

Abkürzungsverzeichnis

AWG	American Wire Gauge
BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung
BMS	Battery Management System
CFD	Computational Fluid Dynamics
C-Rate	Charge Rate
DOD	Depth of Discharge
EPS	Electric Power Steering
ERPM	Engine Revolutions per Minute
ESC	Electronic Speed Control
GFK	Glasfaserverstärkter Kunststoff
GUI	Graphical User Interface
HTD	High Torque Drive
IK	Inverse Kinematik
LCD	Liquid Crystal Display
LEV	Light Electric Vehicle
LiPo	Lithium-Polymer
PCB	Protective Circuit Module
Psi	Pounds per Square Inch
RC	Remote Control
RKP	Reverse Kingpin
SOC	State of Charge
UBEC	Universal Battery Elimination Circuit
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
VESC	Vedder Electronic Speed Control

3 Grundlagen eines E-Skateboards

3.1 Mechanischer Aufbau eines Skateboards

In diesem Unterkapitel sollen die gängig verwendeten Komponenten eines Skateboards und deren Bezeichnungen erläutert werden. Im Hinblick auf das geplante Projekt werden zudem die vorteilhaften mechanischen Eigenschaften für höhere Geschwindigkeiten aufgezeigt.

Die Bezeichnungen der meisten Komponenten wurden mit zunehmender Popularität des Rollsports in den 80er Jahren direkt aus dem Englischen in die deutsche Sprache übernommen, weshalb in diesem Kapitel des Grundaufbaus für die einzelnen Bauteile auch die in der Skateboard-Szene üblichen Anglizismen verwendet werden.

3.1.1 Brett

Normalerweise besteht das Brett eines Skateboards (das sogenannte „Deck“) aus sieben Lagen kanadischem Ahornholz. Es wird querverleimt und gepresst, so dass es sowohl stabil als auch flexibel ist. Es ist in drei Bereiche aufgeteilt. Vorne die Nose, hinten das Tail und schließlich die Wheelbase, welche die Länge des Mittelstücks zwischen den Achsen bezeichnet.

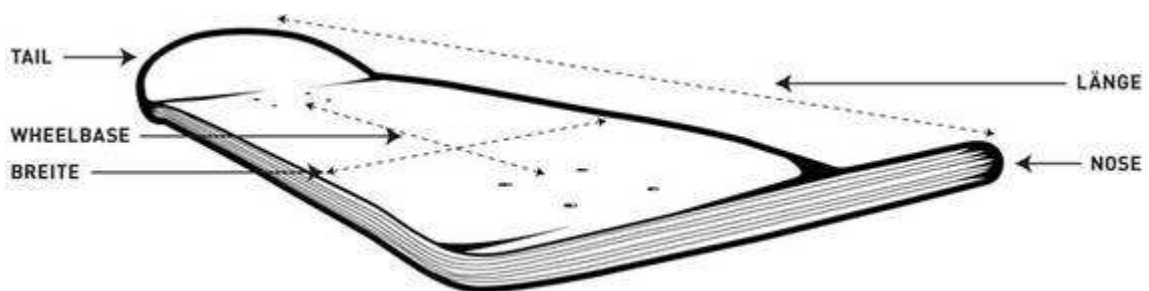


Abbildung 10: Skateboard-Deck [30]

Die üblichen Längen zwischen 28 und 33 Inch können bei höheren Geschwindigkeiten instabil werden, weshalb ein längeres Brett von 36 bis 40 Inch ausgewählt wird. Diese längeren Decks (auch Longboards genannt) gibt es in allen erdenklichen Ausführungen. Für die geplante Anwendung darf das Brett zudem keine Extra-Flexibilität aufweisen, denn auch hier könnte ein Flattern die Sicherheit gefährden.

3.1.2 Achsen

Bei den meisten Achsen handelt es sich Gussachsen aus Aluminium, aber auch das Kaltschmiede-Verfahren oder das CNC-Fräsen kommt zum Einsatz. Die Skateboard-Achsen bestehen immer aus den gleichen, hier dargestellten Einzelteilen.



Abbildung 11: Achsaufbau [31]

Die kleinen Distanzringe, auch Speedrings genannt, werden an den Außenseiten der Kugellager zwischen Hanger und Achsmutter auf den Achsstift gesteckt und sorgen für den freien Lauf der Kugellager. Der Hanger besteht aus diesen zwei Achsstiften und dem Pivot welcher den Drehpunkt der Achse darstellt und in der Baseplate steckt. Je breiter der Hanger ausgeführt ist, desto größer die Stabilität bei höheren

Geschwindigkeiten. Je schmaler desto agiler lässt sich das Board steuern. Auch mit den sogenannten Bushings werden die wesentlichen Fahreigenschaften eingestellt. Je anliegender und restriktiver diese Dämpfungsgummis ausgeführt sind, desto stabiler wird die Achse zu Lasten des Lenkradius. Die Hauptschraube, die Baseplate, Hanger, Bushings und Washer zusammenhält, wird Kingpin genannt. Auch hier kann die Steifigkeit der Achse geringfügig eingestellt werden. Die bereits erwähnten Baseplates als Basis jeder Achse werden mit vier Schrauben an das Deck montiert und können mit unterschiedlichen Winkeln zum Pivot ausgeführt sein.

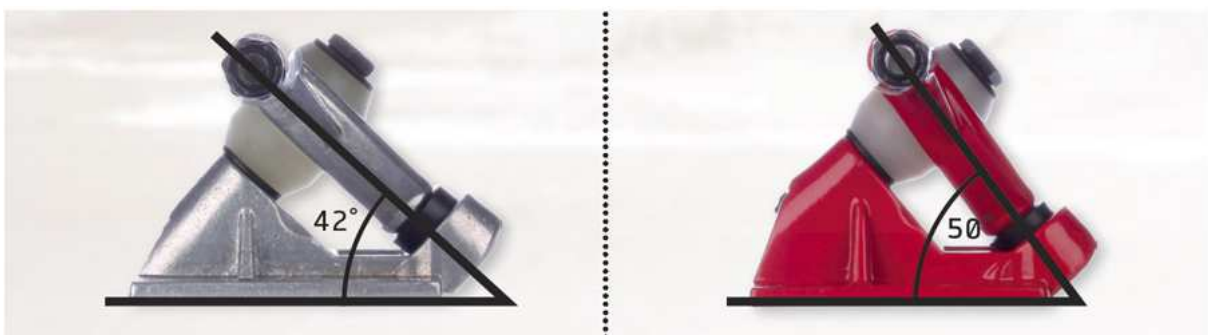


Abbildung 12: Winkel der Baseplate [32]

Je größer der Winkel, desto höher sitzt der Achsstift über dem Deck und desto agiler fährt sich das Board. [33] Da auf jeden Fall ein Antrieb unter das Board muss, wird der Winkel groß und die Achse an sich trotzdem hoch gewählt, um so viel Platz wie möglich zu schaffen. Dies wird durch sehr harte Bushings kompensiert.

3.1.3 Rollen

Die Rollen bzw. deren Eigenschaften beeinflussen das Fahrverhalten stark. Je größer der Rollendurchmesser umso höher ist die Endgeschwindigkeit. Der Härtegrad beeinflusst Haftung, Fahrkomfort und Geschwindigkeit. Ein weiterer Faktor der das Fahrverhalten beeinflusst ist die sogenannte Lip. Damit ist die Ausführung der Rollenkante gemeint. Eine eckige Ausführung bedeutet mehr Haftung, eine Runde fördert das Sliden z.B. beim Carving-Fahrstil (siehe Abbildung 13).

Aufgrund der durchgeführten Recherche sollten die Rollen im Projekt maximalen Grip und vorhersehbares Slide-Verhalten aufweisen. Das bedeutet einen großen Durchmesser mit hartem Kern (Core Wheels) und einen niedrigen Härtegrad (Shore-A-Härte 78-80), da diese Eigenschaften für die notwendige Stabilität bei großen Ge-

schwindigkeiten auf dem rauen Asphalt sorgen. Aus Sicherheitsgründen sollte eine abgerundete Lip gewählt werden, da diese weicher und stufenloser in den Slide geht.



Abbildung 13: Eckige Lip (links) und abgerundete Lip (rechts) [34]

3.1.4 Kugellager, Montagesatz, Dämpfer

Die Kugellager spielen bei Skateboards eine eher untergeordnete Rolle. Mit einem Montagesatz, der aus Schrauben und Mutter besteht, befestigt man die Achsen am Deck. Die Dämpfer (die sogenannten „Shockpads“) bestehen entweder aus Gummi oder Plastik und sind in verschiedenen Höhen und Härten erhältlich. Sie fangen Stöße ab und erhöhen den Abstand zwischen Deck und den Rollen und wirken somit einem gefährlichen Fressen der Rollen am Deck während der Fahrt entgegen.

3.2 Physikalische Systembeschreibung eines E-Skateboards

Für die spätere Auslegung des mechanischen und elektrischen Systems sowie zur Ermittlung der relevanten Systemkennwerte, an die Anforderungen gestellt werden können, werden folgend die Lastgrößen des physikalischen Systems ermittelt.

Die erste Lastgröße des Elektro-Skateboards stellt die Gewichtskraft des gesamten Systems, resultierend aus Skateboard und Fahrer dar.

Gewichtskraft
$$F_G = F_B + F_F = (m_B + m_F) \cdot g \quad (3.1)$$

Die zweite Lastgröße, der gesamte Systemwiderstand F_{ges} wird durch den Fahr- sowie Skateboardwiderstand aufsummiert und besteht aus weiteren Teilwiderständen.

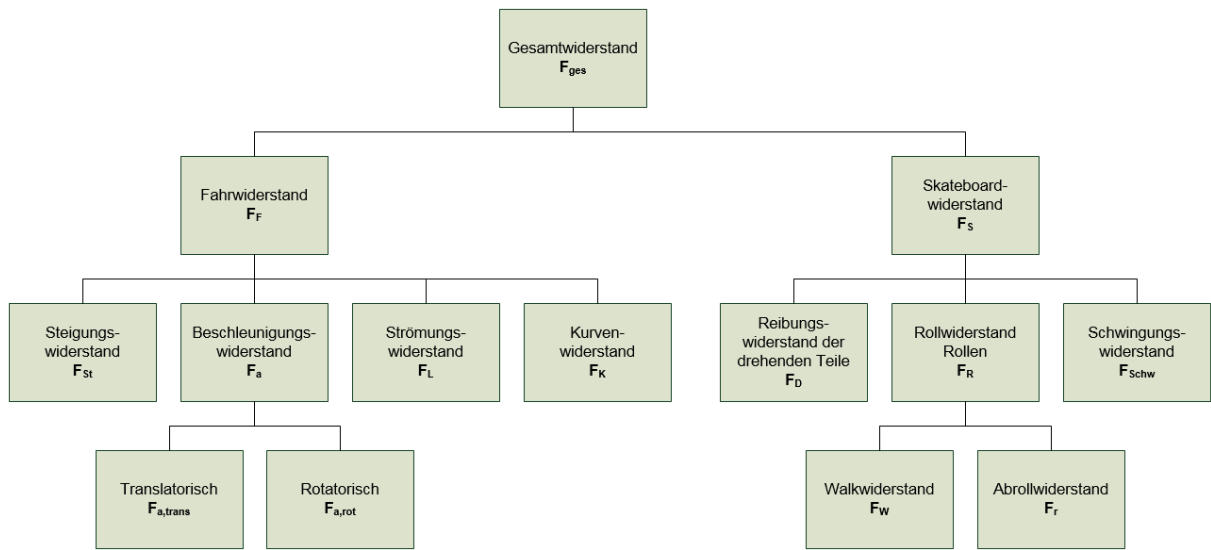


Abbildung 14: Ermittelte Systemwiderstände

Zur ersten zweckmäßigen Auslegung wird später eine stationäre Betrachtung gewählt, wodurch der Beschleunigungswiderstand und der Schwingungswiderstand zu Null gesetzt werden kann. Auch der Kurvenwiderstand und der Walkwiderstand werden zu Null gesetzt. Die hierfür zu Grunde liegenden Annahmen, die entsprechenden Variablen und ihre Bedeutungen werden in Kapitel 6.4.1 aufgezeigt. Für die restlichen Hauptwiderstände des Gesamtsystems gilt:

Strömungswiderstand
$$F_L = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot c_w \cdot v^2 \quad (3.2)$$

Steigungswiderstand
$$F_{St} = F_G \cdot \sin \alpha \quad (3.3)$$

Abrollwiderstand
$$F_R = F_N \cdot k_R = F_G \cdot \sin \alpha \cdot k_R \quad (3.4)$$

An dieser Stelle sollen für die spätere Auslegung noch die gegenseitigen Wechselbeziehungen des Gesamtsystems untersucht werden, wozu auch eine Einbeziehung der Antriebsseite nötig ist. Hierbei werden als Eingabegrößen der Durchmesser der Rollen, die spezifische Drehzahl des Motors, Energiekapazität und Nennspannung des Akkus und der Wirkungsgrad des elektrischen Systems berücksichtigt. Auf der Lastseite wird das Gesamtgewicht von Fahrer und E-Board, die Steigung der Fahrstrecke, die Dichte des Strömungsmediums, dessen Widerstandsbeiwert, die Querschnittsfläche des Bewegungskörpers und der Rollwiderstandsbeiwert einge-

bunden. Berechnet werden daraus die bereits in Formeln dargestellten Kraftgrößen von Strömungswiderstand, Steigungswiderstand und Rollwiderstand.

Durch logische Verknüpfung dieser Formeln werden die Tendenzen der Systemkennwerte des abgegebenen Stroms und der abgegebenen Spannung des Akkus unter Volllast sowie die maximale Beschleunigung, maximale Geschwindigkeit, maximale Fahrzeit und maximale Fahrstrecke festgelegt. Für die Feststellung der Wechselwirkungen ist diese konstante Betrachtungsweise zweckmäßig und ausreichend. Natürlich beeinflussen z.B. häufige Beschleunigungsintervalle die erreichbare Fahrzeit und Fahrstrecke dementsprechend negativ.


<div> TECHNISCHE HOCHSCHULE NÜRNBERG GEORG SIMON OHM</div>				Tendenz und Bewertung													
				Berechnungen / Vorgaben	Formelzeichen	Einheit	Strömungswiderstandskraft	Hangabtriebskraft	Rollwiderstandskraft	Leistung Motor benötigt	Systemkennwerte	Geschwindigkeit max	Beschleunigung max	Strom ab,max	Leistung ab,max	Fahrzeit max	Fahrstrecke max
Steigende	Antriebsgrößen	Formelzeichen	Einheit														
	Durchmesser Rolle	D	mm		↑	→	↑	↑		↑	↓	↑	↑	↓	↓		
	Spezifische Drehzahl Motor	n_s oder kv	1/(minV)		↑	→	→	↑		↑	↓	↑	↑	↓	↓		
	Energiekapazität Akku	E	Wh		→	→	→	→		→	→	→	→	↑	↑		
	Nennspannung Akku	U_{Nenn}	V		→	→	→	→		→	↑	↓	→	↑	↑		
	Wirkungsgrad elektr. System	n	%		→	→	→	↓		→	→	↓	↓	↓	↓		
Sinkende	Lastgrößen	Formelzeichen	Einheit														
	Gesamtgewicht	m	kg		→	↓	↓	↓		→	↓	↓	↓	↑	↑		
	Steigung Fahrstrecke	S	%		→	↓	→	↓		→	↓	↓	↓	↑	↑		
	Dichte Strömungsmedium	ρ	kg/m ³		↓	→	→	↓		→	↓	↓	↓	↑	↑		
	Widerstandsbeiwert	c_w	-		↓	→	→	↓		→	↓	↓	↓	↑	↑		
	Querschnittsfläche Körper	A	m ²		↓	→	→	↓		→	↓	↓	↓	↑	↑		
	Rollwiderstandsbeiwert	c_r	-		→	→	↓	↓		→	↓	↓	↓	↑	↑		

Abbildung 15: Physikalische Wechselbeziehungen

Die Ergebnisse der Untersuchung sind farbig dargestellt. Während ein Pfeil nach oben „steigend“ oder „größer“ und ein Pfeil nach unten „fallend“ oder „kleiner“ charakterisiert, stellt der waagrechte Pfeil „gleichbleibend“ dar. Des Weiteren wurden die Felder grün, rot oder gelb markiert, je nachdem ob die erwartende Veränderung als positiv, negativ oder neutral zu bewerten ist.

Die Übersicht ist von links nach rechts zu lesen und geht immer von einer „steigenden“ oder „größeren“ Veränderung der Antriebsgrößen bzw. von „sinkenden“ oder „kleineren“ Lastgrößen aus. Konkret heißt das z.B. bei der Antriebsgröße „Spezifische Drehzahl“, dass durch eine größere spezifische Drehzahl des Motors eine höhere maximale Geschwindigkeit des gesamten E-Boards möglich ist. Da dies positiv zu bewerten ist, ist das Feld grün hinterlegt.

Steigende				Berechnungen / Vorgaben	Strömungswiderstandskraft	Hangabtriebskraft	Rollwiderstandskraft	Leistung Motor benötigt	Systemkennwerte	Geschwindigkeit max	Beschleunigung max	Strom ab,max	Leistung ab,max	Fahrzeit max	Fahrstrecke max
	Antriebsgrößen	Formelzeichen	Einheit												
	Durchmesser Rolle	D	mm		↑	→	↑	↑		↑	↓	↑	↑	↓	↓
	Spezifische Drehzahl Motor	n_s oder kv	1/(minV)		↑	→	→	↑		↑	↓	↑	↑	↓	↓
	Energiekapazität Akku	E	Wh		→	→	→	→		→	→	→	→	↑	↑

Abbildung 16: Ausschnitt zum Lesebeispiel

Bei höheren Geschwindigkeiten steigt aber auch der Strömungswiderstand und steigt die potentiell benötigte Leistung, die der Motor für die maximale Endgeschwindigkeit aufbringen muss. Folglich muss der Akku mehr Strom und Leistung abgeben (Pfeil nach oben), wodurch sich maximale Fahrzeit und Fahrstrecke verkürzt (Pfeil nach unten). Auch die Beschleunigung sinkt mit steigender spezifischer Drehzahl. Alle diese Auswirkungen sind negativ bewertet, was an dem roten Hintergrund sichtbar wird. Nur den Hangabtrieb bei Steigungen und den Rollwiderstand beeinflusst die spezifische Drehzahl, oder auch Motorkonstante genannt, nicht. Ein waagrechter Pfeil in einem gelben Feld verdeutlicht diese neutrale Beziehung der Größen. Dies lässt sich alles in der gleichen Zeile von Abbildung 16 ablesen.

6.3 Systementwurf

Nach umfassender Grundlagenrecherche (siehe Kapitel 3.2) wird jetzt unter Berücksichtigung der physikalischen und logischen Wirkungsweisen des Systems sowie der definierten Anforderungen ein domänenübergreifendes Lösungskonzept entwickelt. Es sind hierbei eindeutige, reproduzierbare Zusammenhänge zwischen Ein- und Ausgangsgrößen des Gesamtsystems (bzw. der Teilsysteme) zu identifizieren. Diese Zusammenhänge zur Erfüllung einer Aufgabe bilden lösungsneutrale Funktionen. Für die Formulierung der Gesamtfunktion wird zweckmäßigerweise in Bezug auf Energie-, Stoff- und Signalumsatz der vorherrschende Hauptfluss der Anwendung betrachtet.

In nachfolgender Tabelle sind die ermittelten Teilfunktionen des Systems zusammen mit den jeweils als optimal bewerteten Lösungselementen dargestellt. Eine Detailspezifikation findet bei diesem übergeordneten Lösungskonzept noch nicht statt.

Tabelle 2: Teilfunktionen und Lösungselemente

Teilfunktion		Beschreibung	Lösungselement
A	Energie speichern	Im Betrieb	Akkupaket
B	Energie übertragen I	Innerhalb des Systems	Kabel, Steckverbinder
C	Energie übertragen II	Ladebuchse	Stecker/Buchse
D	Signale erzeugen I	Systemansteuerung	ESC
E	Signale erzeugen II	Fahrervorgabe	RC
F	Signal anzeigen	Ladestand Energie	LCD
G	Signale und Energie verwalten I	Schutz des Zellpacks	BMS
H	Signale und Energie verwalten II	Motoransteuerung	ESC
I	Drehmoment erzeugen	Hinterachse	Elektromotor

J	Drehmoment übertragen	Mit Rollen-/Motorritzel	Riemengetriebe
K	Mechanisches System fixieren	An Achsaufhängung	Motorhalterung
L	Komponenten schützen	Unterseite Board	Plastikbox
M	Elektrisches System fixieren	Unterseite Board	Befestigungsband

Im erarbeiteten Systementwurf speichert ein Akkupaket die benötigte Energie und stellt diese nach Bedarf zur Verfügung. Zur zentralen Ansteuerung ist ein elektronischer Geschwindigkeitsregler (ESC) erforderlich. Ein Batteriemanagementsystem schützt und balanciert die Akkuzellen. Die Anforderung der kabellosen Bedienung wird mit einer Funkfernbedienung umgesetzt (RC) und das Drehmoment erzeugt ein passender Elektromotor. Den weiteren Antriebsstrang des Systems bildet eine Riemenübersetzung mit entsprechenden Ritzeln. Abbildung 23 zeigt das Grundschemata.

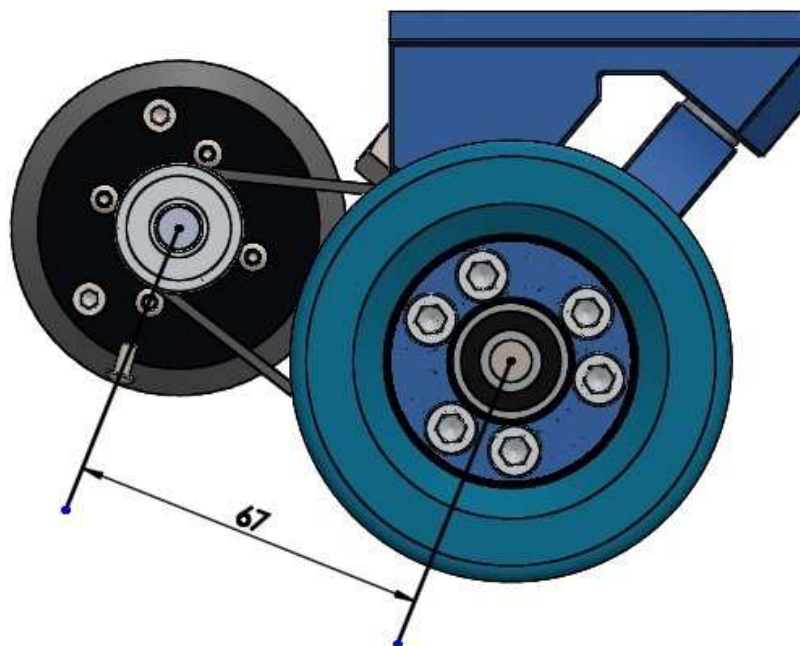


Abbildung 23: Schema Antriebsstrang [36]

Hierzu sind eine Motorhalterung und entsprechende Befestigungspunkte notwendig. Die Energieübertragung von Akku zu Motor wird über Kabel und Steckverbinder realisiert. Auch soll eine Buchse zum Laden direkt am Board in das System implementiert sein. Eine Kunststoffbox sorgt für den Schutz der Elektronik während der Fahrt.

Das ebenfalls aus sehr aussichtsreich eingestufte Konzept des Radnabenmotors scheiterte zum einen an der Anforderung, dass bestehende Komponenten zerstörungsfrei nachgerüstet werden können (z.B. müsste die Achse maschinell bearbeitet werden) und zum anderen am Preislimit von 1000 Euro für das Projekt. Die Entwicklungskosten hierfür würden den Rahmen dieser Arbeit deutlich sprengen.

Aus dem Systementwurf werden nun die Schnittstellen der Domänen abgeleitet:

Tabelle 3: Definierte Schnittstellen nach Domänen

Mechanik	Elektromotor, Grundsystem, Fahrbahn
Elektrotechnik	Elektromotor, Grundsystem
Informationstechnik	Elektromotor, Electronic Speed Control

Unter dem Grundsystem ist in obiger Tabelle das normale Skateboard ohne elektrische Antriebskomponenten zu verstehen. An dieser Stelle wird dieses Grundsystem als gemeinsame Vorgabe für den domänenspezifischen Entwurf festgelegt.

Die Auswahl wurde nach ausführlicher Grundlagenrecherche über die mechanischen Komponenten sowie deren zu bevorzugenden Eigenschaften bei sehr hohen Geschwindigkeiten (in Kapitel 3.1. dargestellt) getroffen.

Tabelle 4: Ausgewähltes Grundsystem

Flexibilität des Boards	Kein Flex	Art der Achse	RKP
Länge des Boards	37 Zoll	Winkel der Achse	50 °
Besonderheiten des Boards	Shape	Hangerbreite der Achsen	180 mm
Rollendurchmesser	83 mm	Höhe der Riserpads	6 mm
Rollenhärte	83 A	Achswinkel	50 °

So wird zum Beispiel auf die oft anzutreffende Flexibilität größerer Skateboards (auch Longboards genannt) verzichtet. Der durch diesen sogenannten Flex des Bretts eintretende Komfort würde bei den anvisierten Projektgeschwindigkeiten ein Flattern hervorrufen und damit die Sicherheit während der Fahrt erheblich senken.

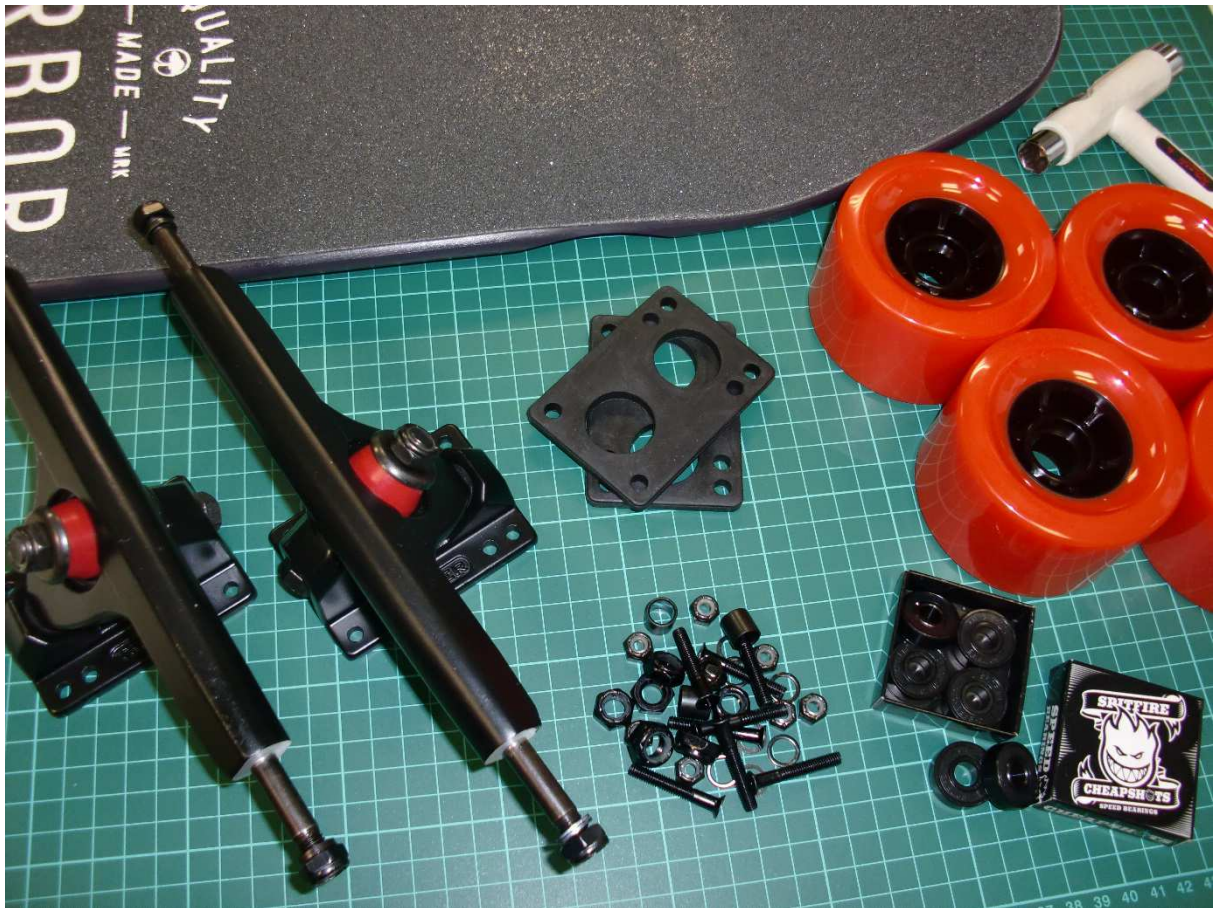


Abbildung 24: Ausgewählte mechanische Komponenten des Grundsystems

6.4 Domänenspezifischer Entwurf

Wie im Grundlagenkapitel 5.1.2 aufgezeigt wird an dieser Stelle auf Basis des gemeinsam entwickelten Systementwurfs eine weitere Konkretisierung des Lösungskonzepts getrennt in den entsprechenden Domänen durchgeführt.

6.4.1 Mechanischer Entwurf

Um das Skateboard in Bewegung zu versetzen, müssen die verschiedenen Systemwiderstände wie Abbildung 14 und Abbildung 25 dargestellt, durch die eingeprägte Kraft des Motors überwunden werden. Für den mechanischen Entwurf wird deshalb die erforderliche Leistung des Motors aus den festgelegten Anforderungen aus Kapitel 6.2 und den Grundlagen aus Kapitel 3.2 ermittelt und anschließend das System weiter ausgelegt. Um die konstante Bewegung des Skateboards zu erreichen wird die Fahrgeschwindigkeit durch eine gleichförmige Antriebskraft, welche exakt die Systemwiderstände überwindet, konstant gehalten. Die Antriebskraft muss also gleich der Summe der Systemwiderstände entsprechen.

$$F_A = F_{ges} \quad (6.1)$$

Da andere Fahrprofile mit Beschleunigungsphasen und positiver Überschusskraft sowie Profile mit Verzögerungsphasen und negativer Überschusskraft für die erste Auslegung nicht betrachtet werden, treten somit auch keine translatorischen oder rotatorischen Beschleunigungswiderstände auf.

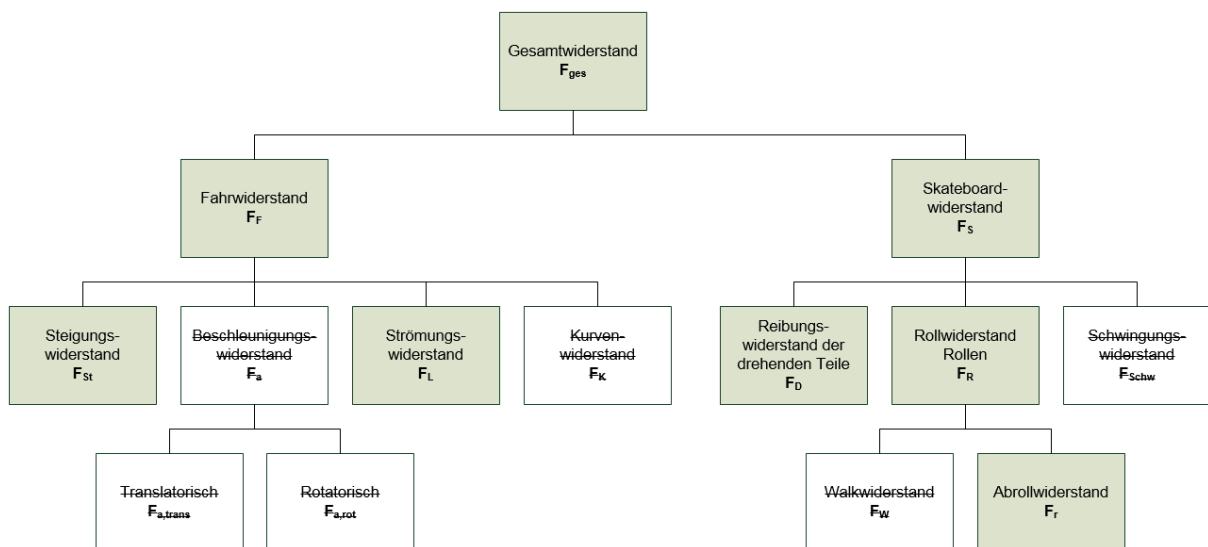


Abbildung 25: Relevante Systemwiderstände

Auch der Kurvenwiderstand wird korrekterweise vernachlässigt, indem von einer geraden, unendlich langen Fahrbahn ausgegangen wird. Der Walkwiderstand, hervorgerufen durch das ständige Verformen des Rades bei Kontakt mit dem Asphalt, ist aufgrund des Vollmaterials der Kunststoffräder (keine Luftfüllung wie beispielsweise bei einem Autoreifen) minimal und wird ebenfalls zu Null gesetzt. Für die Berechnung sind zuerst die Systemwiderstände nach den Formeln in Kapitel 3.2 zu ermitteln. Nachfolgende Tabelle fasst die hierfür als realistisch angenommenen Annahmen für Gleichung (3.1) bis (3.4) zusammen.

Tabelle 5: Physikalische Annahmen

Gewicht Fahrer	110 kg	Dichte von Luft bei 20°C	1,20 kg/m³
Gewicht Skateboard	5 kg	Luftwiderstand c_w Mensch stehend in 45° zur Fahrriichtung	0,78
Steigung	(2 %)	Projizierte Oberfläche des Fahrers	1,00 m²
Wirkungsgrad Motor	95 %	Erdbeschleunigung	9,81 N/m²
Schlupf Antriebsrolle	5 %	Wirkungsgrad Zahnriemenstufe	98 %

Die Größen ergeben sich mit (3.2) bis (3.5) und den Systemanforderungen wie folgt:

$$F_G = F_B + F_F = (m_B + m_F) \cdot g = (105\text{kg} + 5\text{kg}) \cdot 9,81\text{N} / \text{m}^2 = 1079,1\text{N} \quad (6.2)$$

$$F_L = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot c_w \cdot v^2 = \frac{1}{2} \cdot 1,2\text{kg} / \text{m}^3 \cdot 1\text{m}^2 \cdot 0,78 \cdot (8,33\text{m} / \text{s})^2 = 32,5\text{N} \quad (6.3)$$

$$F_{St} = F_G \cdot \sin \alpha = 1079,1\text{N} \cdot \sin 2^\circ = 981,2\text{N} \quad (6.4)$$

$$F_R = F_N \cdot k_R = F_G \cdot \cos \alpha \cdot k_R = 18,5\text{N} \quad (6.5)$$

Der Rollwiderstand wurde mit einem Kraftmesser in einen Zugversuch des bereits bestehenden Grundsystems in der Ebene ermittelt (Ergebnis 6.5). Aufgrund des nicht vorhandenen Reibbeiwertes von Rollengummimischung auf dem Asphalt der Teststrecke erscheint dies am genauesten. Auch der Reibwiderstand der Kugellager $F_{D,KL}$ ist hiermit erfasst.

Um den Widerstand der weiteren drehenden Teile F_D des späteren mechanischen Systems zu berücksichtigen wird für die Riemen- und die Zahnradstufe insgesamt ein Wirkungsgrad von 0,97 (aus $0,98 \cdot 0,99$) angesetzt. Für F_S folgt somit:

$$F_S = F_R \cdot \left(\frac{100}{\eta} \right) = 18,5N \cdot \left(\frac{1}{0,97} \right) = 19N \quad (6.6)$$

Jetzt kann mit (6.3), (6.4) und (6.6) der Gesamtwiderstand ermittelt werden, wobei jedoch die für die Rechnung zunächst nur exemplarisch angenommene Steigung von 2 % wird an dieser Stelle wieder zu Null gesetzt wird.

$$F_{ges} = F_F + F_S = F_{St} + F_L + F_S = 0N + 19N + 32,5N = 51,5N \quad (6.7)$$

Da die Richtung der Kraft mit der Wegrichtung übereinstimmt ergibt sich mit (6.1) und (6.6) eine mechanische Antriebsleistung. Diese resultiert mit dem Wirkungsgrad des Elektromotors von 0,95 und einem an dieser Stelle angenommenen Schlupf von 5 % zwischen Antriebsrolle und Fahrbahn zur elektrischen Antriebsleistung.

$$P_{mech} = F_A \cdot v = 51,5N \cdot 30km/h \cdot \frac{1000}{3600} = 429,2W \quad (6.8)$$

$$P_{el} = P_{mech} \cdot \left(\frac{100}{\eta_M \cdot \eta_S} \right) = 429,2W \cdot \left(\frac{1}{0,95 \cdot 0,95} \right) = 475,6W \quad (6.9)$$

Der Elektromotor muss also, um die angestrebte Endgeschwindigkeit zu halten, ungefähr 475 Watt leisten. Dass beim Anfahren bzw. Beschleunigen höhere Leistungen erforderlich sind, muss bei der Auswahl des Motors noch berücksichtigt werden.

Es folgen weitere Berechnungen zur Auslegung des mechanischen Systems. Am effizientesten arbeitet ein Elektromotor, wenn er sich so schnell wie möglich mit geringem Drehmoment dreht (Wicklungsverluste sind im Quadrat proportional zum ausgegebenen Drehmoment und dominieren bei niedrigen Drehzahlen und hoher Last). Gleichzeitig aber sollte er sich aber nicht zu schnell drehen, da bei sehr hohen Drehzahlen weitere Verluste exponentiell ansteigen. Für 50-60 mm Außenläufer-Motoren stellt die maximale elektrische Drehzahl von 60000 min^{-1} einen guten Erfahrungswert für die Maximalgeschwindigkeit dar. [37] Teilt man die elektrische Drehzahl durch die Polpaarzahl, erhält man die maximale mechanische Drehzahl des Motors. Bei 50-60 mm Außenläufern (größere Motoren passen nicht unter das Board,

kleinere sind ineffizienter bzw. schwächer) mit ihren typischerweise 7 Polpaaren sind das ungefähr 8550 min^{-1} . Ausgehend von der gewünschten Maximalgeschwindigkeit und dem bereits gewählten Rollendurchmesser ergibt sich die ideale Übersetzung.

$$i = \frac{d \cdot \pi \cdot n_{\text{mech}}}{v} = \frac{0,083 \cdot \pi \cdot (8600/60) \cdot 3,6}{30 \text{ km/h}} = 4,5 \quad (6.10)$$

Die Zähnezahl des Radritzels sollte also möglichst groß und die des Motorritzels möglichst klein sein. Das kleinste Motorritzel, dass die gängige Forderung der 6 sich im Eingriff befindlichen Zähne bei HTD-Riemengetrieben (und weiter Randbedingungen, siehe Abbildung 26) erfüllt, hat 15 Zähne. Beim Radritzel ist eine steigende Zähnezahl mit steigendem Durchmesser verknüpft und ist so ebenfalls durch den Rollendurchmesser und den Abstand zur Fahrbahn limitiert, weshalb eine Übersetzung von $i = 2,67$ gewählt werden muss. Das Radritzel hat hierbei 40 Zähne. Mit obiger Formel ergibt sich für 30 km/h zurückgerechnet eine Drehzahl von 5120 min^{-1} .

Aus Sicht des Geschwindigkeitscontrollers mit seinen MOSFETs sollte die Betriebsspannung so hoch wie möglich bei so geringen Strömen wie möglich liegen, da die Widerstandsverluste quadratisch proportional zu den Strömen steigen. Zugleich steigt aber die Problematik in der Schaltungselektronik auf dem Controller bei zu hoher Betriebsspannung. Spannungen bei ca. 60 V stellen einen guten Kompromiss dar [37]. Da vorliegendes Projekt in Bezug auf Gewicht und Kosten limitiert ist, soll zulasten der Effizienz das System bei $U_{\text{max}} = 30 \text{ Volt}$ betrieben werden. Mit der maximalen Spannung und der mechanischen Drehzahl kann die erforderliche Motorkonstante des Elektromotors bestimmt werden.

$$n_s = \frac{n_{\text{mech}}}{U_{\text{max}}} = \frac{5120 \text{ min}^{-1}}{30 \text{ V}} = 171 \frac{1}{(\text{V} \cdot \text{min})} \quad (6.11)$$

Die Kennwerte zur Auslegung des mechanischen Systems stehen damit fest. Wie bereits erwähnt handelt es sich hierbei bezüglich der Effizienz nicht um Idealwerte. Die bisher dargestellten Berechnungen führen bei der Systemintegration mit den anderen Domänen unter ständiger Eigenschaftsabsicherung mit den Anforderungen nach mehreren iterativen Schleifen zur in Tabelle 6 dargestellten Auswahl. Hierzu wurden bereits auch die am Markt erhältlichen Komponenten berücksichtigt.

Tabelle 6: Technische Systemauslegung

Zähnezahl Rollenritzel	40 (36)	Spannung Akku U_{nom}	25,9 V
Zähnezahl Motorritzel	15 (14,13)	Kapazität Akku Q_{ges}	10 Ah
Motorkonstante	190 1/(minV)	Energiegehalt Akku E	259 Wh
Fahrspannung Akku U_{Fahr}	21,7-29,4 V	Grundstromverbrauch	0,5 A

Die Fahrspannung variiert in Folge des Ladestands der Einzelzellen (3,1-4,2 V). Dabei wurde eine 7s-Konfiguration der Akkuzellen gewählt. Der dauerhaft notwendige Betriebsstrom der Boardelektronik wird über einen Grundstromverbrauch berücksichtigt. Die Zähnezahlen in Klammern werden zur späteren Optimierung der Fahreigenschaften ausgewählt. Der für die Auslegung (Tabelle 6) notwendige Berechnungszyklus umfasst die nachfolgend dargestellten Formeln (6.12) bis (6.18). An seinem Ende stehen die Kennwerte des Gesamtsystems aus der Anforderungsliste.

$$E_{nom} = U \cdot I \cdot t = U_{ges} \cdot Q_{ges} = 3,7V \cdot 7_{seriell} \cdot 10Ah = 259Wh \quad (6.12)$$

$$n_{Motor} = U_{nom} \cdot n_s = 25,9V \cdot 190 \frac{1}{min \cdot V} = 4921 min^{-1} \quad (6.13)$$

$$n_{Rad} = U_{nom} \cdot n_s \cdot \frac{Ritzel_{Motor}}{Ritzel_{Rad}} = 25,9V \cdot 190 \frac{1}{min \cdot V} \cdot \frac{15}{40} = 1845 min^{-1} \quad (6.14)$$

$$I = \frac{P_{el}}{U_{nom}} + I_{Grund} = \frac{475,6W}{25,9V} + 0,5A = 18,9 A \quad (6.15)$$

$$t = \frac{E}{P} = \frac{Q \cdot U_{nom}}{I \cdot U_{nom}} = \frac{Q}{I} = \frac{10Ah}{18,9A} \cdot 60 \frac{min}{h} = 32 min \quad (6.16)$$

$$v = d_{Rad} \cdot \pi \cdot n_{Rad, max} = 83mm \cdot \frac{1}{1000000} \cdot \pi \cdot 2094 min^{-1} \cdot 60 = 32,76 km/h \quad (6.17)$$

$$s = v \cdot t = v \cdot \frac{Q}{I} = 32,76 km/h \cdot \frac{10Ah}{18,9A} = 17,3km \quad (6.18)$$

Die Kennwerte des Systems (6.16) bis (6.18) wurden hier wie Eingangs erläutert im gewählten stationären Zustand, also konstanter Endgeschwindigkeit und mit der

Nominalspannung des Akkus errechnet (die Nominalspannung von 25,9 V bildet gut das Mittel des Ladestands über die Betriebsdauer ab). Die Endgeschwindigkeit selbst wurde aber logischerweise mit der maximalen Spannung berechnet.

Jetzt kann der Riemen ausgelegt werden. Dies geschieht zweckmäßig mit einer On-line-Anwendung der Firma Mädlar. [38] So wird das Riemenprofil HTD5M, eine Riemenbreite von 9 mm und eine Riemenlänge von 285 mm ermittelt.

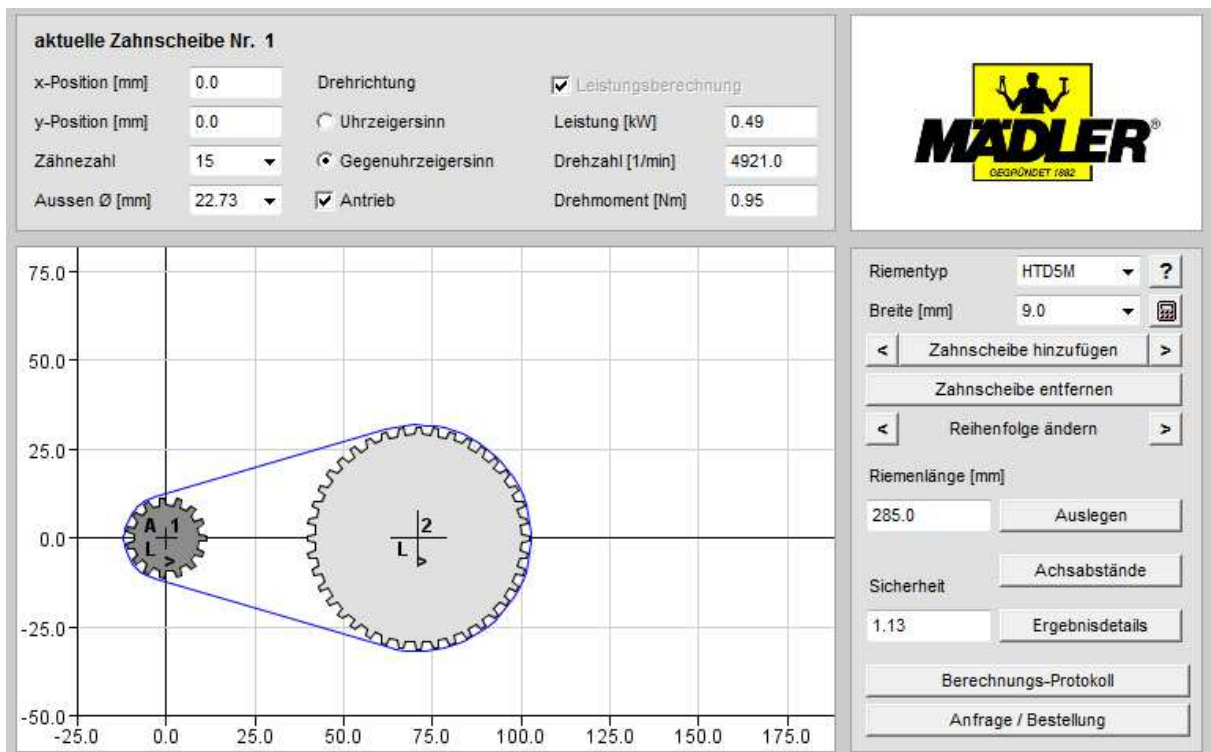


Abbildung 26: Mädlar Riemenauslegung

Scheibe Nr.	Zähnezahl	eingreifende Zähnezahl	Drehzahl [1/min]	Leistung [kW]	Drehmoment [Nm]	übertragbare Leistung [kW]	Sicherheit
1	15	6	4921.0	0.49	0.95	0.55	1.13
2	40	23	1845.38	0.49	2.54	0.91	1.85

Abbildung 27: Sicherheitsberechnung

Abschließend können die physikalischen Wechselbeziehungen aus Kapitel 3.2 nach den nun neu gewonnenen Erkenntnissen weiter vervollständigt werden. Die Tabelle wurde um die Zähnezahlen von Motor- und Rollenritzel (bzw. Drehzahlen von Motor und Antriebsrolle) und um die Fahrspannung (entspricht dem jeweiligen Ladezustand des Akkus) ergänzt.

				Tendenz und Bewertung												
				Berechnungen / Vorgaben	Formelzeichen	Einheit										
					$F_{\text{Ström}}$	$F_{\text{Hangabtrieb}}$	$F_{\text{Rollwiderstand}}$	U_{Motor}	U_{Rolle}	P_{er}	Formelzeichen	Einheit	v_{max}	a_{max}	$I_{\text{ab,max}}$	$P_{\text{ab,max}}$
													km/h	m/s ²	A	W
																min
																km
Steigende	Antriebsgrößen	Formelzeichen	Einheit		Strömungswiderstandskraft	Hangabtriebskraft	Rollwiderstandskraft	Drehzahl Motor	Drehzahl Rolle	Leistung Motor benötigt	Systemkennwerte		Geschwindigkeit max	Beschleunigung max	Strom ab,max	Leistung ab,max
	Durchmesser Rolle	D	mm		↑	→	↑	→	→	↑		↑	↓	↑	↑	↓
	Zähnezah Rollenritzel	n_1	1		↓	→	→	→	↓	↓		↓	↑	↓	↓	↑
	Zähnezah Motorritzel	n_2	1		↑	→	→	→	↑	↑		↑	↓	↑	↑	↓
	Spezifische Drehzahl Motor	n_s oder kv	1/(minV)		↑	→	→	↑	↑	↑		↑	↓	↑	↑	↓
	Energiekapazität Akku	E	Wh		→	→	→	→	→	→		→	→	→	→	↑
	Nennspannung Akku	U_{Nenn}	V		→	→	→	→	→	→		→	↑	↓	→	↑
	Fahrspannung	U_{Fahr}	V		↑	→	→	↑	↑	↑		↑	↑	↑	↑	↓
	Wirkungsgrad elektr. System	n	%		→	→	→	→	→	↓		→	→	↓	↓	↓
Sinkende	Lastgrößen	Formelzeichen	Einheit													
	Gesamtgewicht	m	kg		→	↓	↓	→	→	↓		→	↓	↓	↓	↑
	Steigung Fahrstrecke	S	%		→	↓	→	→	→	↓		→	↓	↓	↓	↑
	Dichte Strömungsmedium	ρ	kg/m ³		↓	→	→	→	→	↓		→	↓	↓	↓	↑
	Widerstandsbeiwert	c_w	1		↓	→	→	→	→	↓		→	↓	↓	↓	↑
	Querschnittsfläche Körper	A	m ³		↓	→	→	→	→	↓		→	↓	↓	↓	↑
	Rollwiderstandsbeiwert	c_r	1		→	→	↓	→	→	↓		→	↓	↓	↓	↑

Abbildung 28: Erweiterte physikalische Wechselbeziehungen

Wieder stellt ein Pfeil nach oben „steigend“ oder „größer“ und ein Pfeil nach unten „fallend“ oder „kleiner“ dar, ein waagrechte Pfeil „gleichbleibend“ dar. Die Felder sind grün, rot oder gelb markiert, je nachdem ob die erwartende Veränderung als positiv, negativ oder neutral zu bewerten ist. Die Übersicht ist von links nach rechts zu lesen und geht immer von einer „steigenden“ oder „größeren“ Veränderung der Antriebsgrößen bzw. von „sinkenden“ oder „kleineren“ Lastgrößen aus.

Beispielsweise heißt eine steigende Fahrspannung, dass die maximale Fahrzeit sinkt (Pfeil nach unten), was als negativ zu bewerten ist (Kästchen rot hinterlegt).

6.4.2 Elektrotechnischer Entwurf

Die Domänen Mechanik, Elektrotechnik und Informationstechnik lassen sich nur unscharf voneinander trennen bzw. üben eine gewissen Wechselwirkung auf einander aus, so wurden bereits beim erstellten, rein mechanischen Entwurf automatisch elektrotechnische Festlegungen getroffen. Damit und mit den Systemanforderungen wird an dieser Stelle die Verkabelung entworfen.

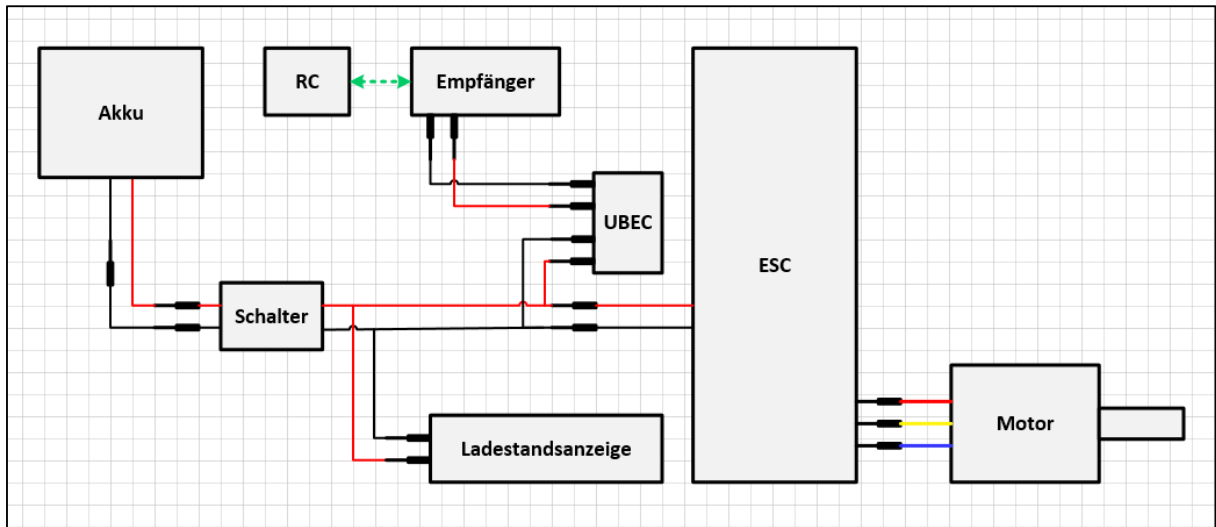


Abbildung 29: Verkabelungsentwurf

Die Abbildung zeigt den ersten Entwurf. Er besteht aus den gewählten Teilfunktionslösungen (Kapitel 6.3) für die entsprechenden Aufgaben des Systems. Der Akku wird über einen Hauptschalter dem ESC zugeschaltet, welches die drei Phasen des Motors ansteuert. Der zusätzlich vorgesehene UBEC (Universal Battery Elimination Circuit) ist eine elektronische Spannungsregelung und ersetzt bzw. „eliminiert“ einen zweiten Akku, indem er die Eingangsspannung auf die konstante Betriebsspannung des Empfängers umwandelt. Fernbedienung (RC) und Empfänger kommunizieren per Funk. Die Schnittstelle zur Mechanik bildet der Elektromotor, die Schnittstelle zur Informationstechnik der Geschwindigkeitsregler. Durch die parallel verschaltete Ladestandsanzeige soll eine leichte Überwachung möglich und somit eine Tiefentladung des Akkus verhindert werden.

Bei der Eigenschaftsabsicherung im späteren Systemintegrationsprozess wurden bei vorliegender Variante jedoch einige entscheidende Nachteile festgestellt. Das im Ladegerät vorgesehene BMS macht das Ladegerät zum einen sehr teuer und zum anderen balanciert es die Zellen nur beim Laden, nicht beim Entladen. Außerdem ist

die Ausführung des Schalters relativ teuer, da er funkenfrei die hohen Spannungen schalten muss (Anti-Spark-Switch). Die typischen ESC's aus dem Modellbau z.B. für Helikopter sind zudem nicht bzw. nur sehr schlecht für Lasten von 110 kg geeignet.

Nach mehreren iterativen Schleifen in Abstimmung mit den anderen Domänen wurde das elektrische Konzept nach Abbildung 30 gewählt. Diese Verkabelung auf elektrotechnischer Ebene als Ergebnis der später folgenden Systemintegration bzw. Eigenschaftsabsicherung soll bereits an dieser Stelle erläutert werden.

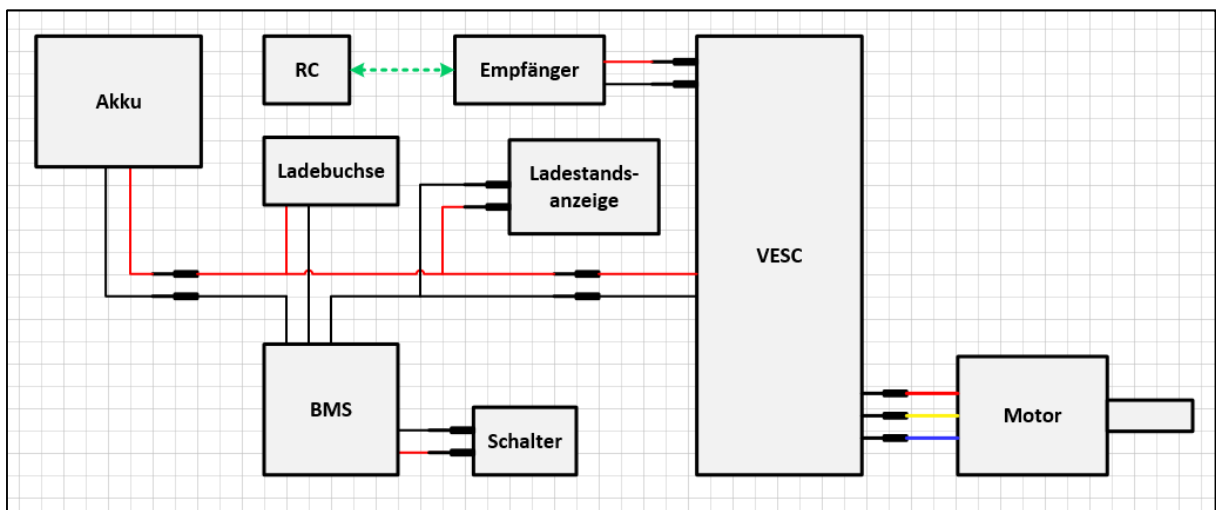


Abbildung 30: Finale Verkabelung

Das BMS ist nun direkt Teil der Boardelektronik und wird zwischen Akku und Geschwindigkeitsregler geschaltet. Diese „Profi-Variante“ sorgt für die Überwachung und den Schutz der Akkuzellen beim Be- und Entladen. Somit kann ein einfaches Ladegerät verwendet werden. Zudem bietet das integrierte BMS eine Anschlussmöglichkeit für einen indirekten Schalter - der teure Anti-Spark-Switch entfällt. Die Ladestandsanzeige zur Überwachung ist nun (BMS schaltet bei unterer Spannungsgrenze automatisch ab) nicht mehr zwingend erforderlich und kann optional zum Anstecken ausgeführt sein. Da Akku auch direkt im System geladen werden soll wurde zusätzlich eine Ladebuchse integriert. Neues Kernstück bildet ein eboard-spezifisch entwickelter Open-Source-Controller, der sogenannte VESC (Vedders Electronic Speed Controller). Er wurde seit dem ersten PCB-Layout Ende 2014 kontinuierlich bis heute von Benjamin Vedder weiterentwickelt. Hard- und Software sind frei zugänglich. Mit seinem Funktionsumfang und Leistungseigenschaften bildet er den aktuellen Stand der E-Board Regelungstechnik ab.

- The hardware and software is open source. Since there are plenty of CPU-resources left, the customization possibilities are almost endless.
- **STM32F4** microcontroller.
- DRV8302 MOSFET driver / buck converter / current shunt amplifier.
- IRFS7530 MOEFETs (other FETs in the same package also fit).
- 5V 1A output for external electronics from the buck converter integrated on the DRV8302.
- Voltage: **8V – 60V** (Safe for 3S to 12S LiPo).
- Current: Up to 240A for a couple of seconds or about **50A continuous** depending on the temperature and air circulation around the PCB.
- Sensored and sensorless FOC with **auto-detection of all motor parameters** implemented.
- Firmware based on **ChibiOS/RT**.
- PCB size: slightly less than 40mm x 60mm.
- Current and voltage measurement on all phases.
- **Regenerative braking.**
- DC motors are also supported.
- Sensored or sensorless operation.
- A **GUI with lots of configuration parameters** (for Windows, OSX und Linux)
- Adaptive PWM frequency to get as good ADC measurements as possible.
- RPM-based phase advance (or timing/field weakening).
- Good start-up torque in the sensorless mode (and in the sensored mode as well).
- The motor is used as a tachometer, which is good for odometry on modified RC cars.
- Duty-cycle control, speed control or current control.
- Seamless 4-quadrant operation.
- Interface to control the motor: PPM signal (RC servo), analog, UART, I2C, USB, CAN-bus.
- **Wireless wii nunchuk** (Nyko Kama) control through the I2C port.
This is convenient for electric skateboards.
- Consumed and regenerated amp-hour and watt-hour counting.
- Optional PPM signal output.
Useful when e.g. controlling an RC car from a raspberry pi or an android device.
- The **USB port** uses the modem profile, so an Android device can be connected to the motor controller without rooting. Because of the servo output, the odometry and the extra ADC inputs (that can be used for sensors), this is perfect for modifying an RC car to be controlled from Android (or raspberry pi).
- Adjustable protection against
 - Low input voltage
 - High input voltage
 - High motor current
 - High input current
 - High regenerative braking current (separate limits for the motor and the input)
 - Rapid duty cycle changes (ramping)
 - High RPM (separate limits for each direction).
- When the current limits are hit, a soft back-off strategy is used while the motor keeps running.
If the current becomes way too high, the motor is switched off completely.
- The RPM limit also has a soft back-off strategy.
- Commutation works perfectly even when the speed of the motor changes rapidly.
This is due to the fact that the magnetic flux is integrated after the zero crossing instead of adding a delay based on the previous speed.
- When the motor is rotating while the controller is off, the commutations and the direction are tracked. The duty-cycle to get the same speed is also calculated.
This is to get a smooth start when the motor is already spinning.
- Sensored and sensorless **field-oriented-control (FOC)** is fully implemented since FW 2.3

Abbildung 31: Technische Spezifikationen VESC [39]

Wie aus den technischen Spezifikationen hervorgeht ist der VESC mit einem Abwärtswandler ausgestattet, weshalb der RC-Empfänger direkt angeschlossen werden kann. Auch kann er durch die offene Programmierschnittstelle, die bereits auf gängigen Betriebssystemen funktioniert, durch das „BLDC-Tool“ manipuliert werden. Nachfolgendes Schema zeigt einen Auszug aus dem Stromlaufplan des VESC (vollständiger Plan siehe Anhang B auf CD). Damit steht der elektrotechnische Entwurf.

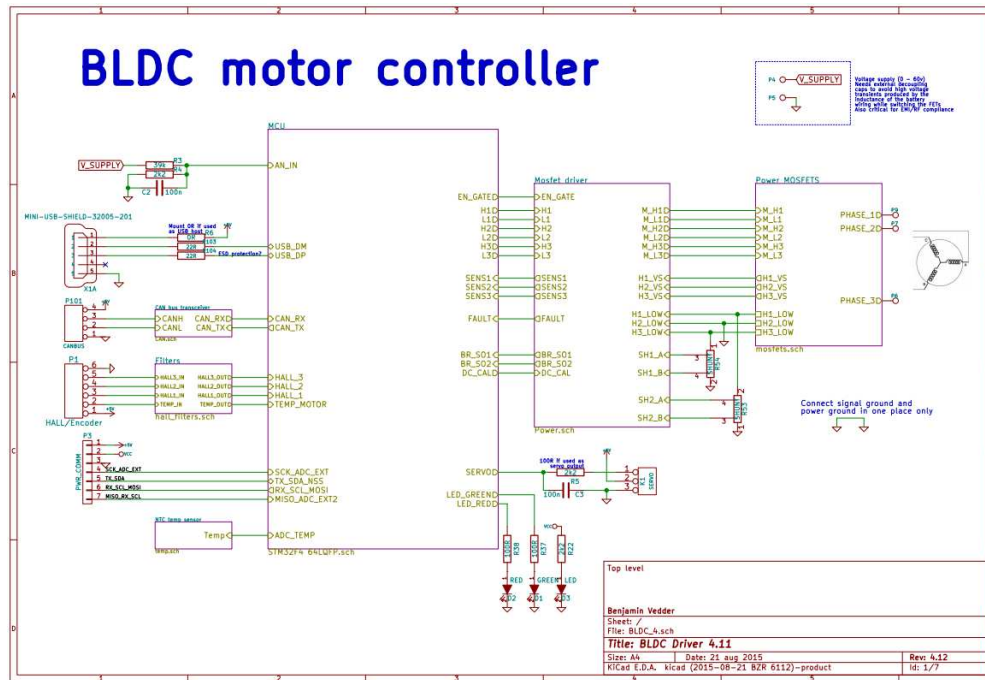


Abbildung 32: Auszug Controller-Schemata [39]

6.4.3 Informationstechnischer Entwurf

Der Code für die die Firmware des Controllers als auch für die grafische Benutzeroberfläche (GUI) ist, wie bereits erwähnt, open-source und kann direkt als informationstechnischer Entwurf gesehen werden (siehe Anhang C auf CD).

6.5 Systemintegration

Bei der nun folgenden Systemintegration werden die domänenspezifischen Entwürfe unter fortwährender Eigenschaftsabsicherung zusammengeführt. Teilweise wurde die Dokumentation dieser Phase schon in den vorherigen Kapiteln integriert, indem jeweils auch schon das Endergebnis der Domäne dargestellt wurde. An dieser Stelle bietet sich als Teil der Modellbildung und -analyse die Modellierung bzw. Abbildung der Anforderungskennwerte (Endgeschwindigkeit, Reichweite, Fahrdauer etc.) des

ermittelten Gesamtsystems vor dem eigentlichen Produktaufbau z.B. mit dem Werkzeug Matlab/SIMULINK an. Auf die Durchführung und Darstellung dieser geplanten Modellierung wird hier aufgrund des zeitlich begrenzten Rahmens verzichtet.

6.6 Produktauswahl und Montage

In diesem Kapitel wird die konkrete Produktauswahl aus den domänenspezifischen Entwürfen bzw. der Systemintegration vorgestellt. Eine Detailerklärung zur jeweiligen Auswahl würde an dieser Stelle bzw. in diesem Kapitel aber den Rahmen sprengen.

Tabelle 7: Komponenten des Antriebsstrangs

Antriebsstrang		
Pos.	Komponente	Bezeichnung
1	Elektromotor	Enertion r-spec 2.0 Electric Motor
2	Zahnriemen	HTD 280-5M-9, HTD 295-5M-9
3	Motorritzel	Motor Pulley Performance Set 13t/14t/15t
4	Radritzel	Rollenritzel Set ABS-30M 36t/40t
5	Motorhalterung	Motor mount DIYSkateboard
6	Diverse Kleinteile	Schrauben, Muttern, Passfedern, Connectoren



Abbildung 33: Übersicht der mechanischen Komponenten

Die beiden großen Rollenritzel und die Konterstücke konnten per Rapid Prototyping an der Technischen Hochschule auf dem Fabrikat FDM 400 mc und dem Material ABS-M30 ausgedruckt werden. Das Material der Rollenritzel (3D-Druck) weist eine Formbeständigkeit von 96°C und eine Rockwellhärte von 109,5 auf. ABS weist bei den identischen Eigenschaften 83-101°C bzw. 97-115 HRC auf (4,6 bar sind 66 psi).

Eigenschaften	ABS	ABSi	ABS plus	ABS-M30	ABS-M30i	PC/ABS	PC	PC ISO	PPSU
Materialbezeichnung	Acrylnitril-Butadien-Styrol-Copolymerisat	Methyl-Methacrylat-Acrylonitril-Butadien-Styrol	Acrylnitril-Butadien-Styrol-Copolymerisat	Acrylnitril-Butadien-Styrol-Copolymerisat	Methyl-Methacrylat-Acrylonitril-Butadien-Styrol	Polycarbonat/ABS-Blend	Polycarbonat	Polycarbonat	Polyphenylensulfon
Zugfestigkeit in N/mm ² ASTM D638	22	37	36	36	36	41	68	52	55
Zug-Elastizitäts-Modul in N/mm ² ASTM D638	1627	1915	2272	2413	2413	1917	2280	1744	2068
Biegefestigkeit in N/mm ² ASTM D790	41	61	52	61	61	68	104	82	110
Biege-Elastizitäts-Modul in N/mm ² ASTM D790	1834	1820	2204	2317	2317	1931	2234	2193	2206
IZOD-Kerbschlagzähigkeit in J/m ASTM D256	107	101	96	139	139	196	53	53	59
IZOD-Schlagzähigkeit in J/m ASTM D256	214	219		283	283	481	320	480	166
Formbeständigkeit in der Wärme in °C D648 bei 4,6 bar	90	87	96	96	96	110	138	133	189 bei 18,2bar
Dichte in g/cm ³ ASTM D792	1.05	1.08	1.04	1.04	1.04	1.2	1.2	1.2	1.28
Dehnung in % ASTM D638	6	3.1	4	4	4	6	4.8	5	3
Entflammbarkeit in mm UL 94				HB 0.85	HB 0.85	HB 0.85	V2, 1.1		V0, 3.2
Rockwell-Härte ASTM D785	R 105	R 108		R 109.5	R 109.5	R 110	R 115		M86

Abbildung 34: Datenblatt ABS-M30 [Quelle:Fakultät]

Hardness	Nominal Value Unit	Test Method
Rockwell Hardness		
73°F	97 to 115	ASTM D785
73°F	95 to 117	ISO 2039-2
Ball Indentation Hardness	10700 to 16100 psi	ISO 2039-1
Thermal	Nominal Value Unit	Test Method
Deflection Temperature Under Load		
66 psi, Unannealed	179 to 213 °F	ASTM D648
66 psi, Unannealed	161 to 222 °F	ISO 75-2/B
66 psi, Annealed	210 to 217 °F	ASTM D648
66 psi, Annealed	185 to 228 °F	ISO 75-2/B
264 psi, Unannealed	166 to 213 °F	ASTM D648
264 psi, Unannealed	161 to 212 °F	ISO 75-2/A
264 psi, Annealed	185 to 212 °F	ASTM D648
264 psi, Annealed	193 to 214 °F	ISO 75-2/A
Continuous Use Temperature	140 to 167 °F	ASTM D794
Glass Transition Temperature ³	220 °F	ISO 11357-2 ²

Abbildung 35: Auszug der typischen Eigenschaften von ABS [40]

Damit erreicht der gedruckte Kunststoff die gleichen Materialeigenschaften wie typischerweise hergestelltes ABS. Härte und Formbeständigkeit sind daher für die vorliegende Anwendung im Riemengetriebe geeignet.

Nachstehende Abbildung zeigt die Motorhalterung im Detail. An ihr lassen sich verschiedene Motorendurchmesser über einen variablen Achsabstand mit der Fahrachse befestigen. Die dunkelblau eingefärbte Komponente ist der Achsadapter passend zum ausgewählten „Caliber“-Modell der Achse.

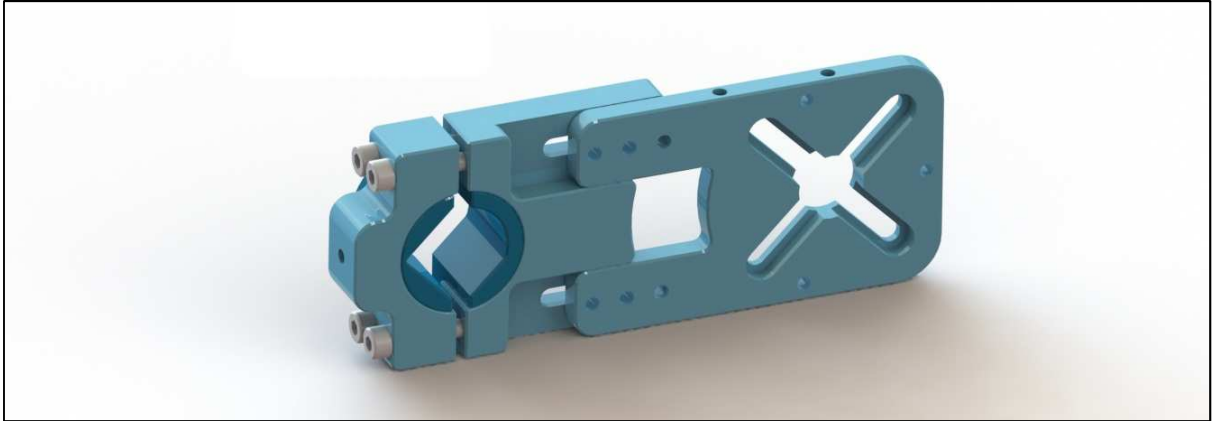


Abbildung 36: Motorhalterung im Detail [41]

Zunächst wird die Halterung auf der Achse montiert, dann der Motor angeschraubt, die Passfeder eingesetzt und das Motorritzel befestigt. Das Radritzel jetzt an das Rad geschraubt und mit dem Riemen auf die Achse geschoben. Um den Achsabstand (Riemenspannung) zu justieren kann auch der Kingpin gelöst werden.



Abbildung 37: Montierter Antriebsstrang

Tabelle 8 zeigt die ausgewählten Komponenten der Boardelektronik. Diese wurden nach umfassender Recherche und den Ergebnissen des mechanischen und elektrischen Entwurfs zueinander passend abgestimmt. Beim Elektromotor [REDACTED] [REDACTED] Als entscheidende Kennwerte wurden Leistung, Motorkonstante, Stromtragfähigkeit, Wellendurchmesser, Gewicht, Wellennut, Sensoren und schließlich der Preis gewählt.

Tabelle 8: Elektronik-Komponenten

Boardelektronik		
Pos.	Komponente	Bezeichnung
1	Elektromotor	Enertion r-spec 2.0 Electric Motor
2	Akkupack	Alien 7S 10000mah 35C Lipo
3	Batteriemanagementsystem	HCX-D223 7S-50A
4	Ladestandsanzeige	Baiway BW-LY5 V6
5	Motorcontroller	VESC HW4.10 FW2.10
6	Fernbedienung und Receiver	Nyko Wireless Kama Nunchuck Nintendo Wii
7	Receiveranschlusskabel	Micro Stecker 2.0mm 6-Pin (JST PH)
8	Ladegerät	Ansmann Energy LCS 3-7
9	Niedervolt-Kabel	BKL Electronic DC-3F245-XL
10	Hochstrom-Stecker	Nylon XT60
11	Standardkabel	AWG12 Wire
12	Schutzhülle	Orico PHX-35 3,5" HDD enclosure
13	Kleinteile	On-Off-Schalter, Schrumpfschläuche, etc.

Für die Fernbedienung wurde aufgrund der Größe der Kama Nunchuck (Nintendo Wii) ausgewählt. Für den Betrieb sind kleine Modifikationen notwendig.



Abbildung 38: Kama Nunchuck und zerlegter Wii-Receiver (Pos. 6)

Zuerst wird der Empfänger, der normalerweise an die Wii angeschlossen wird, geöffnet. Die Plastikhülle wird dabei i.d.R. zerstört. Die kleine Platine auf dem rechten Bild muss mit dem JST-PH Stecker (Pos.7), gemäß untenstehender Zeichnung neu verlötet werden. Die Platine mit dem Stecker kann direkt an den UART-Anschluss des VESC angeschlossen werden. [42]

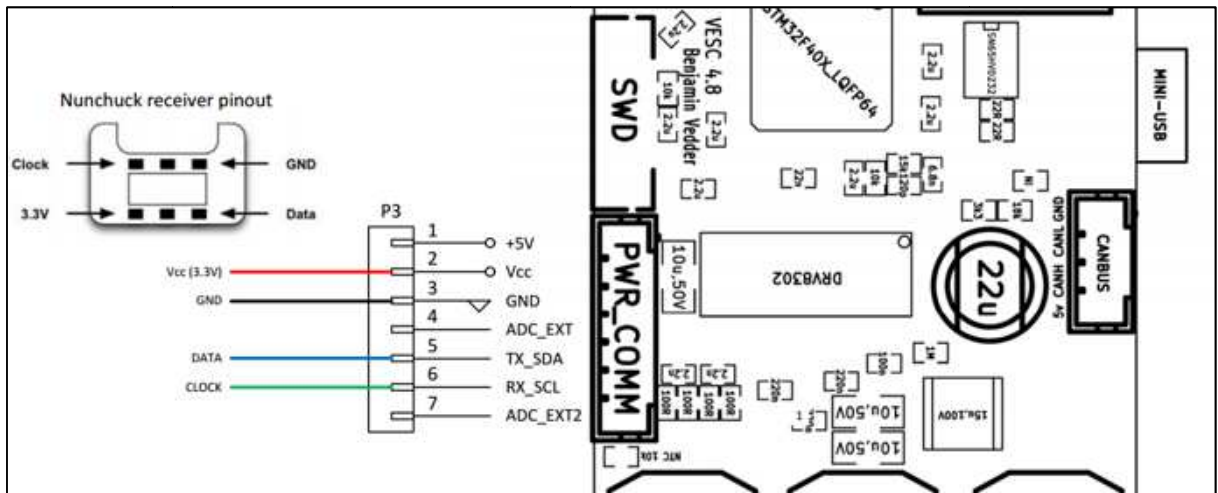


Abbildung 39: Verkabelungsskizze VESC und KAMA Nunchuck [42]

Die Verbindungen am Receiver sollten zusätzlich noch mit Heißkleber fixiert werden, denn das Lösen der Kontaktierung könnte zu einem gefährlichen Signalausfall während der Fahrt führen.

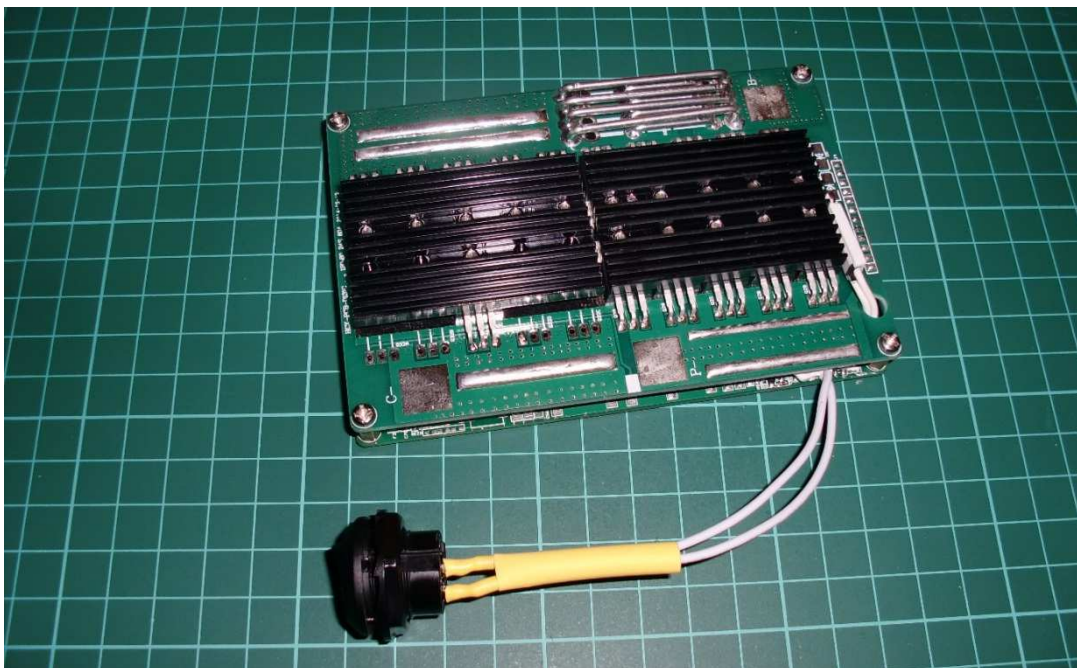


Abbildung 40: Batteriemanagementsystem

Oben dargestelltes Batteriemanagementsystem zeigt bereits den von Hand angelöteten On-Off-Schalter. Nach dem Layout des elektrotechnischen Entwurfs wird nun der Hauptstrang gefertigt. Auf der Abbildung unten ist die Ladebuchse gut zu erkennen. Das andere Ende des ursprünglichen DC-Verlängerungskabels ersetzt das derzeitige Anschlusskabel des Ladegeräts. Desweiteren muss der Balancerstecker des gewählten Akkus für einen Anschluss am BMS ausgetauscht und verlötet werden.

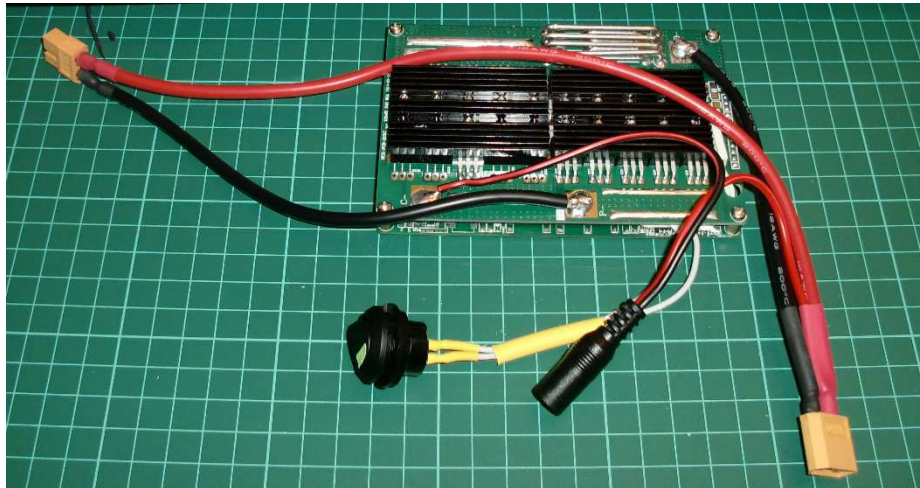


Abbildung 41: Komplette verlötete BMS

Nach weiteren kleinen Lötarbeiten zeigt Abbildung 42 nun das elektronische System.

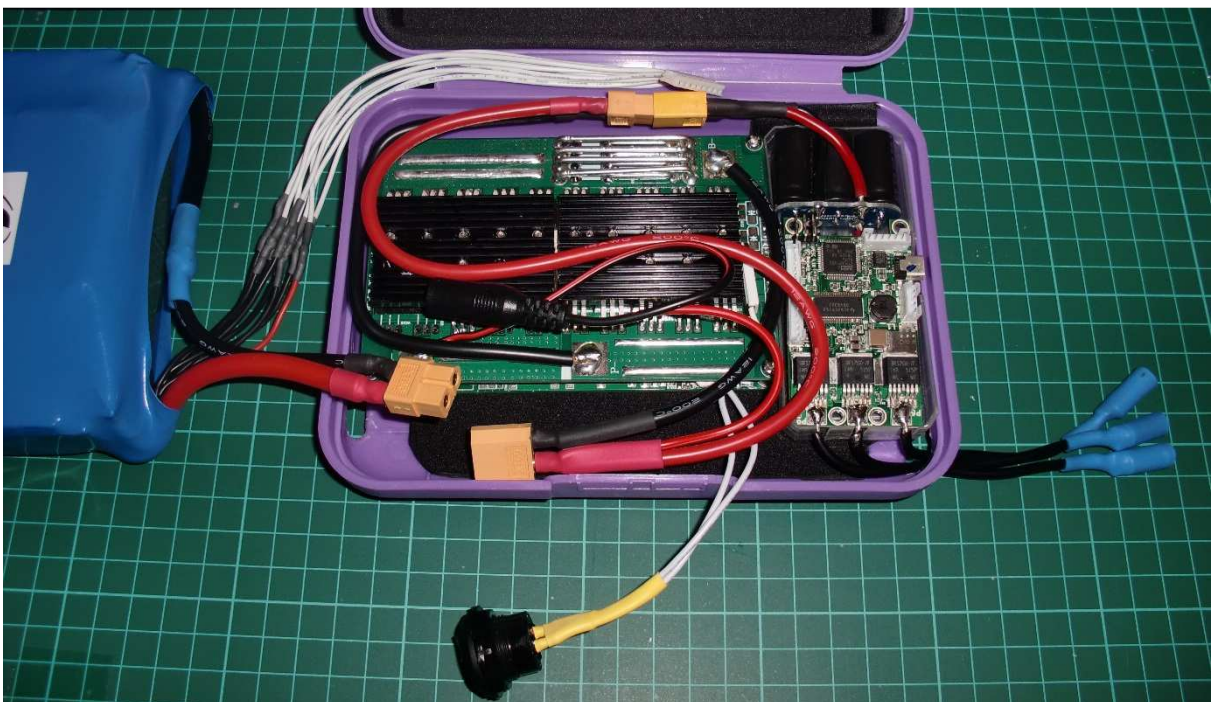


Abbildung 42: Übersicht der Boardelektronik

6.7 Inbetriebnahme

Die folgende Dokumentation stellt keine vollständige Anleitung zur Inbetriebnahme des Elektroskateboards dar. Es soll nur grob auf die wichtigsten Elemente eingegangen werden. Wie bereits erwähnt kann der VESC mit dem BLDC-Tool konfiguriert werden. Anmerkung für künftige Projektgruppen: Dieses Tool lässt auch Änderungen zu, die den VESC irreparabel beschädigen können – es ist daher zwingend notwendig sich in die Funktionsweise einzuarbeiten.

Aktueller Stand der Entwicklung (Soft- und Hardware des VESCs im E-Skateboard entspricht diesem Stand)	VESC V4.10 BLDC Tool V2.10 Firmware V2.10
---	---

Die Funktion sowie die Inbetriebnahme, Aufspielen von Firmware-Updates, Motor- und RC-Konfiguration etc. sind ausführlich unter folgenden Quellen dokumentiert.

Tabelle 9: Links zur Inbetriebnahme

BLDC-Tool und Firmware	http://vesc.net.au/resources/
Entwicklerseite	http://vedder.se/2015/01/vesc-open-source-esc/
Konfigurationsanleitung	http://www.esk8.de/anleitungen

Während des Projektzeitraums wurde die FOC (Field Oriented Control) für Motoren mit und ohne Sensoren in die Software implementiert. Diese feldorientierte Regelung (oder Vektorregelung) verbessert die ohnehin schon sehr gute Regelung des VESCs vor allem im Punkt der Geräuschentwicklung. Das Motorengeräusch ist somit kaum mehr hörbar. Hier sei auf ein kurzes Tutorial verwiesen [<http://tinyurl.com/jlytr2z>].

Schritt 1: Verbinden

Nach herunterladen des BLDC-Tools und installieren des virtuellen COM-Port Treibers kann der VESC per USB-Schnittstelle mit dem PC verbunden werden. Die Versorgungsspannung des Akkus muss dazu eingeschaltet sein. BLDC-Tool starten und auf „connect“ klicken. [43]

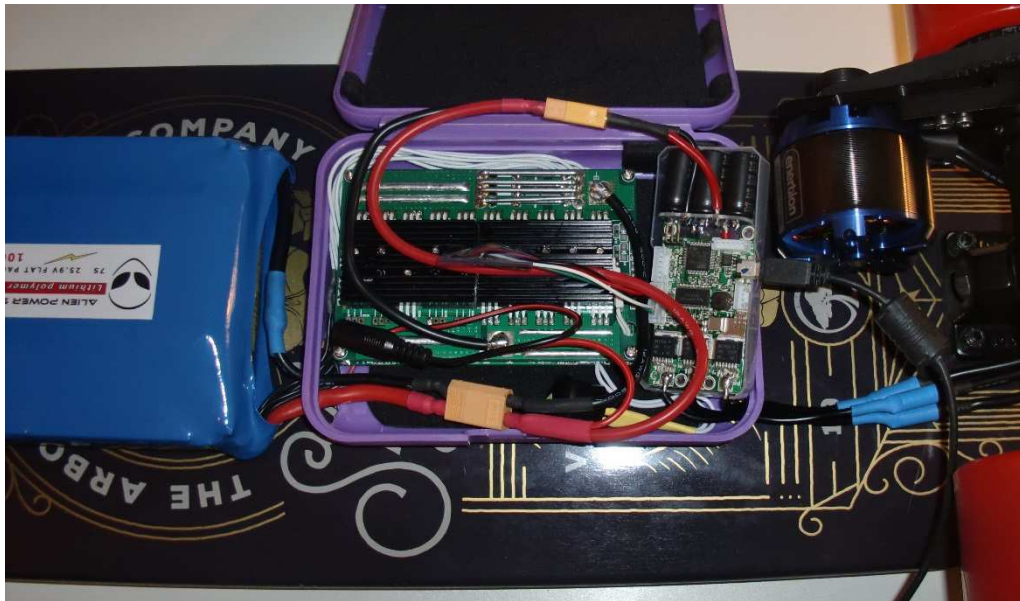


Abbildung 43: Gesamtsystem mit angeschlossenem Programmierkabel

Schritt 2: Motorparameter erfassen und VESC beschreiben

Tab „motor configuration“ wählen und unten „read configuration“ anklicken. Seitlichen Tab „sensor(less)“ anwählen und auf „start detection“ klicken. Der Motor dreht jetzt kurz hoch und läuft danach nochmal kurz langsam. Dauert ca. 3-6 Sekunden. Wichtig: Die im Fenster rechts stehenden Werte „Integrator Limit“ und „BEMF coupling“ müssen im Feld darüber an der mit dem "apply"-Button übertragen werden. Danach „write configuration“ wählen. [43]

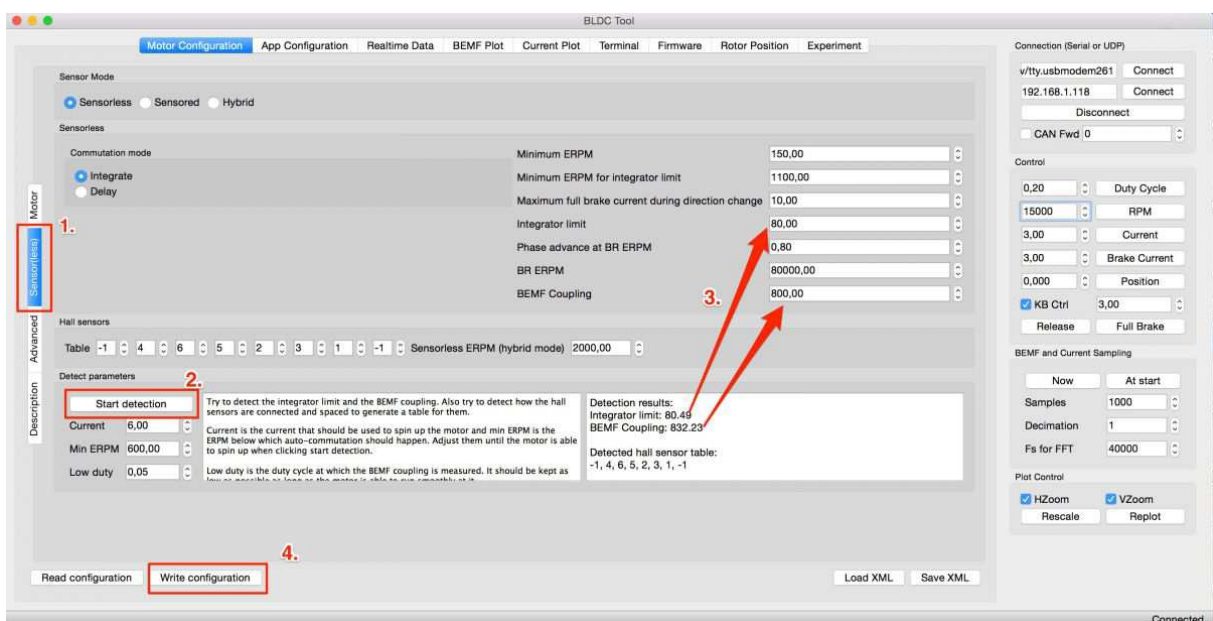


Abbildung 44: Motorkonfiguration [43]

Schritt 3: RC konfigurieren

Tab „app configuration“ wählen und dann „read configuration“ anklicken. Die entsprechende App wählen, in vorliegendem Falle „nunchuk“. Den seitlichen Tab „nunchuk“ auswählen und dort „current with reverse“ anwählen. „display“ anklicken, jetzt werden die Steuerbefehle des Nunchuk sichtbar. Danach auf „write configuration“ und auf „reboot“ klicken. Der Nunchuk verbindet sich automatisch nach einem Klick auf die rechte Taste des Nunchuks. [43] Mit der Z-Taste sollte nun der Rückwärtsgang und mit der C-Taste der „Tempomat“ auswählbar sein. Damit ist das Skateboard grundsätzlich schon fahrbereit.

Weiterhin bietet das Tool eine Vielzahl von weiteren Einstellmöglichkeiten an. So kann beispielsweise über die Reduzierung der elektronischen Drehzahl (ERPM) das ganze System gedrosselt werden.

$$n_{el,max} = n_{Motor,max} \cdot n_{Polpaare} \cdot duty_cycle_{max} = 5586 \text{ min}^{-1} \cdot 7 \cdot 0,95 = 37150 \text{ min}^{-1} \quad (6.19)$$

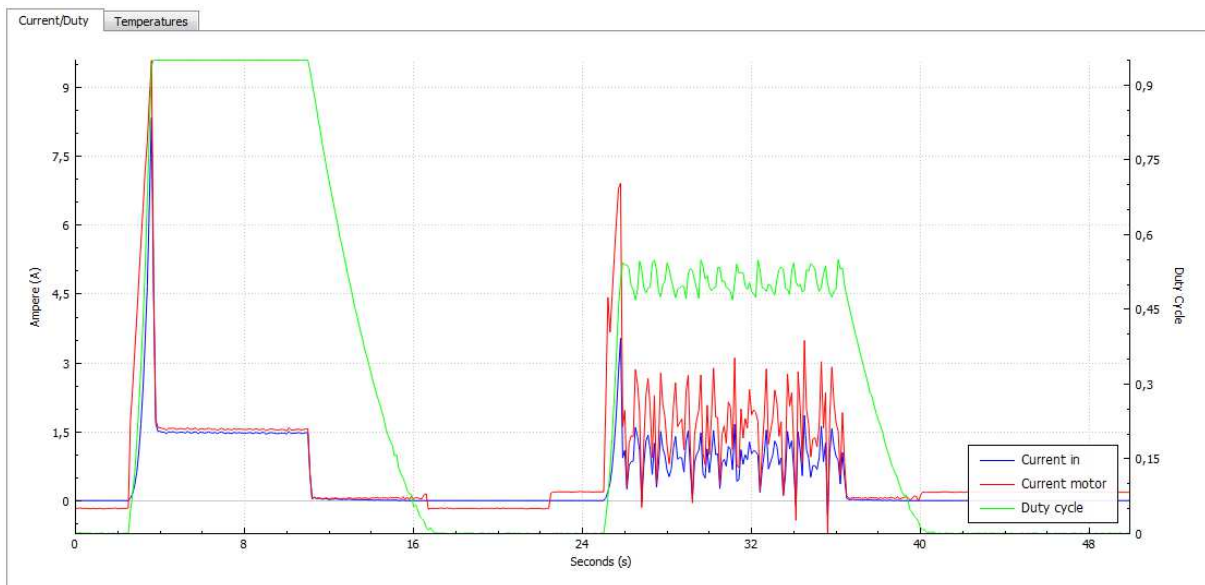


Abbildung 45: „Gedrosselter“ Modus

Möchte man die maximale Geschwindigkeit für erste Fahrversuche beispielsweise auf 30 % herabsetzen, muss für ERPM der Wert 11145 [min^{-1}] über das BLDC-Tool auf den Controller geschrieben werden [Rechnung mit (6.19): $37150 \cdot 0,3 = 11145$]. Über die Funktion „realtime data“ wurde Abbildung 45 erstellt. Sie zeigt links den offenen und rechts den gedrosselten Modus (auf 10000 ERPM).

7 Möglicher Projektverlauf und Ausblick

In diesem Kapitel sollen Anregungen und Erweiterungen für spätere Projektgruppen bzw. Weiterentwicklungen des aktuellen Systems aufgezeigt werden.

Erhöhung des Drehmoments

Es besteht die einfache Möglichkeit durch einen zweiten Motor am zweiten Hinterrad das Drehmoment signifikant zu erhöhen. Um diese Erweiterungsmöglichkeit sicherzustellen wurde bereits in aktueller Single-Variante der schmale 6355 verbaut.



Abbildung 49: Motorvarianten 6355 und 6372 des r-spec 2.0 [44]

Der zweite Motor wird dazu über eine Master-Slave-Konfiguration eines zweiten Controllers angesteuert (Slave-VESC in Abbildung nicht dargestellt).

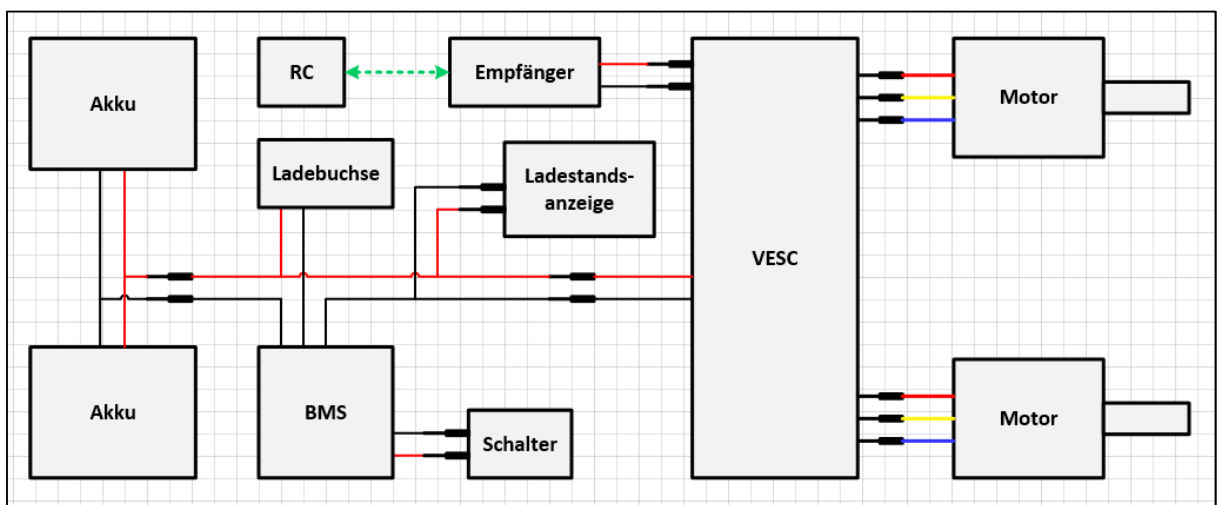


Abbildung 50: Verkabelung mit Dualmotor

Erhöhung der Geschwindigkeit

Die Höchstgeschwindigkeit kann durch kleinere Motorritzel gesteigert werden. Ritzel mit 13, 14 und 15 für die Motorachse sowie die Riemenlängen sind bereits vorhanden. Die Sicherheit des Riementriebs sinkt dann aber, da die empfohlene Zähnezahl im Eingriff unterschritten wird. Auch kann für höhere Endgeschwindigkeiten die Akkuspannung bis zu einer 12s-Konfiguration erweitert werden (Anbindung des zweiten Akkus in Abbildung 50).



Übersetzungen			
	13	14	15
36	2,77	2,57	2,40
40	3,08	2,86	2,67

Abbildung 51: Motorritzel „Performance-Set“ [45] und resultierende Übersetzungen

Natürlich kann mit einem kleineren Radritzel (3D-Druck mit 36 und 40 Zähnen ist bereits an der Technischen Hochschule erfolgt) auch das Drehmoment zulasten der Endgeschwindigkeit erhöht werden.

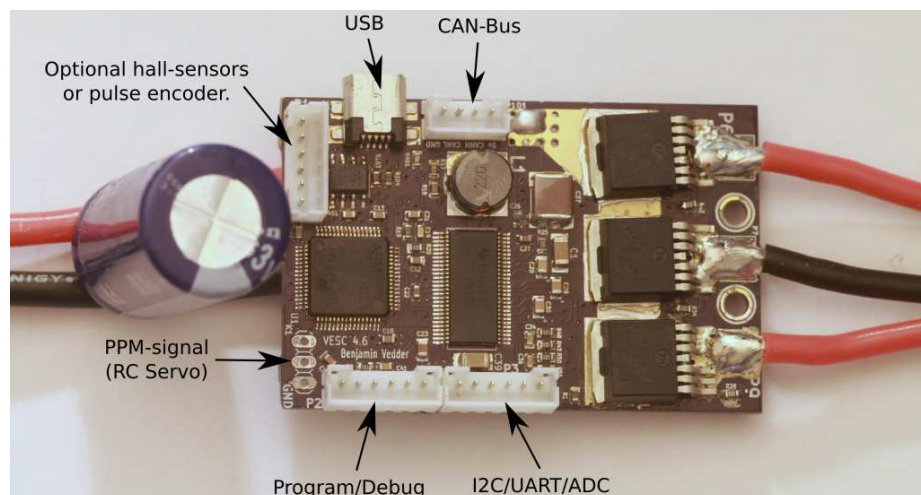


Abbildung 52: Schnittstellen des VESC [46]

Auswertung von Fahrprofilen

Mit der Funktion „realtime sampling“ des BLDC-Tools und einer Video Logging Anwendung können z.B. Temperatur oder Stromentnahme während der Fahrt aufgezeichnet werden (VESC muss dazu während der Fahrt mit dem Laptop verbunden sein). Diese Aufzeichnung könnte dann mit dem Fahrprofil aus GPS-Daten oder wie in folgendem Bild dargestellt mit einer Fahrstreckenaufnahme kombiniert werden. So können beispielsweise unterschiedliche Motoren, Übersetzungen etc. auf einer festgelegten Vergleichstrecke untersucht werden.



Abbildung 53: Beispielhafte Video-Logging-Aufnahme [47]

Modellierung und Simulation des Systems

Um die systematische Entwicklung eines mechatronischen Systems nach VDI 2206 zu vervollständigen sollte als Teil der Systemintegration vor dem eigentlichen Produktaufbau z.B. mit Matlab/SIMULINK ein Simulationsmodell erstellt werden. In vorliegender Arbeit würde auf die Durchführung und Darstellung dieser geplanten Modellierung aufgrund des zeitlich begrenzten Rahmens der Projektarbeit in Kapitel 6.5 verzichtet. Auch könnten aus der Modellauswertung z.B. für einen speziellen Motor die Standard-Regelungsparameter des VESC überprüft oder verfeinert werden.

Nachfolgende Rechnung zeigt die für das Simulationsmodell ermittelte, angenäherte Trägheit des im Board verwendeten 6355er Elektromotors. Auch diese Trägheit könnte wiederum durch einen Versuch überprüft werden.

$$\begin{aligned}
 J_M &= \frac{m_1}{2} \cdot r_1^2 + \frac{m_2}{2} \cdot r_2^2 + \frac{m_3}{2} \cdot (r_{31}^2 + r_{32}^2) \\
 J_M &= \frac{V_1 \cdot \rho}{2} \cdot r_1^2 + \frac{V_2 \cdot \rho}{2} \cdot r_2^2 + \frac{V_3 \cdot \rho}{2} \cdot (r_{31}^2 + r_{32}^2) \\
 J_M &= \frac{r_1^2 \cdot \pi \cdot l_1 \cdot \rho_{St}}{2} \cdot r_1^2 + \frac{r_2^2 \cdot \pi \cdot l_2 \cdot \rho_{Al}}{2} \cdot r_2^2 + \frac{(r_{32}^2 - r_{31}^2) \cdot \pi \cdot l_3 \cdot \rho_{Mag}}{2} \cdot (r_{31}^2 + r_{32}^2)
 \end{aligned} \tag{6.20}$$

Mit den Dichten $\rho_{St} = 7,9 \text{ kg} / \text{dm}^3$; $\rho_{Al} = 2,7 \text{ kg} / \text{dm}^3$; $\rho_{Mag} = 5,2 \text{ kg} / \text{dm}^3$ sowie den Abmaßen $r_1 = 4 \text{ mm}$; $l_1 = 82 \text{ mm}$; $r_2 = 25 \text{ mm}$; $l_2 = 6 \text{ mm}$; $r_{31} = 27 \text{ mm}$; $r_{32} = 31,5 \text{ mm}$; $l_3 = 35 \text{ mm}$ folgt

$$J_M = 1,39740 \cdot 10^{-4} \text{ kgm}^2 \approx 0,00014 \text{ kgm}^2. \tag{6.21}$$