Lacher, Markus

markuslacher@hotmail.ch

Exposee

…..

Balancer Robot

Berufsmaturitätsarbeit



Abstract

Inhalt

[Abstract 1](#_Toc24637866)

[Einleitung 3](#_Toc24637867)

[Fragestellung 3](#_Toc24637868)

[Hauptteil 4](#_Toc24637869)

[Konzept 4](#_Toc24637870)

[Physikalisches Grundprinzip 4](#_Toc24637871)

[Software 5](#_Toc24637872)

[Sensorik 6](#_Toc24637873)

[Rotation 6](#_Toc24637874)

[Beschleunigung 6](#_Toc24637875)

[Konfiguration 6](#_Toc24637876)

[Datenverarbeitung 7](#_Toc24637877)

[Sensor Auswertung 8](#_Toc24637878)

[Aktoren 10](#_Toc24637879)

[Ansteuerung Motor 10](#_Toc24637880)

[PWM 11](#_Toc24637881)

[Motor Stromaufnahme 12](#_Toc24637882)

[L298 als neuer Motortreiber 14](#_Toc24637883)

[Mechanik 14](#_Toc24637884)

[Layout 15](#_Toc24637885)

[Akkumulatoren 19](#_Toc24637886)

[Software 20](#_Toc24637887)

[Regelungsalgorithmus 20](#_Toc24637888)

[Schluss 21](#_Toc24637889)

[Glossar 21](#_Toc24637890)

[Quellenverzeichnis 22](#_Toc24637891)

[Abbildungsverzeichnis 23](#_Toc24637892)

[Dank 24](#_Toc24637893)

[Anhang 24](#_Toc24637894)

# Einleitung

## Fragestellung

Wie funktioniert das Stabilisieren eines Segways? Wie schaffen es Drohnen sich ruhig in der Luft auszubalancieren? Die Antwort darauf ist Regelungstechnik.

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 sosehr, dass ich selber ein Fahrzeug bauen wollte, welches sich ausbalanciert.

Grosse Teile dieses Projekts beinhalteten das Entwickeln einer Elektronik, welche die Sensorik und die Ansteuerung der Motoren zur Verfügung stellt, damit eine Regelungssoftware das Ausbalancieren des Fahrzeugs bewältigen kann.

# 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.

Der Balancer Robot 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 auf die Kippachse und ist für die Verschiebung des Fahrzeugs beim Umfallen verantwortlich.

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

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

FG

MM

MRad

FM

FK

Um das nicht umzufallen, muss das Fahrzeug vorwärts fahren. Der Motor erzeugt das Drehmoment MRad, das Rad beginnt sich im Uhrzeigersinn zu drehen. Newtons drittes Gesetzt besagt „Kraft gleich 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 Rads durch dessen Radius, erhält man die Kraft FD, welche das Fahrzeug relativ zum Boden beschleunigt.

MM

MRad

FD

r

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

## Sensorik

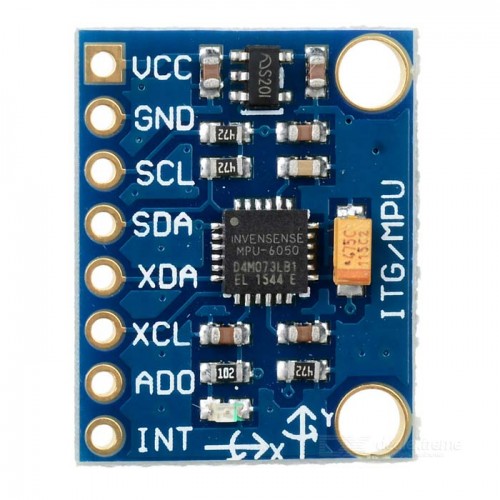


Abbildung 1: Sensorboard MPU-6050

Die rechts abgebildete Sensorleiterplatte ist mit dem MPU-6050, ein sehr verbreiteter 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 oben abgebildet, 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

**Z**

**g**

**X**

**α**

Abbildung 4: Kräftedreieck für Winkelberechnung

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

### Konfiguration

Der Sensor wird so konfiguriert, dass er mit einer Frequenz von 1000Hz 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.

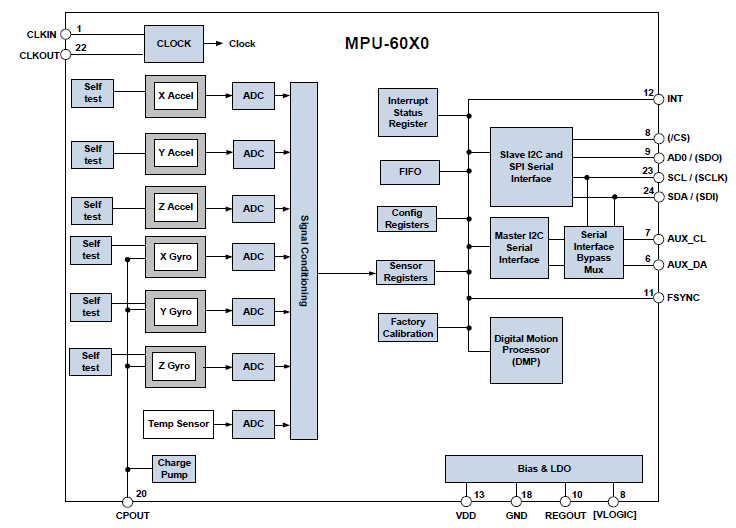


Abbildung 5:Blockschema MPU-6050 (InvenSense, 2019)

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

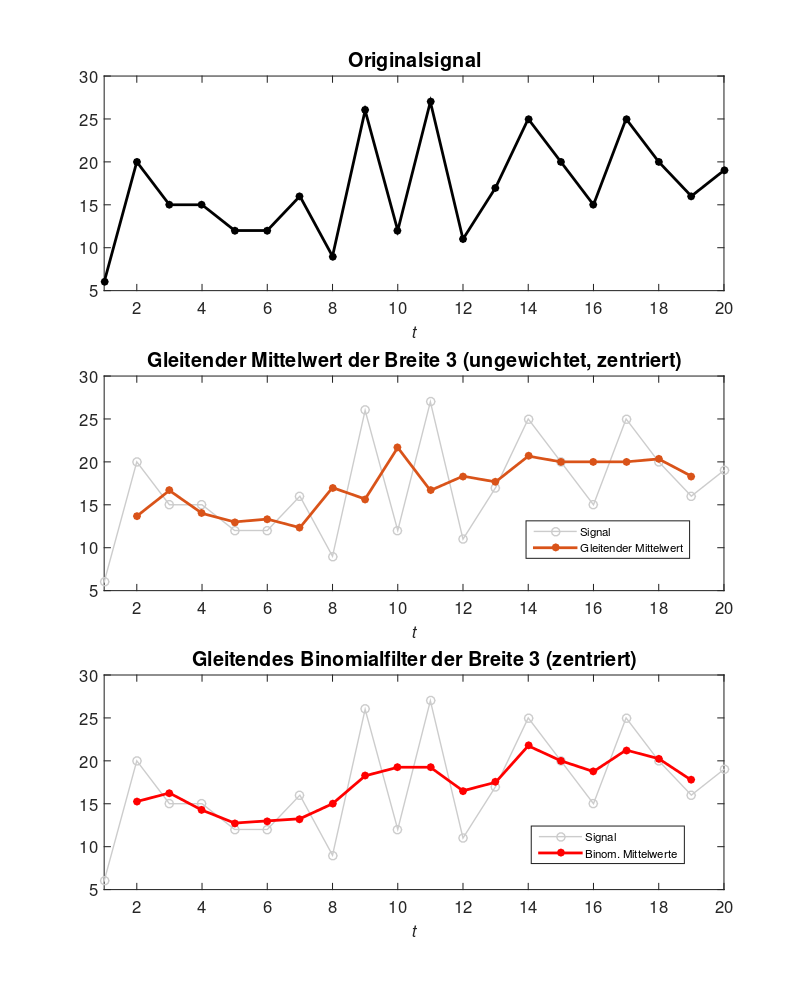


Abbildung 6: Gleitender Mittelwert (Wikipedia, 2019)

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.

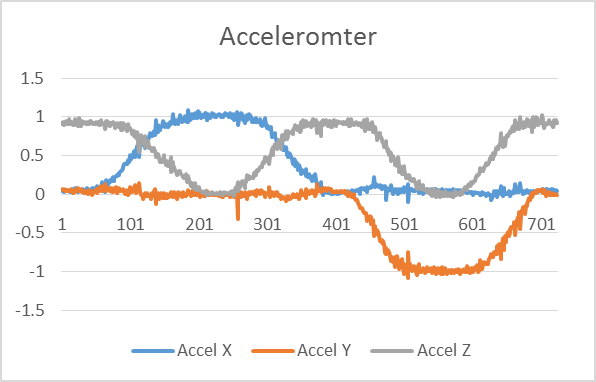


Abbildung 7: Messung des Acceleromters

#### Kippen von Hand

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

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

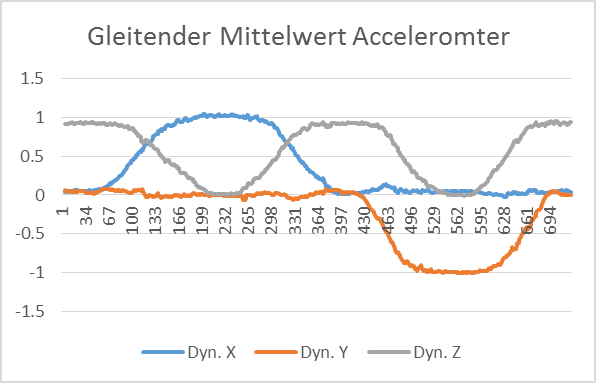


Abbildung 8: Messung mit gleitendem Mittelwert

#### 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

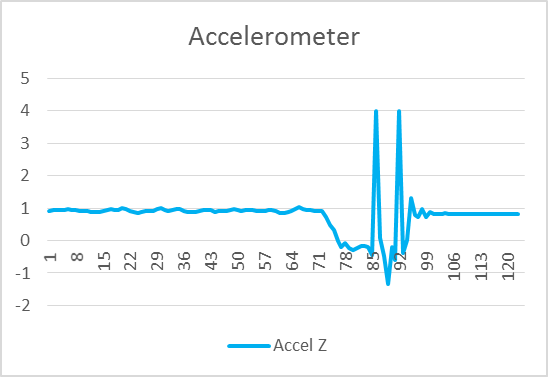


Abbildung 9: Messwerte der Z-Achse im freien Fall

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

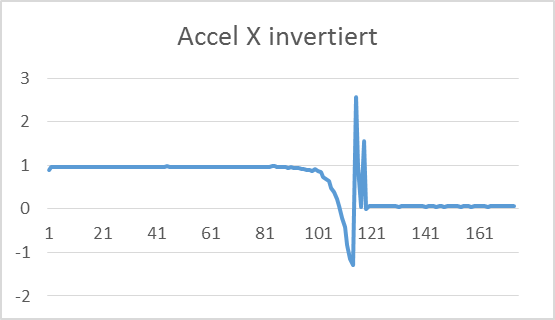


Abbildung 10: Messwerte X-Achse Accelerometer

Um zu testen ob die Kräfte beim Umfallen im Gegensatz zum freien Fall messbar sind, wurde der Sensor auf ein 30cm 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 umzufallen.

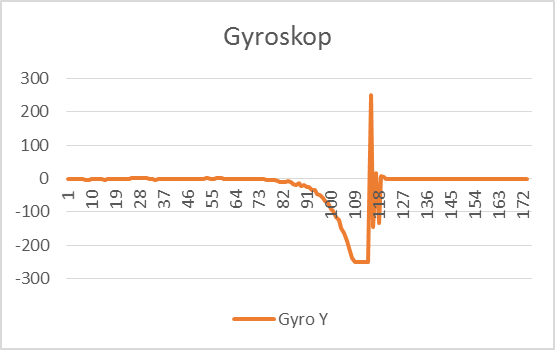


Abbildung 11: Messwerte der Y-Achse Gyroskop

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 der Beschleunigungssensor die Kurve beim Beschleunigungssensor nicht bei 0G stoppt, da dies ja einem Winkel von 90° 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 eine positive Spannung an.

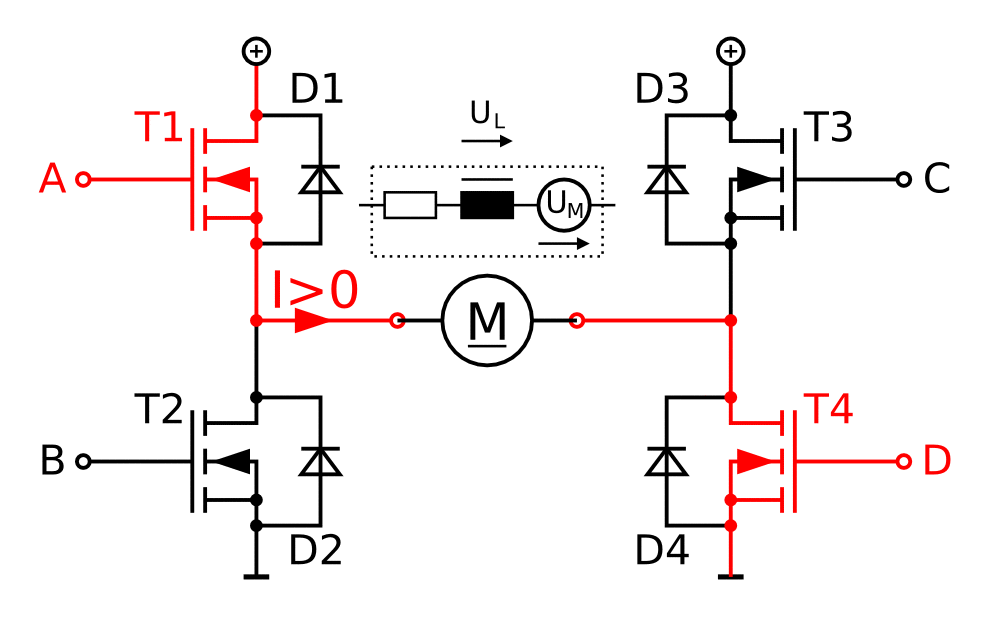


Abbildung 12: (Wikipedia, 2019)

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, müsste 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.

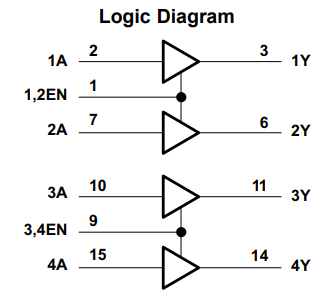


Abbildung 13: (Texas Instruments, 2019)

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.

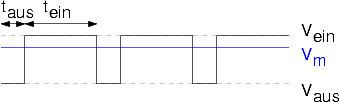


Abbildung 14: (Mikrocontroller.net, 2019)

### 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 in 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.

Parameter:

U0: 15V

RMess 2Ω

RMotor 3Ω



Abbildung 15: Messaufbau

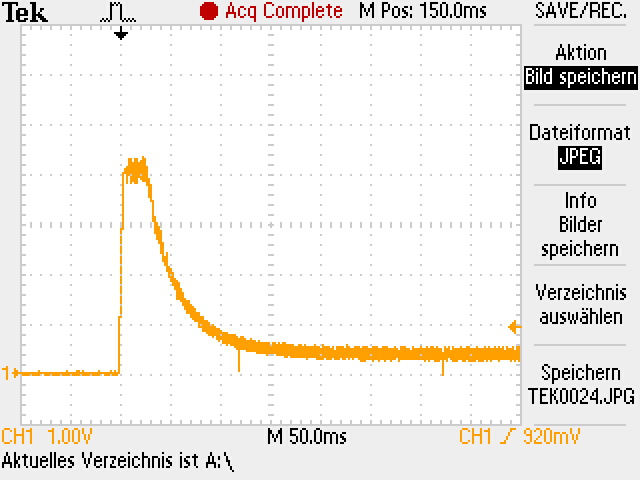


Abbildung 16: Messung 1, Start des Motors

##### 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 zu Verminderung der Spulenspannung über dem Motor, da über dem Messwidertand 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 Ampere. 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 Ampere. 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.

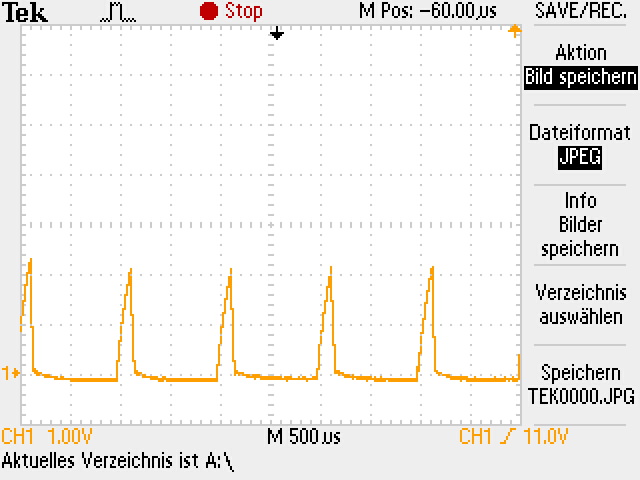


Abbildung 17: Messung des Stroms bei Anfahren mit PWM

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

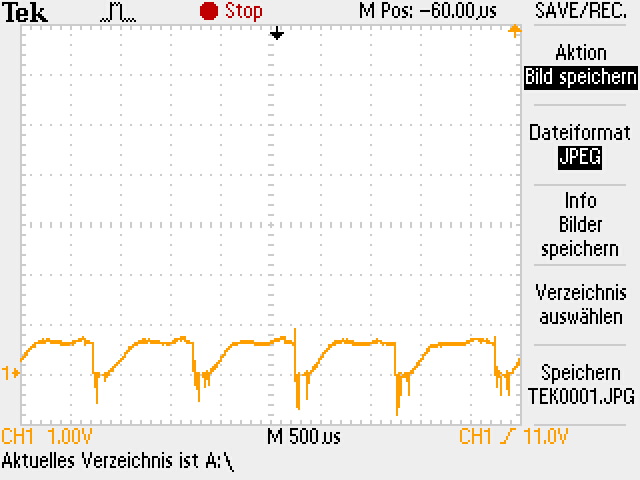


Abbildung 18: Messung des Stroms bei PWM 60%

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 Emitter Anschlüsse 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.

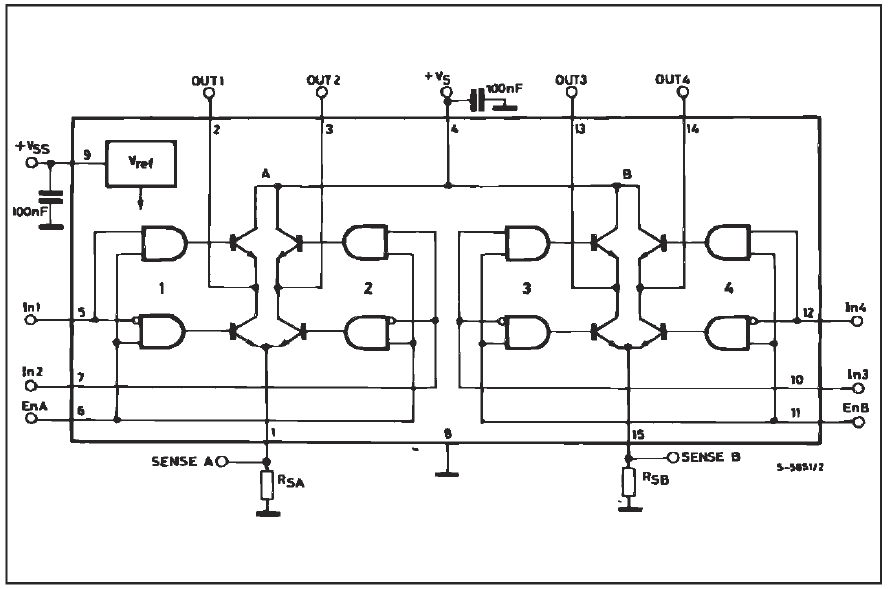


Abbildung 19: Block Diagramm aus L298 Datenblatt (ST Microelectronics, 2019). Die roten Kreise markieren die beiden Anschlüsse für das Messen des Stromes

## 

## Mechanik

Die Mechanik spielt eine entscheidende Rolle im Projekt, um den Erfolg zu garantieren. 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 Prototypen 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.

Mechanische Zeichnung einfügen

## 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.

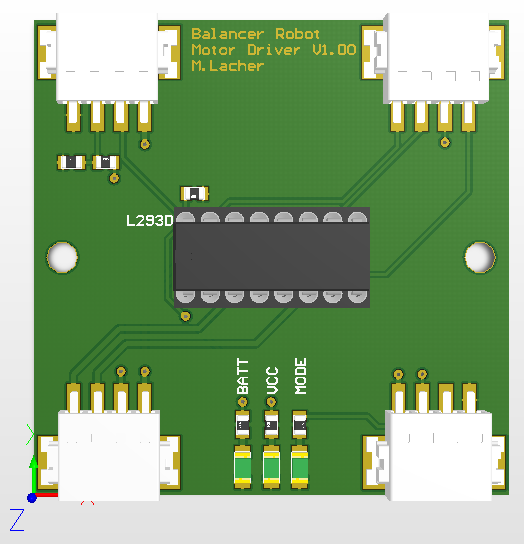


Abbildung 20: Leiterplatte „Motor Driver V1.00“

Abmessung: 50x50mm

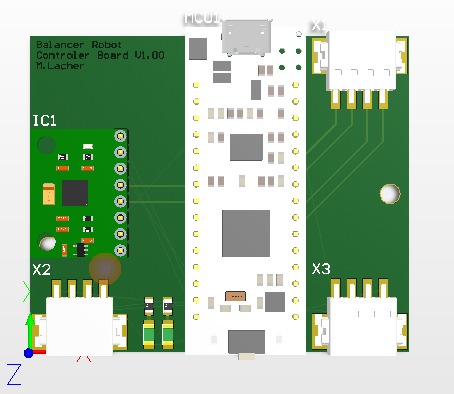


Abbildung 21: Leiterplatte „Controller Board V1.00“

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

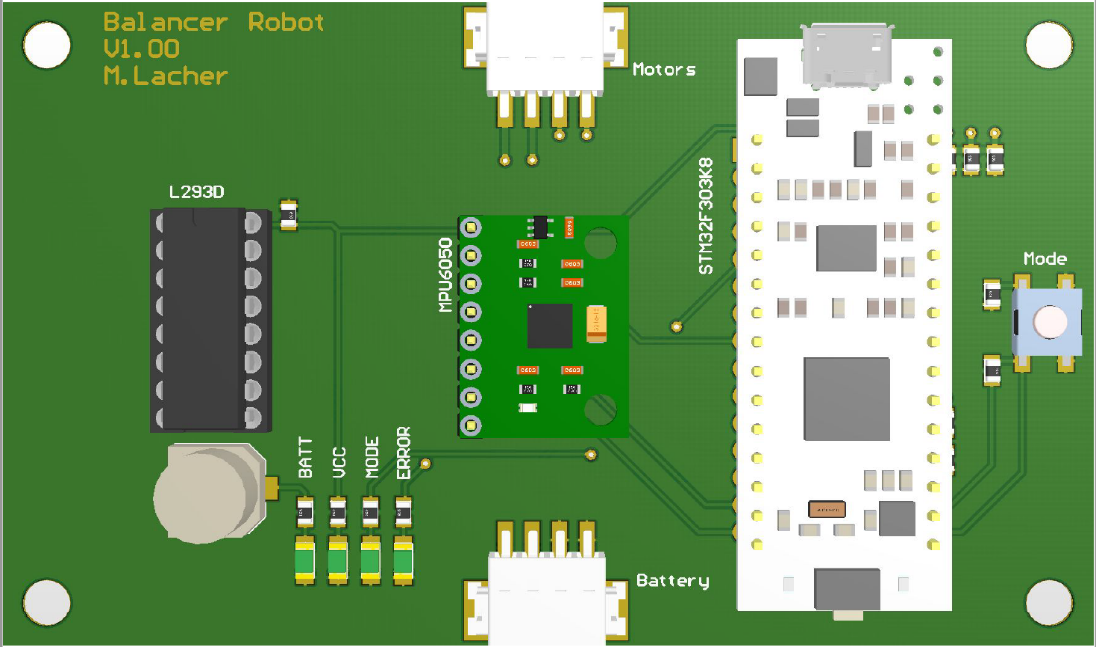


Abbildung 22: Leiterplatte "Balancer Robot V1.00"

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.

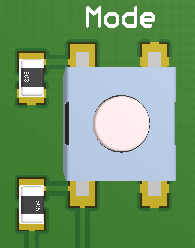


Abbildung 23: Mode-Taster

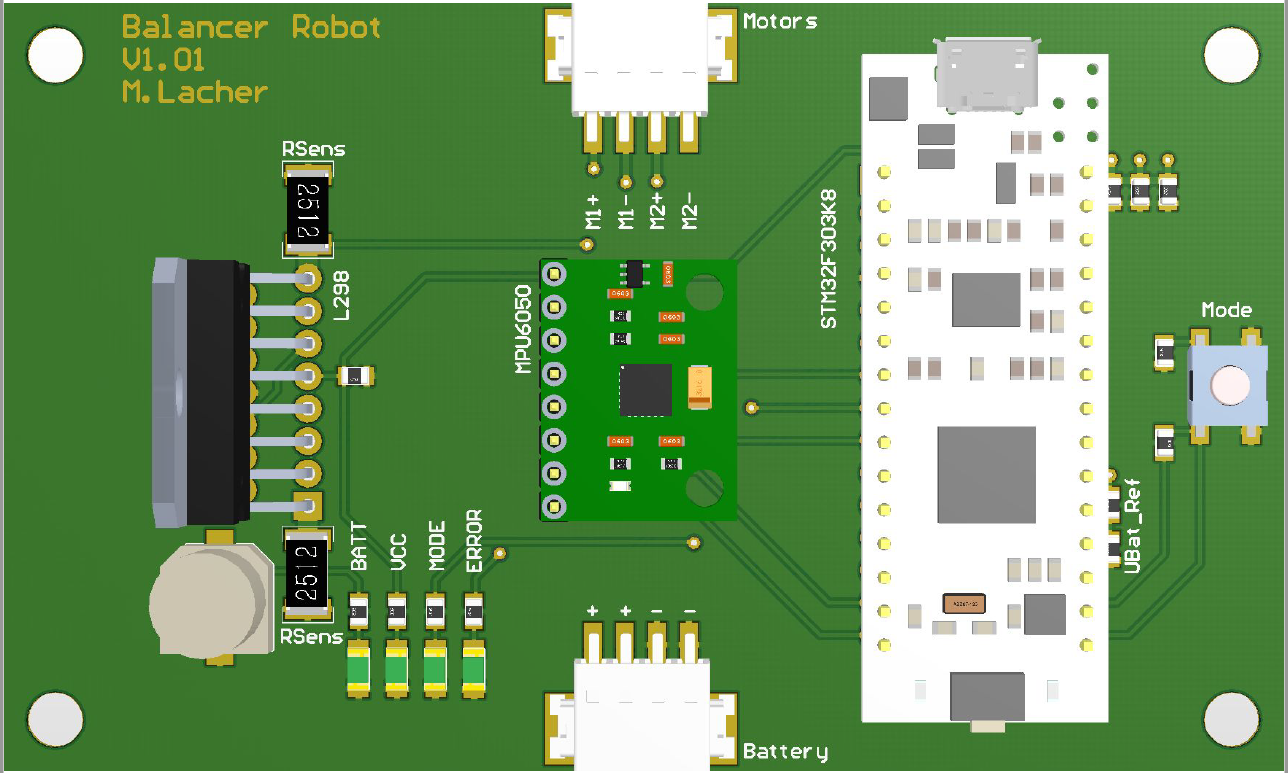


Abbildung 24: Leiterplatte "Balancer Robot V1.01"

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’s signalisieren dem Benutzer folgende Informationen:

**Batt**: Batteriespeisung vorhanden

**VCC**: 3.3V Speisung vorhanden

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

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

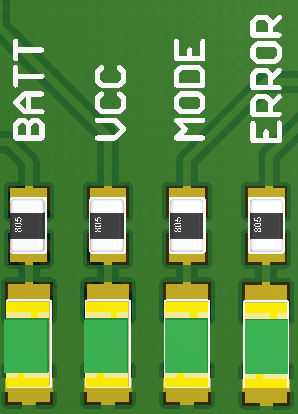


Abbildung 25: LED-Anzeige

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.

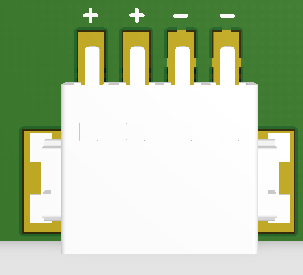


Abbildung 26: Akku-Stecker

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 dass ausbalancieren nicht.

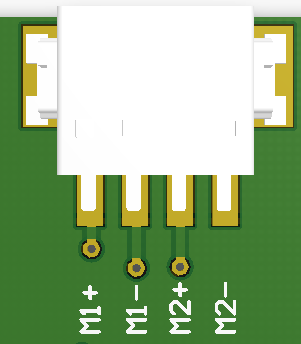


Abbildung 27: Motor-Stecker

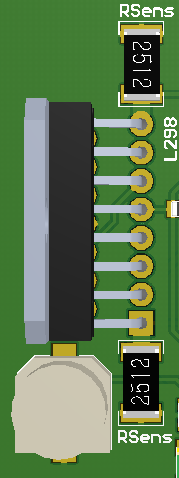


Abbildung 28: L298 Motor Treiber

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 stütz die Akkuspannung, direkt beim Motor Treiber, damit diese bei schnell ändernder Belastung nicht zusammenbricht.

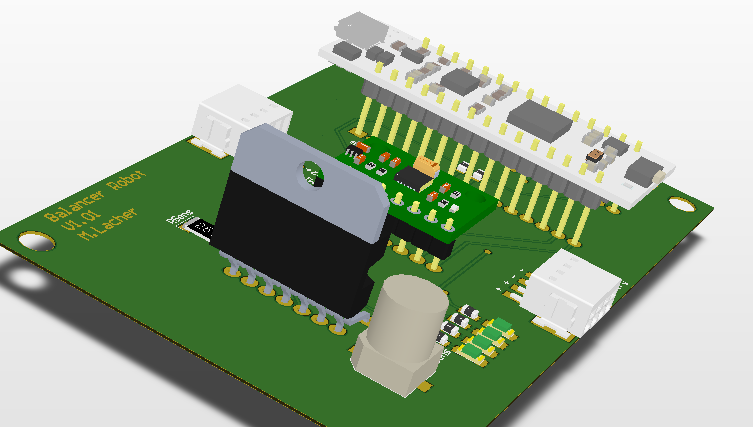


Abbildung 29: Seitenansicht, Rückseite des L298

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

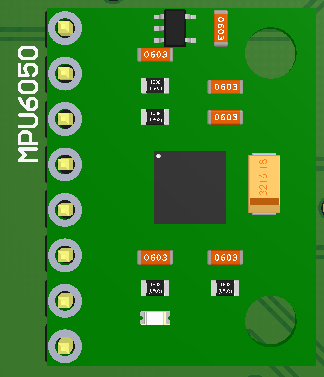


Abbildung 30: Sensorboard MPU-6050

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.

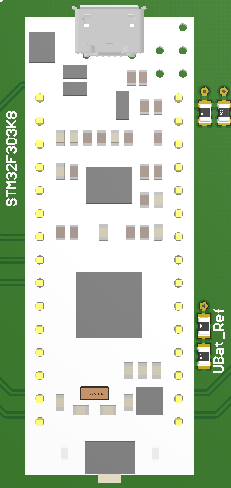


Abbildung 31: Mikrocontrollerboard STM32F303K8

Das Mikrocontrollerboard Nucleo STM32F303K8 ist 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 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, 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 für das Lader der Akkus, als auch für die Überwachung während des Betriebs.

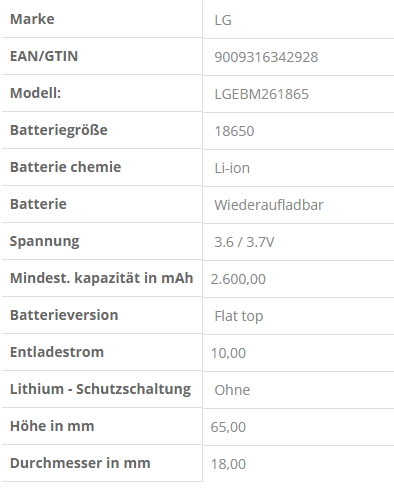


Abbildung 33: Angaben der bestellten Akkuzellen (NKON, 2019)

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.

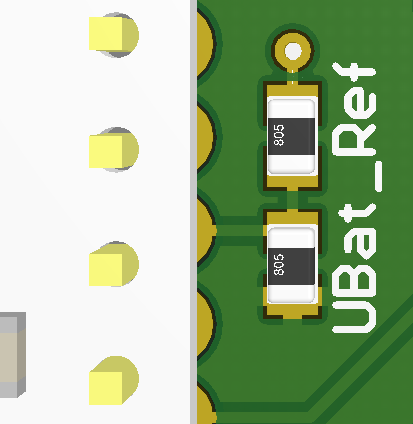


Abbildung 34: Spannungsteiler auf der Leiterplatte

Ingesamt werden 4 Akkuzellen in Serie geschalten, dass 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.

## Software

### Konzept

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

Regelungstechnik ist ein grosser Teil des Projekts. Im Grundprinzip funktioniert jede Regelungsschaltung, ob digital oder analog, auf dem gleichem Grundprinzip. Die Differenz 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 als Rückführgrösse Rückgekoppelt.

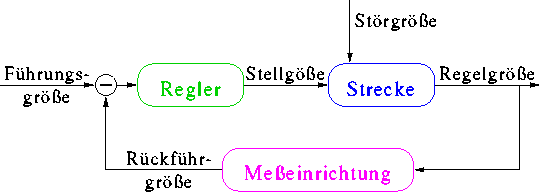


Abbildung 35: (Heuler, 2019)

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 Prinzip

# Schluss

## Glossar

# Quellenverzeichnis

Heuler. (23. 10 2019). *heuler.net*. Von http://www.heuler.net/stud/pendel/html\_netz/node9.html abgerufen

InvenSense. (20. 09 2019). MPU-6050 Datenblatt.

Mikrocontroller.net. (30. 09 2019). *Pulsweitenmodulation*. Von Mikrocontroller.net: Pulsweitenmodulation abgerufen

NKON. (25. 10 2019). *NKON*. Von https://www.nkon.nl/ abgerufen

ST Microelectronics. (24. 10 2019). L298 Datenblatt.

Texas Instruments. (30. 09 2019). *L293D*. Von Texas Instruments: http://www.ti.com/product/L293D# abgerufen

Texas Instruments. (30. 09 2019). *L293D PDF*. Von Texas Instruments: http://www.ti.com/lit/ds/symlink/l293d.pdf abgerufen

Wikipedia. (24. 10 2019). *Gleitender Mittelwert*. Von https://de.wikipedia.org/wiki/Gleitender\_Mittelwert abgerufen

Wikipedia. (14. 11 2019). *Lithium-Ionen-Akkumulator*. Von https://de.wikipedia.org/wiki/Lithium-Ionen-Akkumulator abgerufen

Wikipedia. (30. 09 2019). *Vierquadrantensteller*. Von https://de.wikipedia.org/wiki/Vierquadrantensteller abgerufen

## Abbildungsverzeichnis

[Abbildung 1: Sensorboard MPU-6050 6](file:///C:\Users\Markus.Lacher\Desktop\BalancerRobot\Documentation\BMA-BalancerRobot%20Schriftgrösse%2012.docx#_Toc24637714)

[Abbildung 2: Achsenansicht von oben 6](file:///C:\Users\Markus.Lacher\Desktop\BalancerRobot\Documentation\BMA-BalancerRobot%20Schriftgrösse%2012.docx#_Toc24637715)

[Abbildung 3: Kraftvektoren beim Kippen 6](file:///C:\Users\Markus.Lacher\Desktop\BalancerRobot\Documentation\BMA-BalancerRobot%20Schriftgrösse%2012.docx#_Toc24637716)

[Abbildung 4: Kräftedreieck für Winkelberechnung 6](file:///C:\Users\Markus.Lacher\Desktop\BalancerRobot\Documentation\BMA-BalancerRobot%20Schriftgrösse%2012.docx#_Toc24637717)

[Abbildung 5:Blockschema MPU-6050 (InvenSense, 2019) 7](file:///C:\Users\Markus.Lacher\Desktop\BalancerRobot\Documentation\BMA-BalancerRobot%20Schriftgrösse%2012.docx#_Toc24637718)

[Abbildung 6: Gleitender Mittelwert (Wikipedia, 2019) 7](file:///C:\Users\Markus.Lacher\Desktop\BalancerRobot\Documentation\BMA-BalancerRobot%20Schriftgrösse%2012.docx#_Toc24637719)

[Abbildung 7: Messung des Acceleromters 8](file:///C:\Users\Markus.Lacher\Desktop\BalancerRobot\Documentation\BMA-BalancerRobot%20Schriftgrösse%2012.docx#_Toc24637720)

[Abbildung 8: Messung mit gleitendem Mittelwert 8](file:///C:\Users\Markus.Lacher\Desktop\BalancerRobot\Documentation\BMA-BalancerRobot%20Schriftgrösse%2012.docx#_Toc24637721)

[Abbildung 9: (Wikipedia, 2019) 10](file:///C:\Users\Markus.Lacher\Desktop\BalancerRobot\Documentation\BMA-BalancerRobot%20Schriftgrösse%2012.docx#_Toc24637722)

[Abbildung 10: (Texas Instruments, 2019) 10](file:///C:\Users\Markus.Lacher\Desktop\BalancerRobot\Documentation\BMA-BalancerRobot%20Schriftgrösse%2012.docx#_Toc24637723)

[Abbildung 11: (Mikrocontroller.net, 2019) 11](file:///C:\Users\Markus.Lacher\Desktop\BalancerRobot\Documentation\BMA-BalancerRobot%20Schriftgrösse%2012.docx#_Toc24637724)

[Abbildung 12: Messaufbau 12](file:///C:\Users\Markus.Lacher\Desktop\BalancerRobot\Documentation\BMA-BalancerRobot%20Schriftgrösse%2012.docx#_Toc24637725)

[Abbildung 13: Messung 1, Start des Motors 12](file:///C:\Users\Markus.Lacher\Desktop\BalancerRobot\Documentation\BMA-BalancerRobot%20Schriftgrösse%2012.docx#_Toc24637726)

[Abbildung 14: Messung des Stroms bei Anfahren mit PWM 13](file:///C:\Users\Markus.Lacher\Desktop\BalancerRobot\Documentation\BMA-BalancerRobot%20Schriftgrösse%2012.docx#_Toc24637727)

[Abbildung 15: Messung des Stroms bei PWM 60% 13](file:///C:\Users\Markus.Lacher\Desktop\BalancerRobot\Documentation\BMA-BalancerRobot%20Schriftgrösse%2012.docx#_Toc24637728)

[Abbildung 16: Block Diagramm aus L298 Datenblatt (ST Microelectronics, 2019). Die roten Kreise markieren die beiden Anschlüsse für das Messen des Stromes 14](file:///C:\Users\Markus.Lacher\Desktop\BalancerRobot\Documentation\BMA-BalancerRobot%20Schriftgrösse%2012.docx#_Toc24637729)

[Abbildung 17: Leiterplatte „Motor Driver V1.00“ 15](file:///C:\Users\Markus.Lacher\Desktop\BalancerRobot\Documentation\BMA-BalancerRobot%20Schriftgrösse%2012.docx#_Toc24637730)

[Abbildung 18: Leiterplatte „Controller Board V1.00“ 15](file:///C:\Users\Markus.Lacher\Desktop\BalancerRobot\Documentation\BMA-BalancerRobot%20Schriftgrösse%2012.docx#_Toc24637731)

[Abbildung 19: Leiterplatte "Balancer Robot V1.00" 15](file:///C:\Users\Markus.Lacher\Desktop\BalancerRobot\Documentation\BMA-BalancerRobot%20Schriftgrösse%2012.docx#_Toc24637732)

[Abbildung 20: Mode-Taster 16](file:///C:\Users\Markus.Lacher\Desktop\BalancerRobot\Documentation\BMA-BalancerRobot%20Schriftgrösse%2012.docx#_Toc24637733)

[Abbildung 21: Leiterplatte "Balancer Robot V1.01" 16](file:///C:\Users\Markus.Lacher\Desktop\BalancerRobot\Documentation\BMA-BalancerRobot%20Schriftgrösse%2012.docx#_Toc24637734)

[Abbildung 22: LED-Anzeige 16](file:///C:\Users\Markus.Lacher\Desktop\BalancerRobot\Documentation\BMA-BalancerRobot%20Schriftgrösse%2012.docx#_Toc24637735)

[Abbildung 23: Akku-Stecker 17](file:///C:\Users\Markus.Lacher\Desktop\BalancerRobot\Documentation\BMA-BalancerRobot%20Schriftgrösse%2012.docx#_Toc24637736)

[Abbildung 24: Motor-Stecker 17](file:///C:\Users\Markus.Lacher\Desktop\BalancerRobot\Documentation\BMA-BalancerRobot%20Schriftgrösse%2012.docx#_Toc24637737)

[Abbildung 25: L298 Motor Treiber 17](file:///C:\Users\Markus.Lacher\Desktop\BalancerRobot\Documentation\BMA-BalancerRobot%20Schriftgrösse%2012.docx#_Toc24637738)

[Abbildung 26: Seitenansicht, Rückseite des L298 17](file:///C:\Users\Markus.Lacher\Desktop\BalancerRobot\Documentation\BMA-BalancerRobot%20Schriftgrösse%2012.docx#_Toc24637739)

[Abbildung 27: Sensorboard MPU-6050 18](file:///C:\Users\Markus.Lacher\Desktop\BalancerRobot\Documentation\BMA-BalancerRobot%20Schriftgrösse%2012.docx#_Toc24637740)

[Abbildung 28: Mikrocontrollerboard STM32F303K8 18](file:///C:\Users\Markus.Lacher\Desktop\BalancerRobot\Documentation\BMA-BalancerRobot%20Schriftgrösse%2012.docx#_Toc24637741)

[Abbildung 29: Li-Ion Akkuzelle Typ 18650 19](file:///C:\Users\Markus.Lacher\Desktop\BalancerRobot\Documentation\BMA-BalancerRobot%20Schriftgrösse%2012.docx#_Toc24637742)

[Abbildung 30: Angaben der bestellten Akkuzellen (NKON, 2019) 19](file:///C:\Users\Markus.Lacher\Desktop\BalancerRobot\Documentation\BMA-BalancerRobot%20Schriftgrösse%2012.docx#_Toc24637743)

[Abbildung 31: Spannungsteiler auf der Leiterplatte 19](file:///C:\Users\Markus.Lacher\Desktop\BalancerRobot\Documentation\BMA-BalancerRobot%20Schriftgrösse%2012.docx#_Toc24637744)

[Abbildung 32: (Heuler, 2019) 20](file:///C:\Users\Markus.Lacher\Desktop\BalancerRobot\Documentation\BMA-BalancerRobot%20Schriftgrösse%2012.docx#_Toc24637745)

# Dank

# Anhang