc25447820)

[Abbildung 29: Seitenansicht, Rückseite des L298 19](file:///C:\Users\Markus.Lacher\Desktop\BalancerRobot\Documentation\BMA-BalancerRobot.docx#_Toc25447821)

[Abbildung 30: Sensorboard MPU-6050 20](file:///C:\Users\Markus.Lacher\Desktop\BalancerRobot\Documentation\BMA-BalancerRobot.docx#_Toc25447822)

[Abbildung 31: Mikrocontrollerboard STM32F303K8 20](file:///C:\Users\Markus.Lacher\Desktop\BalancerRobot\Documentation\BMA-BalancerRobot.docx#_Toc25447823)

[Abbildung 32: Li-Ion Akkuzelle Typ 18650 21](file:///C:\Users\Markus.Lacher\Desktop\BalancerRobot\Documentation\BMA-BalancerRobot.docx#_Toc25447824)

[Abbildung 33: Angaben der bestellten Akkuzellen (NKON, 2019) 21](file:///C:\Users\Markus.Lacher\Desktop\BalancerRobot\Documentation\BMA-BalancerRobot.docx#_Toc25447825)

[Abbildung 34: Spannungsteiler auf der Leiterplatte 21](file:///C:\Users\Markus.Lacher\Desktop\BalancerRobot\Documentation\BMA-BalancerRobot.docx#_Toc25447826)

[Abbildung 35: MFA 950D501 (Conrad, 2019) 22](file:///C:\Users\Markus.Lacher\Desktop\BalancerRobot\Documentation\BMA-BalancerRobot.docx#_Toc25447827)

[Abbildung 36: Erster Prototyp, Vogelperspektive 23](file:///C:\Users\Markus.Lacher\Desktop\BalancerRobot\Documentation\BMA-BalancerRobot.docx#_Toc25447828)

[Abbildung 37: Erster Prototyp, Seitenansicht 23](file:///C:\Users\Markus.Lacher\Desktop\BalancerRobot\Documentation\BMA-BalancerRobot.docx#_Toc25447829)

[Abbildung 38: 3D-Modell Explosionszeichnung 24](file:///C:\Users\Markus.Lacher\Desktop\BalancerRobot\Documentation\BMA-BalancerRobot.docx#_Toc25447830)

[Abbildung 39: (Heuler, 2019) 26](file:///C:\Users\Markus.Lacher\Desktop\BalancerRobot\Documentation\BMA-BalancerRobot.docx#_Toc25447831)

# Dank

Ich möchte Dank aussprechen an nachfolgende Personen:

**Enrico Malancarne**

Mein Elektrotechniklehrer unterstütze mich tatkräftig in der Informationsbeschaffung über Regelungstechnik. Er war meine erste Anlaufstelle, wenn Probleme in der Elektronik auftauchten, oder wenn ich Tipps brauchte für das Entwickeln des Fahrzeugs.

**Hanspeter Lutz**

Durch Herrn Lutz als Betreuer erfuhr ich Unterstützung, wenn es das Verstehen der Physik des Fahrzeugs ging. Er betreute meine Klasse während der Berufsmaturitätsarbeit und gab uns einen lockeren, dennoch guten Leitfaden für das Bewältigen der BMA.

**Werner Wahl**

Zeitgleich zur BMA wurde ich im Geschäft im Programmieren von Embedded Software geschult. Auch wenn ich bereits vorher einige Erfahrungen im Bereich der Mikrocontrollertechnik gemacht hatte, wäre die Software des Balancer Robots nie so professionell geworden, hätte Werner mich geschult und gefördert.

**Christian Walser**

Ohne die Einwilligung meines Lehrmeisters Christian hätte ich das ganze Projekt von Zuhause aus und auf eigene Kosten entwickeln müssen. Doch durch seine Grosszügigkeit konnte ich das Equipment der Firma für diverse Testversuche nutzen. Auch durfte ich viele Komponenten des Prototyps auf Kosten der Firma bestellen.

**Aaron Schweiler**

Meinem Lehrlingskollegen Aaron möchte ich danken für das Erstellen der 3D-Modelle und der Explosionszeichnung für die Dokumentation.

**Erwin Lacher**

Zuletzt möchte ich meinem Vater für das korrigieren der BMA danken.

# Anhang

## Schema

Balancer Robot.PDF

## Software

### Balancer Robot

main.h

main.c

system.c

system.h

MPU6050.h

MPU6050.c

Motors.h

Motors.c

GPIO.h

GPIO.c

I2C.h

I2C.c

LED.h

LED.c

Battery.h

Battery.c

Button.h

Button.c

Controller.h

Controller.c

DataProcessor.h

DataProcessor.c

TimingHandler.h

TimingHandler.c

ErrorHandler.h

ErrorHandler.c

### Python Programm

UART Reader