

Fachbericht Projekt 4 (EIT) - Team 2

Skatemate

Team 2:

Raphael Brügger

Rafael Eberle

Noah Hütter

Mike Mösner

Selina Reich

Remo Suter

Auftraggeber:

Hans Gysin

Coaches:

Hans Gysin

Matthias Meier

Pascal Schleuniger

Anita Gertiser

Bonnie Domenghino

Pascal Buchschacher

Windisch, 12. Mai 2017

Version: 1.0

Abstract

Team 4 members: Raphael Brügger, Rafael Eberle, Noah Hütter, Mike Mösner, Selina Reich,
Remo Suter

Keywords:

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Grundlagen	2
2.1	Grobkonzept	2
2.2	Bedienung	4
3	Technische Grundlagen	6
3.1	FlexSensor	6
3.2	Balancing	6
3.3	BLDC Motor	6
3.4	FOC	7
3.5	FET, H-Brücke	7
3.6	Funkübertragung	7
4	Hardware	8
4.1	Überblick	8
4.2	Steuerung - Magic-Glove	8
4.3	Stromversorgung	8
4.4	Motoransteuerung	11
5	Software	12
5.1	Überblick	12
5.2	Steuerung - Magic-Glove	12
5.3	Stromversorgung	12
5.4	Motoransteuerung	14
6	Validierung	15
6.1	Überblick	15
6.2	Steuerung - Magic Glove	15
6.3	Stromversorgung	15
6.4	Motoransteuerung	15
6.5	Gesamtvalidierung	15
6.6	Markttauglichkeit	15
7	Schlusswort	16
	Literaturverzeichnis	17
A	Anhang	18

1 Einleitung

2 Grundlagen

In diesem Kapitel wird das Grobkonzept des Commute von Skatemate dargestellt, um einen Überblick über das Elektroskateboard zu geben. Bevor im Kapitel 3 die dazu notwendigen Grundlagen erklärt werden, wird die Bedienung des Commute erklärt, so dass die Grundlagen besser eingeordnet werden können.

2.1 Grobkonzept

Das Projekt Commute von Skatemate kann in drei Grundbereiche unterteilt werden: Die Steuerung über den Magic-Glove, die Motoransteuerung mittels feldorientierter Regelung FOC und die Stromversorgung mitsamt dem selbst konzipierten Akkuladegerät. Wie diese drei Bereiche miteinander interagieren ist in der Abbildung 2.1 dargestellt. Die Antriebstechnik ist über ein Kabel mit der Stromversorgung verbunden, die Inputs der Steuerung erhält sie über ein Funknetz. Nachfolgend werden die drei Bereiche detaillierter erläutert. Dargestellt sind sie im Blockschaltbild der Abbildung 2.2. Zudem wird darauf eingegangen, weshalb diese Lösung gewählt wurde.

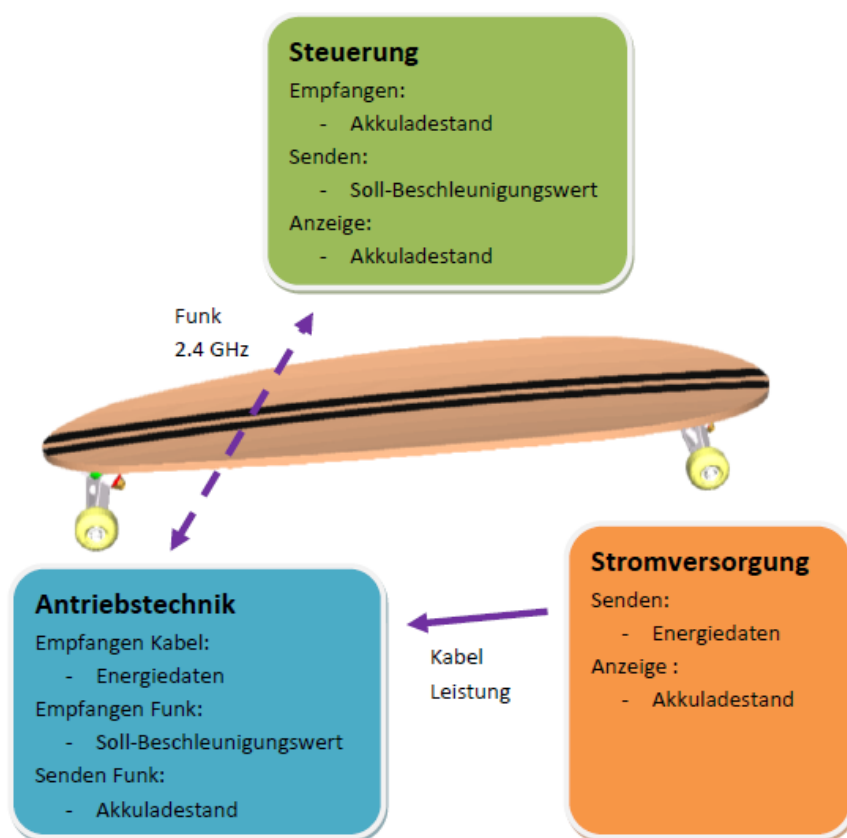


Abbildung 2.1: Blockschaltbild Grobkonzept

Steuerung über den Magic-Glove

Es gibt verschiedene Wege, wie ein elektrisches Longboard gesteuert werden kann. Eine Variante ist, über Drucksensoren im Brett durch eine Gewichtsverlagerung in Fahrtrichtung eine Geschwindigkeitsregulation zu erreichen. Da auf unebenem Gelände eine natürliche Gewichtsverlagerung entsteht, und diese kompensiert werden müsste, und zudem lokal beschränkte Sensoren die Bewegungsfreiheit auf dem Longboard einschränken können, wurde diese Variante verworfen. Stattdessen wird die Geschwindigkeit über eine Fingerbewegung gesteuert. Dazu wird ein Handschuh mit integrierten Sensoren entwickelt. Dieses Wearable enthält einen Flex Sensor, der die Beugung des Zeigefingers misst. Der Flex Sensor wird im Kapitel 3.1 beschrieben. Die Beugung des Fingers wird mithilfe eines Mikrocontrollers quantifiziert und als Sollbeschleunigung der Motoransteuerung übergeben. Dies geschieht über ein 2.4 GHz Funknetz, dazu ist ein Funkmodul integriert. Die Stromversorgung erfolgt über eine Li-Ion Knopfbatterie LTR2450. In der Abbildung 2.2 sind die einzelnen Elemente der Steuerung dargestellt.

Antriebstechnik

Als Antrieb ist der OX1 2-10 Motor vorgegeben, dies ist ein Brushless-Gleichstrommotor (BLDC-Motor). Er verfügt nicht über Hallsensoren. Die technischen Hintergründe des Motors werden im Kapitel 3.3 gegeben. Ein BLDC-Motor ist wie ein permanentmagnetischer Drehstrom-Synchronmotor (PMSM) aufgebaut.

Die Ansteuerung kann über eine Kommutierung oder eine Vektorregelung erfolgen [1]. Die Kommutierung kann prinzipiell gesteuert oder ungesteuert erfolgen. Bei der ungesteuerten Kommutierung kann der Motor als Schrittmotor genutzt werden, die Rotorposition folgt der Steuerung. Diese Variante ist für ein gleichmässig rollendes Longboard ungeeignet. Die Kommutierung muss also abhängig von der Rotorposition erfolgen (geführte Kommutierung), die Steuerung reagiert also auf die effektive Rotorposition und passt sich dieser an. Am einfachsten wäre diese mit Sensoren, da unser Motor jedoch nicht über Sensoren verfügt, muss der Motor über eine sensorlose gesteuerte Kommutierung angesteuert werden. Dies funktioniert jedoch nur ab einer Mindest-drehzahl wirklich gut. Zum Anfahren muss der Motor speziell angesteuert werden.

Bei der Vektorreglung, in diesem Fall eine Feldorientierte Regelung (field oriented controll, FOC), werden die Spannungen zur Steuerung aktiv der Rotorlage angepasst. Auch mit der FOC kann zwischen sensorgesteuerte und sensorlosen Regelung unterschieden werden. Bei der sensorlosen Regelung muss wiederum zum Anfahren eine zusätzliche Ansteuerung erfolgen. Kann die Anfangsposition jedoch genügen genau geschätzt werden, läuft der Motor auch bei tiefen Geschwindigkeiten gleichmässig, da er genauer geregelt werden kann. Dies entspricht unseren Anforderungen für das Commute, da ein sanftes Anfahren sehr wichtig ist. Die FOC ist im Kapitel 3.4 erklärt.

Ausgeführt wird die FOC auf einem Mikrocontroller. Mittels eines RF-Modul wird die Sollbeschleunigung empfangen. Eine Halbbrücke mit FET-Treibern (siehe Kapitel 3.5) setzt die gewünschte Motorsteuerung um. Zur Übersicht sind diese Elemente im Blockschaltbild Abbildung 2.2 dargestellt.

Stromversorgung

Die Stromversorgung erfolgt über ein LiPo 5200mAh Akku, dieser ist vorgegeben. Es besteht ein externes Ladegerät. Da dies jedoch bedeutet, dass der Akku für jedes Laden vom Longboard gelöst werden muss. Dies ist umständlich und gefährdet die Wetterfestigkeit und Robustheit des Commute. Deshalb wird ein eigener, integrierter Akkulader entwickelt, so dass der Akku nicht

[Quelle
xxx]

(xxx korrekt?)

Diese wird
im Kapitel xxx
erklärt.

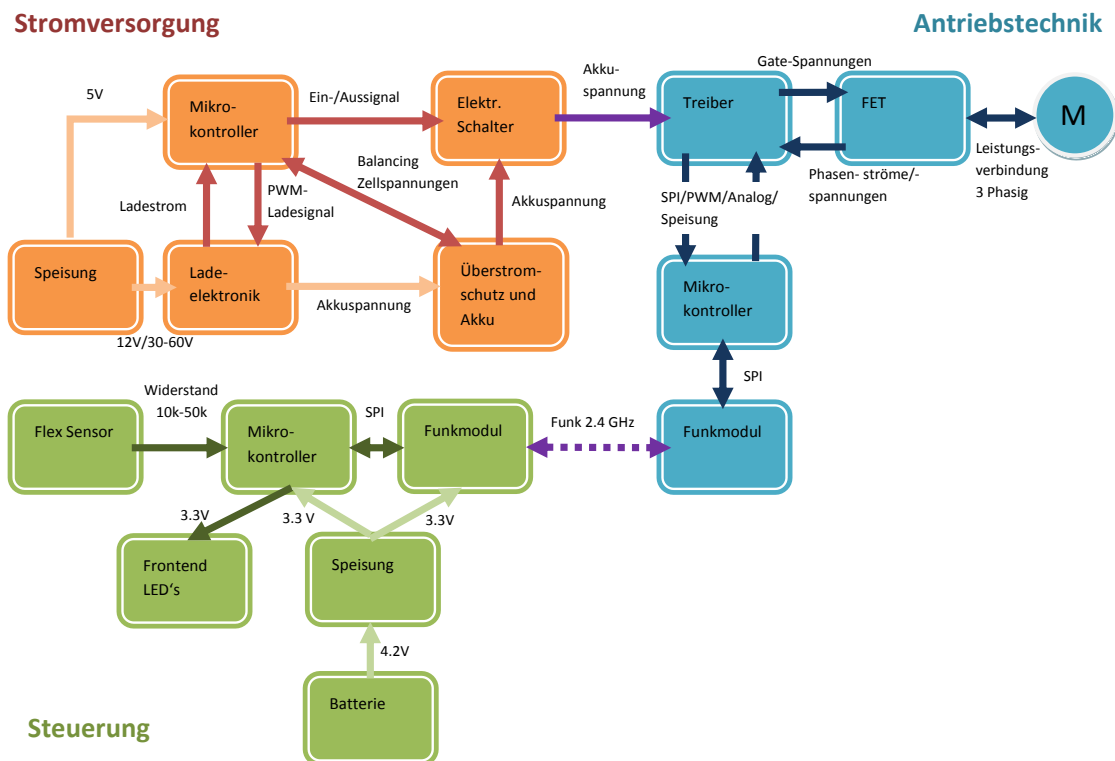


Abbildung 2.2: Detailliertes Blockschaltbild

mehr herausgelöst werden muss. Da die Entladung im Gebrauch sowieso überwacht werden muss, ist der Lader eine Ergänzung und kein alleinstehendes Element. Kernstück der Stromversorgung ist die Balancerschaltung. Dabei wird der Akku erst mit einem konstanten Strom geladen, bis die Zellspannung erreicht ist. Anschliessend wird mit einer konstanten Spannung geladen, bis der Strom unter 100mA gesunken ist, dann sind die Zellen vollständig geladen. Wie das Balancing genau funktioniert, ist im Kapitel 3.2 beschrieben. Anstelle einer eigenen Implementation hätte ein fertiges IC eingekauft werden können, aus finanziellen Gründen wurde jedoch darauf verzichtet. Die Elemente der Stromversorgung sind in der Abbildung 2.2 dargestellt.

2.2 Bedienung

Im folgenden wird die Bedienung des Commute beschrieben. Dabei wird erst die Inbetriebnahme beschrieben, anschliessend der alltägliche Gebrauch und zuletzt wird erklärt, wie der Akku geladen werden kann.

Erste Inbetriebnahme

Bei der ersten Inbetriebnahme des Commute muss der Magic-Glove kalibriert werden. Insbesondere wird dabei die Ruhestellung der Hand definiert. Der Nutzer drückt drei Sekunden auf den Taster, dann zeigen die LEDs die Ruhestellung an, das heisst, alle leuchten und diese in der

Mitte leuchten am stärksten. Nun hält der Nutzer seine Hand in Ruhestellung, also so wie er gerne auf dem Longboard steht. Dies wird als Nullposition definiert. Anschliessend beginnen die LEDs zu laufen – in eine Richtung führt der Nutzer dazu eine Bremsbewegung aus, in die andere Richtung die Bewegung, um zu Beschleunigen. Anschliessend ist die Kalibration abgeschlossen. Nun kann das Commute genutzt werden.

Alltägliche Handhabung

Auf dem Longboard befindet sich ein on/off-Schalter, ebenso auf dem Magic-Glove. Werden diese angeschaltet, ist das Commute betriebsbereit und der Nutzer kann losfahren. Entfernt sich der Nutzer mehr als drei bis vier Meter vom Bord, ist die Kommunikationsverbindung zwischen der Steuerung und der Antriebstechnik unterbrochen, und das Commute schaltet sich automatisch aus. Während der Fahrt wird dem Nutzer mithilfe der LEDs der Batteriestand des LiPo-Akkus angezeigt. Zudem wird die Batterie des Magic-Gloves überwacht und auch über die LEDs angezeigt.

Akku aufladen

Der Akku kann praktisch über einen Stecker am Longboard aufgeladen werden, der Akku muss also nicht herausgelöst werden. Während dem Ladevorgang zeigen drei LEDs am Longboard den Ladestand an. Diese LEDs leuchten auch kurz auf, wenn das Longboard eingeschaltet wird und zeigen damit den Akkustand.

3 Technische Grundlagen

3.1 FlexSensor

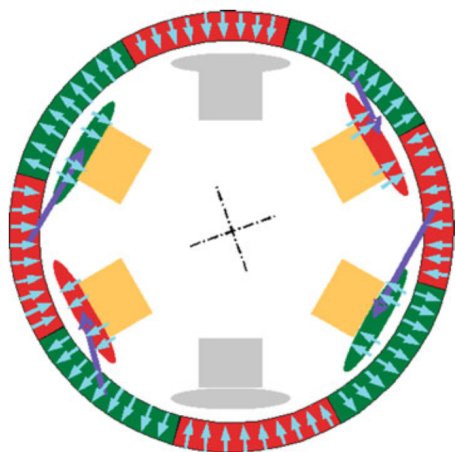
3.2 Balancing

Das Board wird durch einen sechs Zellen Li-Po Akku gespeist. Jede einzelne Zelle hat dabei einen eigenen Innenwiderstand, welcher sich mit dem Alter verändern kann. Beim Ladevorgang entstehen somit unterschiedliche Spannungen wodurch die Zellen aus der Balance geraten. Damit sich einzelne Zellen nicht überladen während andere leer bleiben, benötigt es einen Balancing-Vorgang um die Differenzen der Zellen auszugleichen. Dabei werden bei einer zu grossen Spannungsdifferenz alle Zellen auf die Spannung der niedrigsten Zelle entladen. Dabei wird in unserem Fall die überschüssige Energie über den Transistor und die Widerstände verheizt.

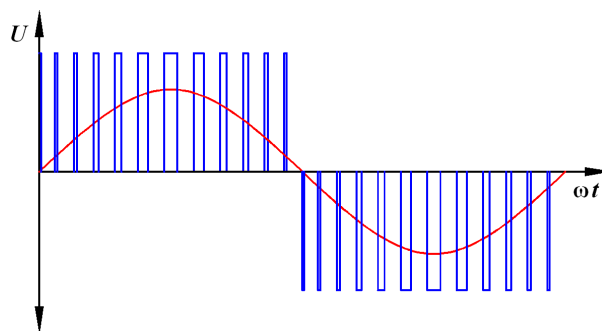
3.3 BLDC Motor

Für dieses Projekt wurde der Motor OX1 2-10 zur Verfügung gestellt. Dies ist ein dreiphasen Brushless DC-Motor ohne Hallensensoren. Die gegebenen technischen Daten sind in der untenstehenden Tabelle (Abbildung 3.2) ersichtlich. Des Weiteren ist am Motor ersichtlich, dass die Erregung aus 14 Permanentmagneten besteht und somit 7 Polpaare resultieren. Der Stator besteht aus 12 Spulen, somit ist jede Phase vier Mal gewickelt. Der Aufbau entspricht einem Aussenläufermotor, ein BLDC-Motor verhält sich aus Regelungssicht wie eine permanenterregte Synchronmaschine. In der Abbildung 3.1(a) ist das Feldverhalten dargestellt.

ref neben
oben ...
stehend
u Refer-
renz; in
der neben-
stehenden
Tabelle



(a) Prinzip Aufbau BLDC [2]



(b) Sinusstrom mit PWM-Spannung [3]

Abbildung 3.1: Aufbau BLDC und PWM-Ansteuerung

Angesteuert wird jede Phase über eine Halbbrücke. Die FOC-Regelungsweise (siehe Kapitel 3.4), setzt einen sinusförmigen Strom auf jeder Phase voraus, dies jeweils 120° Phasenverschoben. Realisiert wird dies mittels PWM-Ansteuerung der Halbbrücken. Da der Strom bei einer L-Last

ausschreibe
od mit
Zeichen?
 120° od
 120 Grad?

das Integral der Spannung ist, lässt sich ein quasi-sinusförmiger Strom generieren. Dargestellt ist dies in der Abbildung 3.1(b).

BLDC Motor	Werte
Idle Current	1.2A
Max. Current	50A
Input Volt.	2..10 x 3.6 Lipo (25.2V)
Max. Output	1815W
Max. Pull	6700g
Rated Curren	42.5A
Motor Weight	460g
Shaft	8mm
Motor dimension	Ø50 x 65mm
Internal Resistance	0.0361Ω

Abbildung 3.2: BLDC Daten

3.4 FOC

Einstieg...

Das Prinzip der Transformationen: Ein kompliziertes Problem wird in ein anderes Koordinatensystem transformiert. Das transformierte Problem ist dort viel einfacher zu lösen, es ist also ein einfacheres Problem. Die leicht gefundene Lösung wird rücktransformiert, wodurch die Lösung des komplizierten Problems erhalten wird. Ein mögliches Beispiel dafür ist die Laplace-Transformierung von Differentialgleichungen.

In unserem Beispiel ist das Problem die Ansteuerung des Motors. Mit der Clarke-Transformation wird in ein statorfestes Koordinatensystem gewechselt, mit der anschliessenden Park-Transformation in ein rotorfestes. Das Problem ist nun linear und mit einem einfachen PI (oder PID) Regler lösbar.

Anschliessend wird die gefundene Lösung zurücktransformiert. Dabei kann die komplette Rücktransformation (inverse Park- und inverse Clarke Transformation) ausgeführt und anschliessend der Motor über eine PWM angesteuert werden, oder aber es wird nur bis ins statorfeste Koordinatensystem rücktransformiert, (inverse Park Transformation) dann wird der Motor über eine Raumvektor-PWM (SVPWM) angesteuert.

3.5 FET, H-Brücke

3.6 Funkübertragung

e-Deutsch
ueberset-
zung und
Formatie-
rung usw

ev in An-
hang??

[2] und
korrekt
zitieren...

4 Hardware

4.1 Überblick

Vielleicht könnte dieses Schema hier viel gewinnbringender eingefügt werden als im Abschnitt Grobkonzept?

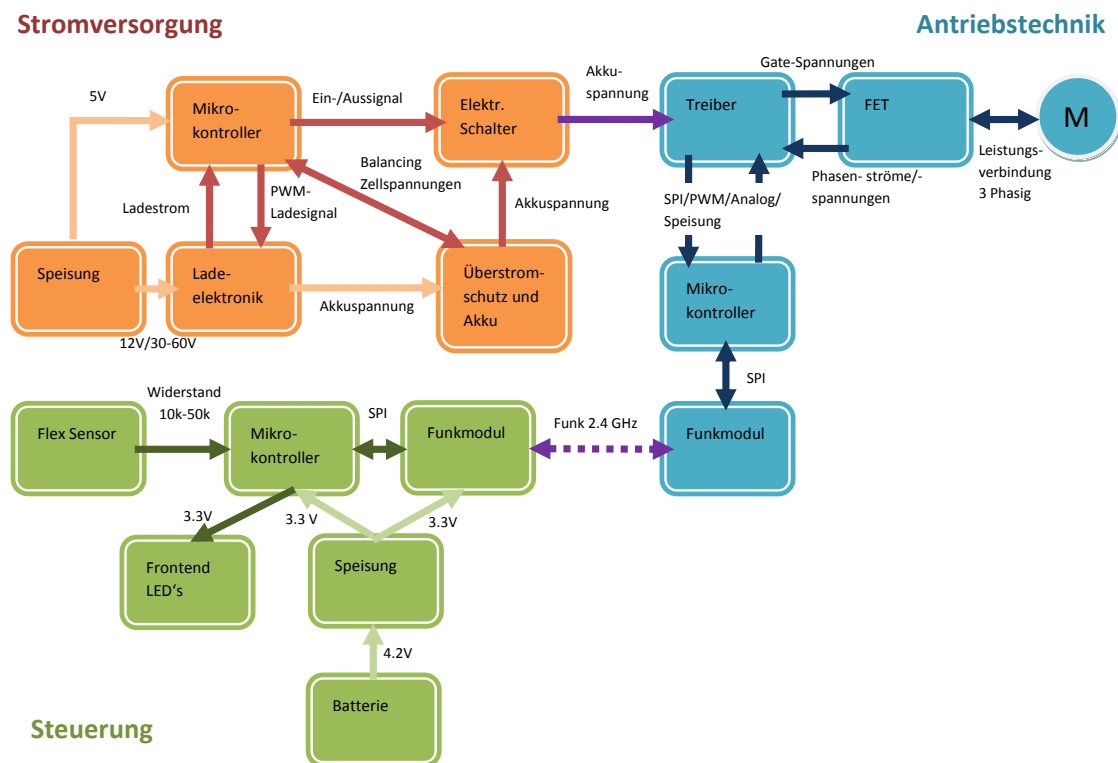


Abbildung 4.1: Detailliertes Blockschaltbild

4.2 Steuerung - Magic-Glove

4.3 Stromversorgung

An die Stromversorgung werden einige Anforderungen gestellt. So muss sie für die Motorsteuerung grosse Ströme mit bis zu 50A liefern können. Dabei muss die Spannung der Zellen kontinuierlich überprüft werden um ein Tiefentladen zu verhindern. Des Weiteren wird eine Standby-Killer Schaltung implementiert und dessen Funktion erklärt.

Um das Board einfach laden zu können ohne jedes Mal den Akku ausbauen zu müssen, hat sich unser Team entschieden eine Akku Ladeschaltung einzubauen. Diese muss die Zellen balancieren und sie vor Überspannung bzw. Überladung schützen.

Leserführung
was
kommt
nun

Balancing

- ...

Ladeelektronik

- PWM zu Strom Schaltung
- Selbsthaltung
- Linearregler

Mikrocontroller

An den Mikrocontroller werden verschiedene Anforderungen gesetzt. In folgender Tabelle x werden die General Purpose Input Output (GPIO) Anforderungen an den Mikrocontroller aufgelistet.

Beschreibung	Anforderung	Input/Output	Anzahl
Überwachung der Zellen	Analog	Input	6
Überwachen des Ladestroms	Analog	Input	1
Überwachen der Eingangsspannung	Analog	Input	1
Entladen der Zellen (Balanceing)	Digital	Output	6
Anzeige des Ladezustands (LED)	Digital	Output	3
Schalten des Ausgang Stroms zum Motor	Digital	Output	1
Selbsthaltung des Mikrocontrollers	Digital	Output	1
Regelung des Ladestroms	PWM	Output	1
Kommunikation SPI Schnittstelle MISO/MOSI/SCK	Serial	In/Output	3

Abbildung 4.2: GPIO Anforderungen für den Mikrocontroller

Für die Regelung der Stromversorgung wird der Mikrocontroller ATmega328P-AU verwendet.

Zellmessung

Die Messung der Zellen durchlief während der Entwicklungsphase mehrere Änderungen. Die Zellen sind in Serie geschaltet, um dem Motor genügend Spannung zur Verfügung zu stellen. Mit einer Zellenspannung von 4.15V pro Zelle liegt am obersten Punkt (Anode der Zelle 6) eine Spannung von 24,9V. Da die Spannung an den Eingängen des Mikrocontrollers nicht seine Speisespannung übersteigen sollte, mussten diese Spannungen verringert werden. In unserem Fall beträgt die maximale Spannung am Eingang 5V. Die erste Idee war, wie in Abb.4.3 links oben zu sehen, mit einfachen Spannungsteiler die Spannungen so zu skalieren, dass die Maximalspannung nicht überschritten wird.

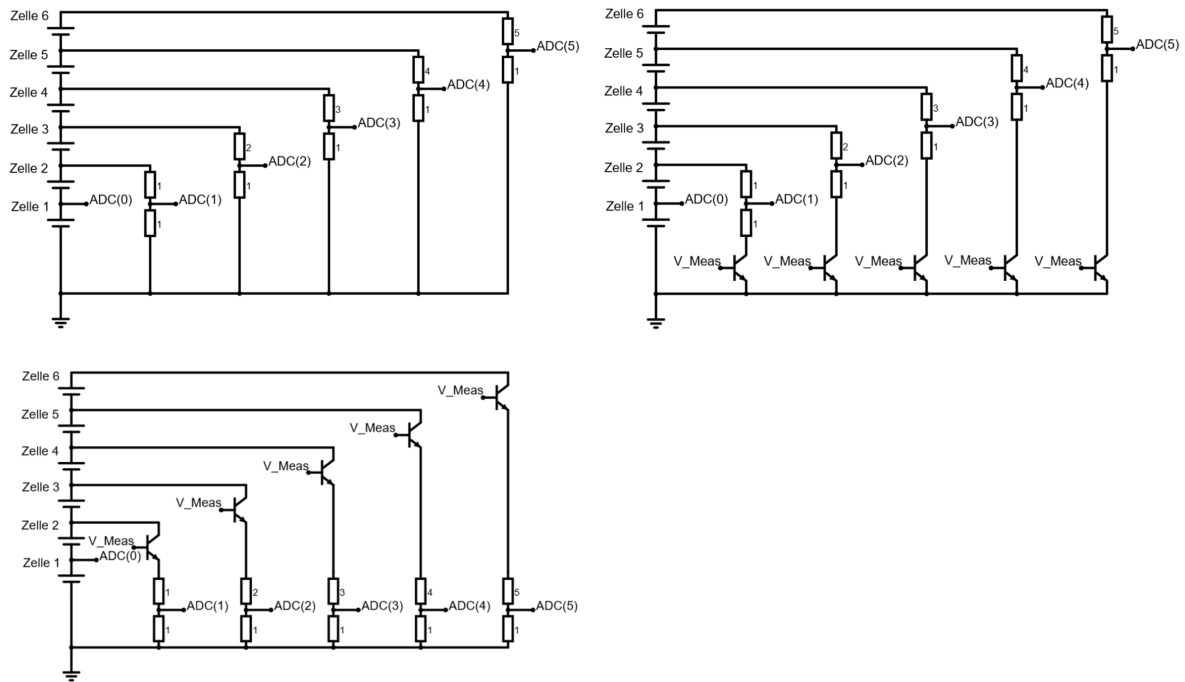


Abbildung 4.3: Messung der Zellen - verschiedene Arten

Der Nachteil dieser Schaltung ist, dass die Zellen durch die Spannungsteiler kontinuierlich entladen werden. Somit können bei einem längeren Nichtgebrauch die Akkuzellen entladen oder sogar tiefentladen sein.

Um dies zu verhindern wurde der zweite Entwurf auf der rechten Seite der Abb.4.3 entwickelt. Dieser unterbricht mit den Transistoren den Entladestromkreis über den Widerständen. Die Transistoren werden übersteuert, um sie als Schalter zu verwenden und den durch die UCE Spannung entstehende Fehler zu verkleinern. Dieser tritt je nach Sättigungsspannung der Transistoren jedoch immer noch auf und ist durch die unterschiedlichen Bauarten nur schwer zu korrigieren. Der zweite grosse Nachteil und gleichzeitig Killerkriterium für diese Schaltung war, dass durch das Unterbrechen des Spannungsteiler Stromkreises an den ADC Ausgängen wieder die Zellenspannung anliegt. Dadurch würden sich die Zellen über die Ableitdiode am Eingang des Mikrocontrollers entladen und diese voraussichtlich zerstören.

Dies könnte verhindert werden, indem der Stromkreis oberhalb der ADC Eingängen unterbrochen wird. Dies ist in der linken unteren Schaltung der Abb.4.3 gezeichnet. Dadurch wären die Eingänge vor Überspannung geschützt. Aber auch diese Schaltung bringt diverse Nachteile. So fließt beim geschlossenen Zustand der Basis-Emitter Strom durch den Spannungsteiler. Dies verfälscht die Messresultate. Zusätzlich muss zwischen Basis und Emitter eine Schaltspannung von mindestens 0.7V sein. Dazu müsste die Schaltspannung 0.7V über der Zellspannung liegen, was nur mit grossem Aufwand erreichbar wäre. In einem Teamentscheid wurde die erste Methode gewählt, da sie die genauesten Messungen liefert und die Entladung der Zellen bei einer durchschnittlichen Benutzung des Boards nie zu tragen kommt.

besserer
Titel für
Abb.

hä? bzw.
Forma-
tierung
not-
wendig?
 $U_{CE} \rightarrow$
 $U_{collector}$
aaahhhaaa

diese =
die Ableit-
diode?

ev.:nicht ?

4.4 Motoransteuerung

Treiber IC und Speisung

Endstufe (H-Brücke)

Messschaltung

Mikrocontroller

5 Software

5.1 Überblick

5.2 Steuerung - Magic-Glove

5.3 Stromversorgung

Mit der Software zum Battery Management werden wichtige Punkte geregelt, um ein langes Leben der Akkuzellen zu gewährleisten. Darunter gehören sowohl über- als auch unter- Spannungsschutz sowie ausbalancieren der einzelnen Zellenspannungen beim Laden.

Der aktuelle Ladevorgang wird über drei verschiedenen LED's angezeigt. Dabei zeigen diese den Constant Current (CC), Constant Voltage (CV) und den vollen Zustand (off) an. Diese können als Laden (CC, LED1) Betriebsbereit (CV, LED2) und vollständig geladen (off, LED3) interpretiert werden. Das folgende Zustandsdiagramm (Abbildung 5.1) zeigt den Ablauf der Software auf dem Mikrocontroller.

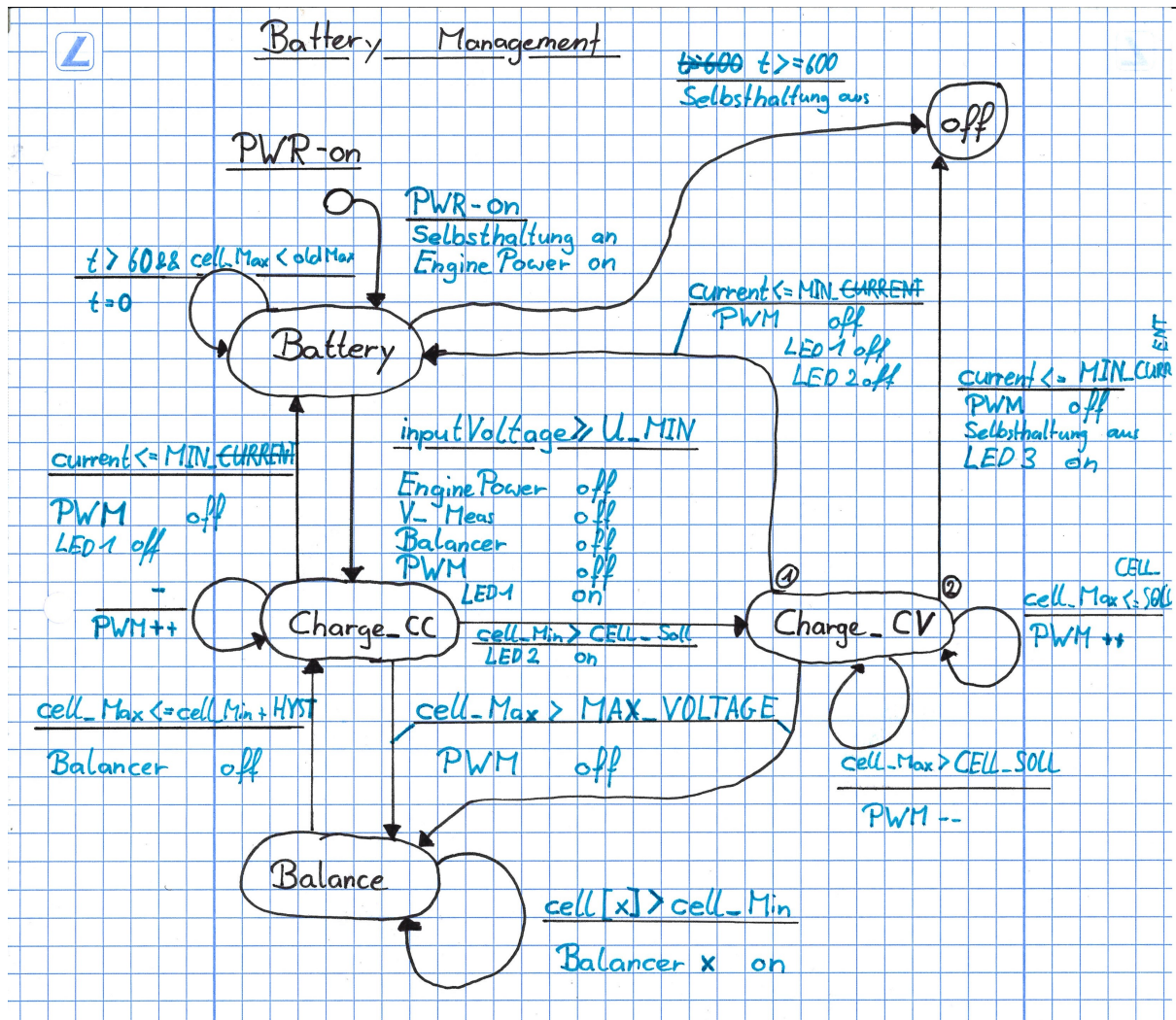


Abbildung 5.1: State Diagramm des Batterie-Managemnet

Wie im Hardwareteil schon beschrieben wurde, hält sich der Mikrocontroller mit einer Selbsthaltung in Betrieb. Diese wird jedoch einerseits mit dem Ein- Taster als auch mit der Eingangsspannung des Ladegerätes überbrückt. Wird einer von diesen aktiviert, startet der Mikrocontroller auf und betätigt die Selbsthaltung.

Beim Start wird als erstes der *Battery* Zustand geladen. Wenn das Ladekabel nicht angeschlossen ist, wird die Schaltung den Motor mit der benötigten Spannung von den Akkuzellen versorgen. Falls das Board über zehn Minuten nicht gebraucht wird oder sich der Akku der unteren Spannungsgrenze nähert, wird das Board ausgeschaltet. Sobald eine Ladespannung des Ladegeräts angelegt wird, wechselt der Mikrocontroller in den Zustand *Charge_CC*.

In diesem Zustand wird der Strom zunehmend auf die maximalen 5A gebracht und dort konstant gehalten. Dies geschieht durch den Pulsweitenmodulation-Ausgang (PWM-Ausgang) der auf den Schaltregler führt. Je mehr Strom in die Zellen fließt, desto höher wird deren Spannung. Sobald eine Zelle den Maximalwert von 4.3V überschreitet, wird in den *Balance* Zustand gewechselt. Dort werden alle Zellen auf den Wert der niedrigsten Zelle entladen. Die beiden Zustände werden solange wiederholt, bis sich die Spannung der niedrigsten Zelle über der Soll

Spannung befindet. Danach wird in den nächsten Zustand *Charge_CV* gewechselt. Im *Charge_CV* Zustand wird mit der Regelung des Zuführstromes versucht, die Zellenspannung weiterhin auf dem Sollwert von 4.15V zu halten. Dieser Strom nimmt mit der immer weiter fortschreitenden Aufladung der Zellen kontinuierlich ab, bis schliesslich ein unterer Grenzwert von XXmA erreicht wird. An diesem Punkt gilt der Akku als voll geladen und wechselt in den Zustand *Off*. Anders als vielleicht zuerst angenommen bleibt das Board dank der Überbrückung der Selbsthaltung aktiv und zeigt durch die 3 leuchtenden LED's an, dass der Akku voll aufgeladen ist. Sobald die Spannung des Ladegeräts abfällt, fällt auch die Selbsthaltung ab. Somit ist das Board komplett ausgeschaltet.

xxx mA

Ein weiterer Schwerpunkt der Software war die Berechnung der Spannungen der einzelnen Zellen. Die Zellen sind seriell miteinander verbunden. Somit addieren sich die Spannungen an den Ausgängen jeder Zelle bis auf 24,9V auf der sechsten Zelle. Da der AD-Wandler des Mikrocontroller nur zwischen 0 und 5 Volt messen kann, müssen die Ausgänge der Zellen mit einem Spannungsteiler mit dem Faktor $\frac{1}{n}$ herunter skaliert werden. Ab der zweiten Spannung sind die Ausgänge jedoch abhängig von den vorherigen Zellen. Um einen richtigen Wert zu erhalten, muss die Differenz inklusive der richtigen Skalierungsfaktoren berechnet werden. Mithilfe dieser Daten kann man für die Spannung der einzelnen Zellen $cell_0 \dots cell_n$ folgende Formel herleiten:

$$cell_n = n \cdot ADC(n) - (n - 1) \cdot ADC(n - 1) \quad (5.1)$$

Die Zellspannungen werden in jedem Durchlauf gemessen und in einem Array abgespeichert. Aus diesen Werten werden die minimale und maximale Spannung berechnet, welche für die verschiedenen Logikabfragen in der Statemachine verwendet werden.

erklärung
/ Liste
der ver-
wendeten
Symbole /
bedeutung
ADC,...

5.4 Motoransteuerung

Plattform

Erläuterung der verwendeten SW-Komponenten/Betriebssystem,

Entwicklungsumgebung

Programmablauf

Blockschaltmässiger Ablauf der Software

Peripherie

Verwendete Peripheriegeräte wie Timer, ADC, DMA usw

Modulübersicht

Jedes Modul wird grob erläutert

Libraries

Eine Übersicht über alle verwendeten externen Libraries

6 Validierung

6.1 Überblick

6.2 Steuerung - Magic Glove

6.3 Stromversorgung

6.4 Motoransteuerung

6.5 Gesamtvalidierung

6.6 Markttauglichkeit

7 Schlusswort

Literaturverzeichnis

- [1] Wikipedia. Bürstenloser gleichstrommotor. [Online]. Available: https://de.wikipedia.org/wiki/B%C3%BCrstenloser_Gleichstrommotor#Kommutierung
- [2] G. Babel, *Elektrische Antriebe in der Fahrzeugtechnik: Lehr- und Arbeitsbuch*, 3rd ed., S. Vieweg, Ed.
- [3] image50.png (png-grafik, 1197 auf 645 pixel). [Online]. Available: <https://www.intechopen.com/source/html/17059/media/image50.png>

A Anhang