

Diplomarbeit

Höhere Technische Bundes- Lehr- und Versuchsanstalt Salzburg
Abteilung für Elektrotechnik

Entwicklung eines emissionsfreien Sportmotorrades

Entwicklung der Zentralsteuerung / Projektleitung

Martin Kronberger 5AHET Betreuer: Dipl.-Ing. (FH) Johannes Ferner

Entwicklung des Antriebssystems

Jakob Lackner 5AHET Betreuer: Prof. Dipl.-Ing. MBA Adolf Reinhart

Entwicklung des Akkusystems

Simon Kern 5AHET Betreuer: Prof. Dipl.-Ing. Reinhold Benedikter

Entwicklung der mechanischen Komponenten

Tobias Schmeisser 5AHET Betreuer: Prof. Dipl.-Ing. Peter Lindmoser

Höhere Technische Bundeslehr-
und Versuchsanstalt Salzburg

Itzlinger Hauptstraße 30

A-5022 Salzburg

www.htl-salzburg.ac.at



Eidesstaatliche Erklärung

Wir erklären an Eides statt, dass wir die vorliegende Arbeit selbstständig und ohne fremde Hilfe verfasst, andere als die angegebenen Quellen nicht benutzt und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht haben. Wir versichern, dass wir dieses Diplomarbeitsthema bisher weder im In- noch im Ausland (einer Beurteilerin oder einem Beurteiler) in irgendeiner Form als Prüfungsarbeit vorgelegt haben.

Gendererklärung

Aus Gründen der besseren Lesbarkeit wird in dieser Diplomarbeit die Sprachform des generischen Maskulinums angewendet. Es wird an dieser Stelle darauf hingewiesen, dass die ausschließliche Verwendung der männlichen Form geschlechtsunabhängig verstanden werden soll.

Martin Kronberger

Ort, Datum

Jakob Lackner

Ort, Datum

Simon Kern

Ort, Datum

Tobias Schmeisser

Ort, Datum

Vorwort

In immer mehr Großstätten werden Fahrzeuge mit Verbrennungsmotoren verboten. Viele Motorräder und Autos können nicht mehr produziert werden, da sie die immer strenger werdenden Abgasnormen nicht mehr einhalten können und das Thema der Klimaerwärmung wird immer präsenter und immer mehr Menschen versuchen ihren „carbon footprint“ zu verkleinern.

Doch leider gibt es für Motorradfahrer zumeist keine wirklichen alternativen, um für ihr Hobby auf eine emissionsfreie Alternative umzusteigen. Denn zumeist ist das Preis-Leistungsverhältnis, oder auch das Produkt selbst, nicht sehr einladend. Daher ist unser Ziel die Entwicklung in diesem Bereich voranzutreiben und dadurch den Markt zu vergrößern, wodurch immer mehr und bessere Produkte angeboten werden können.

Danksagung

TEXT DANKSAGUNG

DIPLOMARBEIT

DOKUMENTATION

DIPLOMA THESIS

DOCUMENTATION

Erklärung

Die unterfertigten Kandidaten haben gemäß §34 (3) SchUG in Verbindung mit §22 (1) Zi. 3 lit. b der Verordnung über die abschließenden Prüfungen in den berufsbildenden mittleren und höheren Schulen, BGBl. II Nr. 70 vom 24.02.2000 (Prüfungsordnung BMHS), die Ausarbeitung einer Diplomarbeit mit der umseitig angeführten Aufgabenstellung gewählt. Die Kandidaten nehmen zur Kenntnis, dass die Diplomarbeit in eigenständiger Weise und außerhalb des Unterrichtes zu bearbeiten und anzufertigen ist, wobei Ergebnisse des Unterrichtes mit einbezogen werden können. Die Abgabe der vollständigen Diplomarbeit hat bis spätestens

03.04.2020

beim zuständigen Betreuer zu erfolgen. Die Kandidaten nehmen weiters zur Kenntnis, dass gemäß §9 (6) der Prüfungsordnung BMHS nur der Schulleiter bis spätestens Ende des vorletzten Semesters den Abbruch einer Diplomarbeit anordnen kann, wenn diese aus nicht beim Prüfungskandidaten / bei den Prüfungskandidaten gelegenen Gründen nicht fertiggestellt werden kann.

Kandidaten / Kandidatinnen	Unterschrift
Martin Kronberger	
Jakob Lackner	
Simon Kern	
Tobias Schmeisser	

Prof. Dipl.-Ing. Reinhold Benedikter
Prüfer

Dipl.-Ing. (FH) Johannes Ferner
Prüfer

Prof. Dipl.-Ing. MBA Adolf Reinhart
Prüfer

Lindmoser, Prof. Dipl.-Ing. Peter
Prüfer

Prof. Dipl.-Ing. (FH) Roland Holzer
Abteilungsvorstand

Dipl.-Ing. Dr.techn. Franz Landertshamer
Direktor

Inhaltsverzeichnis

I	Einführung	2
1	Projektteam	2
2	Projektbetreuer	3
3	Aufgabeneinteilung	3
II	Einleitung	5
1	Motivation	5
2	Zielsetzung	5
3	Topologie des Gesamtsystems	5
4	Leitfaden	5
III	Stand der Technik	6
1	Synchronmaschine mit Dauermagneterregung	6
1.1	Auswertung der Antriebswelle	6
2	Curtis Controller	6
2.1	Allgemeines	6
2.2	VCL	6
2.3	Feldorientierte Regelung	6
3	Leonard-Umformer	6
3.1	Allgemeines	6
3.2	6
4	KPI-Regler	6
4.1	Allgemeines	6
4.2	6
IV	Mechanische Umsetzung	7
1	Section	7
V	Human-Computer Interaction System	8
VI	Antriebsstrang	9
1	Übersicht	9
1.1	Grundfunktionen des Systems	9
2	Hardwareaufbau des Antriebssystems	10
2.1	Mechanische Umsetzung	11
2.2	Der Laststromkreis	12
2.2.1	Elektrische Energieübertragung	13
2.2.2	Leitungsschutzorgane	15
2.2.3	Motorbeschreibung	16
2.3	Der Steuerstromkreis	17
2.3.1	Übersicht Ein- und Ausgänge	17
2.3.2	Digitale Eingänge (Digital Inputs)	19
2.3.3	Analoge Eingänge (Analog Inputs)	19
2.3.4	Gas- und Bremseneingänge (Throttle and Brake Inputs)	20
2.3.5	Positionsrückmeldung vom Encoder (Position-Feedback Input)	20
2.3.6	Prozessorversorgung und Spulenrücklauf (KSI and Coil Return)	21

2.3.7	Analoge Ausgänge (Analog Outputs)	21
2.3.8	Digitale und Pulsweitenmodulierbare Ausgänge (Digital and PWM Outputs)	22
2.3.9	Spannungsversorgungs-Ausgänge (Power Supply Outputs)	22
2.3.10	Kommunikations-Ports	23
3	Softwareaufbau des Antriebssystems	24
3.1	Parameterbasierte Programmierung (Programmer)	25
3.1.1	Allgemeines	25
3.1.2	Funktionen	25
3.2	Drehmomentsteuerung (Torquecontrol)	27
3.2.1	Parameter	27
3.2.2	ECO- und Sportmodus (Speed-Mode-Select)	29
3.3	Vehicle-Control-Language (VCL) Programmierung	30
3.3.1	Grundfunktion	30
3.3.2	Kommunikation (CAN-Bus)	31
3.3.3	Speed-Mode-Select	32
4	Inbetriebnahme	33
4.1	Leonard-Versuchsaufbau	33
4.2	Bleiakku-Versuchsaufbau	34
VII Akku und Ladekonzept		35
1	Section	35
VIII Endergebnis		36
1	Section	36
A Arbeitsnachweis		37
1	Zeitplan	37
2	Kosten	37
B Programmier-Code		38
C CAD-Zeichnungen		39
D Schaltpläne		40
Literaturverzeichnis		40
Abbildungsverzeichnis		40
Tabellenverzeichnis		41
Codeverzeichnis		42

Kapitel I

Einführung

1 Projektteam



Martin Kronberger



Jakob Lackner



Simon Kern



Schmeisser Tobias

2 Projektbetreuer

Prof. Dipl.-Ing. Reinhold Benedikter

unterstützte Jakob Lackner bei der Entwicklung des Akku- und Ladesystems

Dipl.-Ing. (FH) Johannes Ferner

unterstützte Martin Kronberger bei der Entwicklung des Human-Computer Interaction Systems

Prof. Dipl.-Ing. MBA Adolf Reinhart

unterstützte Jakob Lackner bei der Entwicklung des Antriebssystems

Lindmoser, Prof. Dipl.-Ing. Peter

unterstützte Tobias Schmeisser bei der Entwicklung der mechanischen Komponenten

3 Aufgabeneinteilung

Martin Kronberger

- Projektleitung
- Projektfindung und Projektplanung
- Projektaufteilung
- Erstellen der Einreichdokumente
- Entwickeln der Hardware des Human-Computer Interaction Systems
- Entwickeln der Software des Human-Computer Interaction Systems
- Planung und Umsetzung der elektrischen Installation
- Verfassen der Dokumentation

Jakob Lackner

- Projektleitung
- Projektfindung und Projektplanung
- Projektaufteilung
- Entwicklung des Antriebssystems
- Entwicklung der Software des Motorsteuergerätes
- Erstellen der Einreichdokumente
- Verfassen der Dokumentation

Simon Kern

- Projektleitung
- Projektfindung und Projektplanung
- Projektaufteilung
- Entwicklung des Akkusystems
- Erstellen der Einreichdokumente
- Verfassen der Dokumentation

Tobias Schmeisser

- Projektleitung
- Projektfindung und Projektplanung
- Projektaufteilung
- Entwicklung der mechanischen Komponenten
- Entwicklung der Getriebemechanik
- Erstellen der Einreichdokumente
- Verfassen der Dokumentation

Kapitel II

Einleitung

- 1 Motivation
- 2 Zielsetzung
- 3 Topologie des Gesamtsystems
- 4 Leitfaden

Kapitel III

Stand der Technik

1 Synchronmaschine mit Dauermagneterregung

1.1 Auswertung der Antriebswelle

2 Curtis Controller

2.1 Allgemeines

2.2 VCL

2.3 Feldorientierte Regelung

3 Leonard-Umformer

3.1 Allgemeines

3.2

4 KPI-Regler

4.1 Allgemeines

4.2

Kapitel IV

Mechanische Umsetzung

1 Section

Kapitel V

Human-Computer Interaction System

Kapitel VI

Antriebsstrang

1 Übersicht

Die Hauptaufgabe des Antriebssystems ist die Umwandlung der, vom Akkumulator zur Verfügung gestellten, elektrischen Energie in die kinetische Antriebsenergie. Diese tritt zuerst rotatorisch am Motor auf und wird zunächst über das Direkt-Getriebe umgeformt bzw. auf die passende Drehzahl gebracht, anschließend wird die Rotationsenergie mithilfe des Hinterrades auf die Straße übertragen und das ganze Motorrad beschleunigt. Neben dem Antrieb des Motorrades hat die Motorsteuerung noch weitere Bedeutung als Steuereinheit, sie fungiert als Bindeglied zwischen dem Human-Computer Interacting System und den elektrischen Anforderungen an das Gesamtsystem.

1.1 Grundfunktionen des Systems

Die geplanten Aufgaben des Antriebssystems lassen sich grob in zwei Grundfunktionen einteilen:

- **Der Antrieb**

Translation ist eine Grundfunktion eines jeden Verkehrsmittels.

Durch die Umwandlung der elektrischen Energie in kinetische Energie erfährt das gesamte System eine Beschleunigung in Fahrtrichtung.

- **Die Steuereinheit**

Steuerung und Kommunikation mit anderen Betriebsmitteln,
realisiert durch In- und Outputs, Datenübetragung mithilfe des CAN-Buses.

Um auf die einzelnen Details des Antriebssystems besser eingehen zu können, unterscheiden wir zwischen dem Hardwareaufbau und dem Softwareaufbau des Antriebssystems.

2 Hardwareaufbau des Antriebssystems

Der grundsätzliche Hardwareaufbau des Antriebssystems lässt sich in zwei galvanisch getrennte Stromkreise und die mechanische Umsetzung unterscheiden:

- **Mechanische Umsetzung (Kraftübertragung und Montage)**

Umfasst das Getriebe und die Befestigung aller Komponenten am Rahmen.

- **Der Laststromkreis**

Beinhaltet die Verbindung des Motorcontrollers mit dem Motor und dem Akkumulator.

- **Der Steuerstromkreis**

Beinhaltet alle elektrischen Verbindungen, welche mithilfe des 35-poligen Niederleistungs-Steckers mit dem Motorcontroller verbunden sind.

2.1 Mechanische Umsetzung

Die Fertigung des Getriebes und die Montage der einzelnen Betriebsmittel wurde vollständig von Tobias Schmeisser übernommen.

2.2 Der Laststromkreis

Der Laststromkreis beinhaltet alle leistungsführenden Betriebsmittel des Antriebssystems. Hierbei unterscheiden wir zwischen den zwei wichtigsten Grundfunktionen:

- **Elektrische Energieübertragung**

Umfasst die elektrische Verbindung von Motor, Motorcontroller und Akkumulator. Realisiert durch einfache Leitungen, um Leistungen übertragen zu können.

- **Schutz der Komponenten vor Beschädigungen (Leitungsschutzorgane)**

Beinhaltet eine Schmelzsicherung zum Schutz vor Überströmen und ein Hochleistungs-Relais, um im Fehlerfall den Laststromkreis öffnen zu können und damit eine galvanische Trennung des Antriebs und der Energieversorgung gewährleisten zu können.

Im folgenden Bild ist der Grundaufbau des Laststromkreises ausführlich beschrieben:

R1 ... Vorladewiderstand

F1 ... Schmelzsicherung

S4.1 ... Hauptschütz (Hochleistungs-Relais)

S4.2 ... Vorladeschütz

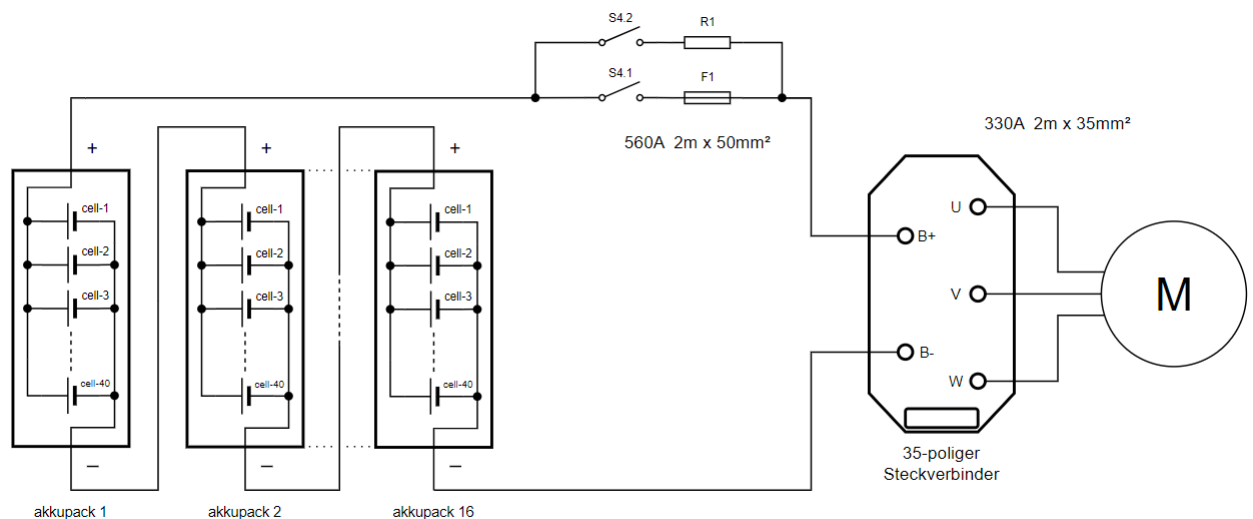


Abbildung VI.1: Grundaufbau des Laststromkreises

2.2.1 Elektrische Energieübertragung

Um die benötigte elektrische Energie übertragen zu können, müssen die Leitungen an den Leistungsverbrauch des Verbrauchers (Motor) angepasst werden. Bei einer zu hohen Stromaufnahme (Überlast) des Motors kann es zu einer übermäßigen Erwärmung der Leitungen bis hin zu dauerhaften Beschädigungen, wie Durchschmoren der Isolierung, oder sogar einen Leitungsbrand führen. Um dies verhindern zu können, müssen die Leitungen an die Stromaufnahme des Motors angepasst werden. Das heißt, der zulässige Dauerstrom der Leitungen muss den maximalen Dauerstrom des Motors bzw. den maximalen Dauerstrom, welcher durch den Akkumulator zur Verfügung gestellt werden kann, übersteigen.

Auswahlkriterien:

Bei der Auswahl von Leitungen muss man grundsätzlich den Querschnitt und die Länge der Leitung an die benötigte Stromaufnahme des Motors anpassen. Bestimmte weitere Anforderungen, wie zum Beispiel ein maximal zulässiger Spannungsabfall, müssen ebenfalls berechnet und berücksichtigt werden. Ein gutes Zusammenspielen der Leitungen mit den anderen Leitungsschutzeinrichtungen ist ebenfalls sehr wichtig, jedoch können diese Bauteile auch sehr gut an die bereits festgelegten Eigenschaften der Leitungen angepasst werden.

Berechnung:

In diesem Abschnitt befassen wir uns zunächst mit der Berechnung aller Ströme, die wir zur Auswahl der richtigen Leitungen benötigen. Da wir den maximalen Strom, welcher durch eine Zelle zur Verfügung gestellt werden kann, bereits aus dem Datenblatt kennen, können wir von der Seite des Akkumulators mit der Berechnung beginnen. Zuerst berechnet man also den maximalen Strom, welcher sich aus der Parallelschaltung der Zellen ergibt. Der Motor erhält nahezu die selbe Leistung, weshalb der Motorstrom durch die Anordnung der Phasen ebenfalls bestimmt werden kann. Da die Größenordnungen der beiden Ströme im Akkumulator-Stromkreis und im Motor-Stromkreis sehr unterschiedlich sind, können ebenfalls verschiedene Leitungsquerschnitte verwendet werden. Die Berechnung des Leitungswiderstands lässt nun auch auf den Spannungsabfall schließen, diese Berechnung muss jedoch bei beiden Stromkreisen erfolgen.

- **Berechnung der Ströme:**

Maximaler Strom, der von einer Zelle zur Verfügung gestellt werden kann: 14 A

Anzahl der Zellen die in einem Akkupack parallel verschaltet werden: 40

- **Akkumulator-Stromkreis:**

Querschnitt $A_A = 70 \text{ mm}^2$

Leitungslänge $l_A = 1 \text{ m}$

Spezifischer Widerstand von Aluminium: 0,0278

- **Motor-Stromkreis:**

Querschnitt $A_M = 35 \text{ mm}^2$

Leitungslänge $l_M = 1 \text{ m}$

Spezifischer Widerstand von Kupfer: 0,01786

Berechnung der Ströme:

$$I_{Zmax} = 14 \text{ A}$$

$$I_{Amax} = 40 \cdot I_{Zmax} = 40 \cdot 14 \text{ A} = 560 \text{ A}$$

$$I_{Mmax} = \frac{I_{Amax}}{\sqrt{3}} = \frac{560 \text{ A}}{\sqrt{3}} = 323 \text{ A}$$

Spannungsabfall Akkumulator-Stromkreis:

$$R_A = \frac{\delta_A \cdot l_A}{A_A} = \frac{0,0278 \frac{\Omega \cdot \text{mm}^2}{\text{m}} \cdot 1 \text{ m}}{70 \text{ mm}^2} = 0,397 \text{ m}\Omega$$

$$\Delta U = R_A \cdot I_{Amax} = 0,397 \text{ m}\Omega \cdot 560 \text{ A} = 222 \text{ mV}$$

$$U_{VB} = U_Q - \Delta U = 50,4 \text{ V} - 222 \text{ mV} = 50,178 \text{ V}$$

Spannungsabfall Motor-Stromkreis:

$$R_M = \frac{\delta_K \cdot l_M}{A_M} = \frac{0,01786 \frac{\Omega \cdot \text{mm}^2}{\text{m}} \cdot 1 \text{ m}}{35 \text{ mm}^2} = 0,51 \text{ m}\Omega$$

$$\Delta U = R_M \cdot I_{Mmax} = 0,51 \text{ m}\Omega \cdot 323 \text{ A} = 165 \text{ mV}$$

$$U_{VB} = U_Q - \Delta U = 50,4 \text{ V} - 165 \text{ mV} = 50,235 \text{ V}$$

Fazit:

Bei der Anwendung als E-Motorrad spielen der Widerstand und der damit verbundene Spannungsabfall eigentlich keine Rolle, da die Leitungslängen bezogen auf den Querschnitt klein sind. Hinzu kommt noch, dass die Leitungslängen in dieser Berechnung sicherheitshalber größer angenommen wurden, als sie in Wirklichkeit umgesetzt werden, da die Leitungslängen vorab schwer abgeschätzt werden können und nach der Montage ebenfalls variieren werden. Der Curtis Controller ist ebenfalls sehr unempfindlich gegenüber Spannungsschwankungen, welche so oder so durch das Laden und Entladen des Akkumulators entstehen.

Der Aluminiumleiter verfügt über eine maximale Dauerbelastung von 160A, was deutlich unter dem Maximalstrom liegt. Bei unserer Anwendung als Motorrad ist die Dauerbelastung aber eher unwichtig, da nur kurzzeitig hohe Leistungen benötigt werden (Beschleunigungsvorgang). Weiters wird der vom Motor angeforderte Strom dauerhaft vom Batterie-Management-System und vom Curtis Controller überprüft und reguliert bzw. im Notfall abgeschaltet. Kommt es zu starken Erwärmungen im Motor, der Motorsteuerung oder dem Akkumulator, wird die Maximalleistung gedrosselt.

2.2.2 Leitungsschutzorgane

Die Aufgabe der Leitungsschutzorgane ist es, bei unerwarteten Überströmen oder in einem Fehlerfall den Laststromkreis zu öffnen, um damit den Motor bzw. Motorcontroller vom Akkumulator galvanisch zu trennen. Diese Maßnahme wird ergriffen, um mögliche Beschädigungen an den Komponenten oder an den Leitungen verhindern zu können. Da jedoch ungewünschte Fehlauflösungen zum sofortigen Stillstand des Motorrades führen und eventuell sogar benötigte Wartungen (Wechsel der durchgebrannten Schmelzsicherung) nach sich ziehen, müssen diese Leitungsschutzorgane sehr sorgfältig ausgewählt werden. Eine Überdimensionierung ist ebenso unerwünscht, denn dadurch steigen die Anschaffungskosten der Bauteile. Das eher größere Problem entsteht jedoch bei der Überdimensionierung der Schmelzsicherung, denn diese löst nun zu spät aus und hat damit nur mehr eine nicht geeignete Schutzfunktion.

Hochleistungs-Relais

Bei der Auswahl des Hochleistungs-Relais muss vor allem der maximale Strom, der vom Relais geschaltet werden kann, höher als der Verbraucherstrom bei maximaler Auslastung sein. Ebenfalls werden die zu erwarteten Lebenszyklen mithilfe einer speziellen Kennlinie abgeschätzt, welche diese Zyklen abhängig von bestimmten Strom- und Spannungswerten angibt. Bei einer Gleichspannung von 120V und einem Strom von 600A ergibt sich eine ungefähre Lebenszeit von 5.000 Schaltvorgängen. Die oben genannten Werte sind aber entsprechend der Kennlinie deutlich höher als die realen Leistungswerte, ebenfalls ist der Schaltvorgang meist nahezu unbelastet, da die Kondensatoren vorgeladen werden und das Hochleistungs-Relais nur in einem Fehlerfall während des Betriebs geöffnet wird. Aufgrund dessen kann auf eine Lebenszeit von deutlich über 10.000 Schaltvorgängen geschlossen werden. Natürlich muss auch die Spulenspannung und der zugehörige Leistungsverbrauch für die gewünschte Anwendung passen. Die Spulenspannung wurde passend zu den anderen Bauteilen für 12V ausgewählt, der Leistungsverbrauch befindet sich im Bereich von wenigen Watt und ist damit vernachlässigbar.

Schmelzsicherung

Bei der Auswahl der Schmelzsicherung ist es vor allem wichtig, dass der Stromkreis bei einem Kurzschlussfall in kurzer Zeit unterbrochen wird, die zulässigen Nennströme jedoch dauerhaft geleitet werden können. Das bedeutet, der Kurzschlussstrom muss um ein Vielfaches größer sein, als der Nennstrom der Schmelzsicherung. Da jedoch die Kurzschlussimpedanz im Bereich von wenigen Milli-ohm liegt, ist der Kurzschlussstrom mindestens 10 mal so groß wie der Nennstrom der Schmelzsicherung, was bei der ausgewählten Sicherung eine Ausschaltzeit von wenigen Millisekunden bedeutet. Normalerweise ist es ebenfalls in Bezug auf die Leitungen wichtig, dass der zulässige Dauerstrom der Leitungen größer als der Nennstrom der Schmelzsicherung ausgewählt wird, um Beschädigungen an den Leitungen verhindern zu können. In unserem Fall ist dies aber eher nebensächlich, da der vom Motor angeforderte Strom, wie bereits erwähnt, dauerhaft durch das Batterie-Management-System überprüft und begrenzt wird.

Fazit:

benötigt?

2.2.3 Motorbeschreibung

Die Nennleistung von Motor und Motorcontroller übersteigen die Nennleistung des Akkumulators, weshalb die Nennwerte dieser Bauteile unwichtig für die Dimensionierung der Leitungen und Leitungsschutzorgane ist. Da jedoch Motor und Motorsteuerung die zentralen Elemente des E-Motorrades darstellen, werden unter diesem Punkt bestimmte Eigenschaften und Nenndaten genauer beschrieben.

Für die Anwendung in einem E-Motorrad bot sich die Verwendung eines bürstenlosen permanenterregten Gleichstrommotors an. Da jedoch eine Motorsteuerung die drei Phasen des Motors mit Drehstrom versorgt, wirkt dieser Motor eigentlich wie eine Synchronmaschine mit einem Permanentmagneten im Läufer.

Der Motor wurde von der Firma Ashwoods gebaut und hat die Bezeichnung „IPM-200-50“. Er besitzt eine mechanische Spitzenleistung von 16 kW und ein maximales Drehmoment von 74 Nm. Die maximale Drehzahl beträgt 8500 U/min und der Wirkungsgrad liegt bei circa 85%.

Die Motorsteuerung wurde von der Firma Curtis gebaut, der Controller ist ein Prototyp mit der Modellnummer „AC-F4-A-Proto-002“. Er besitzt einen maximalen Motorstrom von 450A RMS. Im Betrieb hat der Motorcontroller einen Leistungsverbrauch von rund 500W.

Betrachtet man also beide Bauteile gemeinsam, ergibt das eine maximale Leistung von 19,5 kW, sprich einen maximalen Strom von 385A bei einer Nennspannung von 50,4V.

2.3 Der Steuerstromkreis

2.3.1 Übersicht Ein- und Ausgänge

Der Steuerstromkreis umfasst mit alle elektrischen Verbindungen, welche über den 35-poligen Niederleistungs-Stecker mit dem Motorcontroller verbunden sind. Hierbei unterscheiden wir grundsätzlich zwischen drei verschiedenen Ports, welche nochmals unterkategorisiert werden können:

- **Eingänge (Inputs)**
 - Digitale Eingänge (Digital Inputs)
 - Analoge Eingänge (Analog Inputs)
 - Gas- und Bremseneingänge (Throttle and Brake Inputs)
 - Positionsrückmeldung vom Encoder (Position-feedback Input)
 - Prozessorversorgung und Spulenrücklauf (KSI and Coil Return)
- **Ausgänge (Outputs)**
 - Analoge Ausgänge (Analog Outputs)
 - Digitale und Pulsweitenmodulierbare Ausgänge (Digital and PWM Outputs)
 - Spannungsversorgungs-Ausgänge (Power Supply Outputs)
- **Kommunikation (Communication)**
 - CAN-Bus (CAN-Port)
 - Serielle Schnittstelle (Serial-Port)

Der Motorcontroller verfügt über viele Pins, welche über mehrere Funktionen verfügen, es muss jedoch eine dieser Funktionen ausgewählt werden. Pin 6 zum Beispiel wird eigentlich als digitaler und phasenmodulierbarer Ausgang verwendet, bei richtiger Konfiguration kann er jedoch auch als digitaler Input verwendet werden. Weiteres kann frei konfiguriert werden, ob man mit diesem Ausgang zum Beispiel das Hochleistungs-Relais, eine Pumpe oder Bremslichter ansteuern möchte, je nach gewünschter Anwendung gibt es auch unterschiedliche Funktionen. Um den passenden Pin für eine Anwendung auswählen zu können, muss man jedoch die elektrischen Eigenschaften der Pins genauer unter die Lupe nehmen. Oftmals haben auch die Pins der selben Unterkategorie verschiedene Funktionen, Eingangsimpedanzen oder Toleranzen.

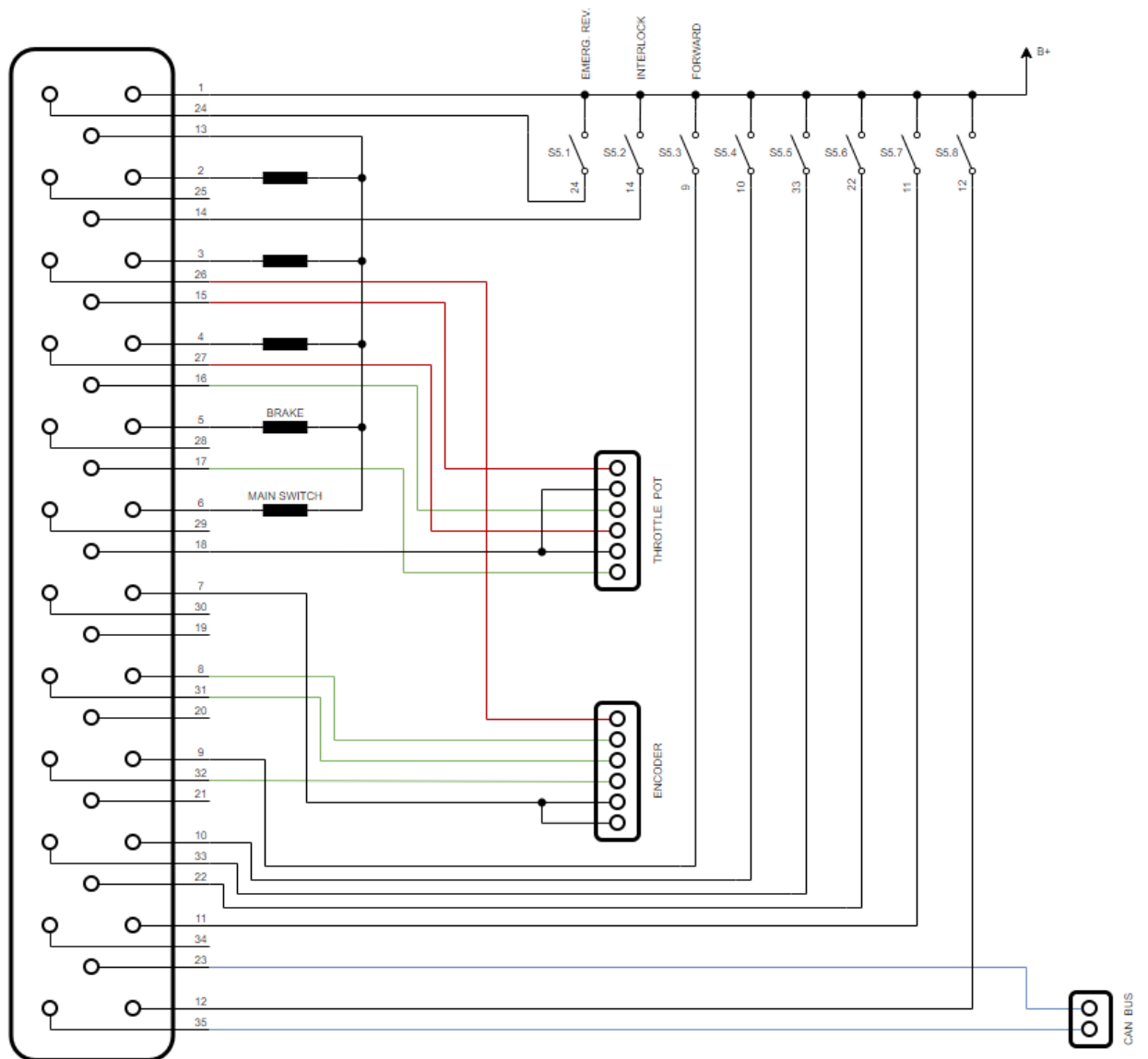
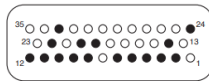


Abbildung VI.2: Grundaufbau des Steuerstromkreises

2.3.2 Digitale Eingänge (Digital Inputs)

Es gibt insgesamt 16 Pins, die als digitale Eingänge genutzt werden können, jedoch werden sieben Pins davon eigentlich als Ausgänge konfiguriert.



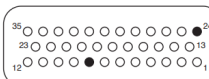
DIGITAL INPUT SPECIFICATIONS

Name	Pin	Logic Thresholds	Input impedance*	Voltage range†	ESD Tolerance
Switch 1	24	Rising edge= 4.4V max Falling edge= 1.5V min	24-36V models: 7.0 k Ω , 7.2 k Ω 36-48V models: 10.8 k Ω , 11.2 k Ω 48-80V models: 25.2 k Ω , 27.3 k Ω 72-96V models: n/a, 29.4 k Ω	-10V to (MaxV + 10 V)	\pm 8 kV (direct strike)
Switch 2	8				
Switch 3	9				
Switch 4	10				
Switch 5	11				
Switch 6	12				
Switch 7	22				
Switch 8	33				
Switch 16	14				
Digital Out 6	19				
Digital Out 7	20		150 k Ω to 300 k Ω	-5V to (MaxV + 10 V)	
Driver 1	6				
Driver 2	5				
Driver 3	4				
Driver 4	3				
Prop Driver	2				

Abbildung VI.3: Digital Input Specifications

2.3.3 Analoge Eingänge (Analog Inputs)

Es gibt insgesamt zwei Pins, die als analoge Eingänge verwendet werden können. Ein Pin davon wird jedoch im Normalfall für den Motortemperatur-Sensor verwendet. Die Eingänge, die für das Gas- und Bremspotentiometer verwendet werden, sind in dieser Kategorie nicht aufgelistet, obwohl diese ebenfalls als analoge Eingänge genutzt werden. Diese Pins sind jedoch speziell für die Gas- und Bremssteuerung konfiguriert und sollten im Normalfall auch dafür verwendet werden.



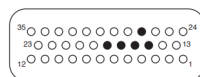
ANALOG INPUT SPECIFICATIONS

Signal Name	Pin	Operating Voltage	Input impedance*	Protected Voltage	ESD Tolerance
Analog 1	24	0 to 10V in 1024 steps	24-36 V models: 6.9 k Ω , 7.1 k Ω 36-48 V models: 10.5 k Ω , 11.0 k Ω 48-80 V models: 23.8 k Ω , 28.1 k Ω 72-96 V models: n/a, 28.1 k Ω	-10 V to (MaxV + 10 V)	\pm 8 kV (direct strike)
Analog 2	8				

Abbildung VI.4: Analog Input Specifications

2.3.4 Gas- und Bremseingänge (Throttle and Brake Inputs)

Die zwei Gas- und Bremssteuerungs-Eingänge sind wegen der speziellen Auslegung von den analogen Eingängen abgegrenzt und können unabhängig voneinander programmiert werden. Sie sind optimiert für die Anwendung mittels Spannungssteuerung, 2-Draht Widerstandssteuerung oder 3-Draht Widerstandssteuerung. Bei der Spannungssteuerung benötigt man die Pins Pot Wiper und I/O Ground, bei der 2-Draht Widerstandssteuerung Pot Wiper und Pot Low und bei der 3-Draht Widerstandssteuerung Pot High, Pot Wiper und Pot Low. In unserem Fall benutzen wir beide Steuerungs-Eingänge für die 3-Draht Widerstandssteuerung, da der Gasdrehgriff über eine Drahtbrucherkennung verfügt. Das heißt, der Gasdrehgriff hat insgesamt zwei unabhängige 3-Draht Potentiometer-Ausgänge, welche beide für den Gaseingang benutzt werden.

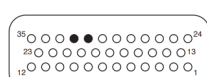


Signal Name	Pin	Operating Voltage	Input Impedance	S/Sink Current	Protected Voltage	ESD Tolerance
Throttle Pot High	15	0 V (shorted to Pot Low) 5 V (open circuit)	N/A	1 mA nominal (source)	−0.5 V to (MaxV + 10 V)	± 8 kV (direct strike)
Pot2 High	27					
Throttle Pot Wiper	16	0 to 6.25 V	100 kΩ min	0.76 mA nominal (source, 2-wire)		
Pot2 Wiper	17					
Pot Low	18	0 to 0.25 V	20 Ω nom.	Faults if above 15 mA (sink)	−1 V to (MaxV + 10 V)	

Abbildung VI.5: Throttle Input Specifications

2.3.5 Positionsrückmeldung vom Encoder (Position-Feedback Input)

Diese zwei Pins sind intern dafür konfiguriert, die aktuelle Position der Motorwelle einzulesen, um eine optimale feldorientierte Ansteuerung des Motors durchführen zu können. Dabei gibt es die Möglichkeiten über einen Quadratur-Encoder oder einen Sin/Cos-Encoder. Da im Ashwoods-Motor ein Sin/Cos-Sensor verbaut ist, wurde dies vorab beim Motorcontroller eingestellt.

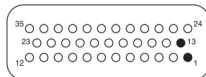


Signal Name	Pin	Operating Voltage	Input Impedance	Max. Frequency	Protected Voltage	ESD Tolerance
Position Feedback A	31	0 to 5 V	150 kΩ for voltages ≤ 5 V 75 kΩ for voltages > 5 V	500 Hz	-5 V to (MaxV + 10 V)	± 8 kV (direct strike)
Position Feedback B	32					

Abbildung VI.6: Sin/Cos Sensor Input Specifications

2.3.6 Prozessorversorgung und Spulenrücklauf (KSI and Coil Return)

Der KSI-Eingang stellt die elektrische Versorgung aller Niederleistungs-Schaltkreise zur Verfügung. Dies beinhaltet ebenfalls die Versorgung aller Ausgänge und die Kondensator-Vorlade-Funktion, welche dazu dient, die Kondensatoren über einen Widerstand vorzuladen, um hohe Einschaltströme zu verhindern. Der Spulenrücklauf stellt die Versorgung der pulsweitenmodulierbaren Ausgänge zur Verfügung und hat die gleiche Spannung wie der KSI-Pin. Die elektrische Trennung von KSI und Coil Return muss aufrechterhalten werden, um einen Verpolungsschutz gewährleisten zu können.



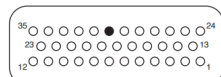
KSI and COIL RETURN INPUT SPECIFICATIONS

Signal Name	Pin	Operating Voltage	Input Current	Protected Voltage	ESD Tolerance
KSI	1	Between under- and overvoltage cutbacks	13 A max * continuous	$\pm (\text{MaxV} + 10 \text{ V})$	$\pm 8 \text{ kV}$ (direct strike)
Coil Return	13		10 A or 12 A max **	(KSI - 0.3 V) to (MaxV + 10 V)	

Abbildung VI.7: KSI and Coil Return Input Specifications

2.3.7 Analoge Ausgänge (Analog Outputs)

Der analoge Ausgang kann ein Spannungssignal von 0 bis 10V ausgeben. Dieser Ausgang ist für die Ausgabe über Anzeigeeinstrumente, wie zum Beispiel eine Anzeige über den aktuellen Ladestand des Akkumulators, vorgesehen.



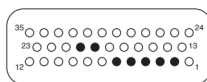
ANALOG OUTPUT SPECIFICATIONS

Signal Name	Pin	Output Voltage	Output Current	Protected Voltage	ESD Tolerance
Analog Out	30	0 to 10 V	10 mA	-1 V to (MaxV + 10 V)	$\pm 8 \text{ kV}$ (direct strike)

Abbildung VI.8: Analog Output Specifications

2.3.8 Digitale und Pulsweitenmodulierbare Ausgänge (Digital and PWM Outputs)

Es gibt insgesamt 7 digitale Ausgänge, wovon jedoch nur 5 für eine Pulsweitenmodulation konfiguriert werden können. Diese Ausgänge sind für induktive Lasten, wie zum Beispiel den Hauptschütz oder eine elektromagnetische Bremse, vorgesehen. Rein ohmsche Lasten können ebenfalls gesteuert werden, jedoch darf der zulässige Spitzenstrom nicht überschritten werden. Der Proportional-Driver kann bei richtiger Konfiguration auch für die Anzeige eines Tachometers hergenommen werden. Generell kann jeder Pin dieser Gruppe ebenfalls als digitaler Eingang benutzt werden.



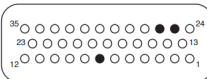
DIGITAL and PWM OUTPUT SPECIFICATIONS

Name	Pin	PWM	PV Current	Frequency	Output Current	Protected Voltage	ESD Tolerance	
Driver 1	6	0 to 100% Duty Cycle	N/A	120 to 1000 Hz *	2A Max	-0.5 V to (MaxV + 10 V)	± 8 kV (direct strike)	
Driver 2	5				3A Max			
Driver 3	4				2A Max			
Driver 4	3							
Prop Driver	2		0 to 2A in 607 nominal steps	18 kHz				
Digital Out 6	19	On / Off	N/A	N/A	1A Max			
Digital Out 7	20							

Abbildung VI.9: Digital and PWM Output Specifications

2.3.9 Spannungsversorgungs-Ausgänge (Power Supply Outputs)

Um kleine Schaltkreise, wie zum Beispiel einen LED-Indikator oder die Positionsrückmeldung des Encoders, mit Spannung versorgen zu können, gibt es zwei dafür vorgesehene Spannungsversorgungs-Ausgänge mit je einem Pin für 5V und 12V. Für diese Anwendungen gibt es ebenfalls noch einen Rücklauf, der als I/O Ground definiert wurde.



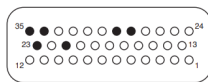
POWER SUPPLY OUTPUT SPECIFICATIONS

Signal Name	Pin	Output Voltage	Output Current	Protected Voltage	ESD Tolerance
+12 V Out	25	11.5 to 14.5 V	100 mA max for +12 Out 100 mA max for +5 Out 200 mA max (combined total)	-1 V to (MaxV + 10 V)	± 8 kV (direct strike)
+5 V Out	26	5 V ±10%			
I/O Ground	7	n/a	500 mA max	not protected	

Abbildung VI.10: Power Supply Output Specifications

2.3.10 Kommunikations-Ports

Für die Kommunikation mit anderen Betriebsmitteln stellt uns der Motorcontroller zwei Möglichkeiten zur Verfügung, den CAN-Bus und die serielle Schnittstelle. Da sich unser Projektteam auf die Nutzung des CAN-Busses geeinigt hat, wird die serielle Schnittstelle nicht verwendet. Die zwei Pins CAN Term High und CAN Term Low werden ebenfalls nicht benötigt, denn diese dienen nur dazu, den CAN-Bus vorübergehend funktionsunfähig zu schalten. Programmtechnisch gibt es drei Möglichkeiten zur Konfiguration des CAN-Busses, dies wird jedoch im Punkt Software genauer erklärt.



COMMUNICATIONS PORT SPECIFICATIONS

Signal Name	Pin	Supported Protocol / Devices	Data Range	Protected Voltage	ESD Tolerance
CAN H	23	CANopen, other 11-bit or 29-bit identifier protocols	up to 1 Mbit/s	−0.5 V to (MaxV + 10 V)	± 8 kV (direct strike)
CAN L	35				
CAN Term H	21			(no connection to external wiring)	
CAN Term L	34				
Serial TX	28	Curtis 840 Display, 1313 Handhelp Programmer, 1314 PC Programming Station	as required, 9.6 kbit/s to 56 kbit/s	−0.3 V to 12 V	
Serial RX	29				

Abbildung VI.11: Communications Port Specifications

3 Softwareaufbau des Antriebssystems

Der Softwareaufbau des Antriebssystems kann grob in 3 Grundfunktionen unterteilt werden:

- **Parameterbasierte Programmierung (Programmer)**

Umfasst alle Parameter und die vornehmbaren Konfigurationsmöglichkeiten.

- **Drehmomentsteuerung (Torquecontrol)**

Beinhaltet alle Parametereinstellungen, welche für die Drehmomentsteuerung ausschlaggebend sind.

- **Vehicle-Control-Language (VCL) Programmierung**

Umfasst das gesamte Programm, welches mit der Vehicle-Control-Language realisiert wurde. Ein Großteil dieses Programms beschäftigt sich hierbei mit der Kommunikation zwischen der Motorsteuerung und dem Raspberry PI.

3.1 Parameterbasierte Programmierung (Programmer)

3.1.1 Allgemeines

In dem Curtis Integrated Toolkit befindet sich unter anderem die Funktion „Programmer“, welche sehr viele Applikationseinstellungen für die Controllerprogrammierung zur Verfügung stellt. Es gibt mehrere verschiedene Menüs, welche die jeweils zugehörigen Parametergruppen auflisten. Viele Variablen können konfiguriert werden, andere werden nur für die Ausgabe aktueller Werte wie zum Beispiel die aktuelle Geschwindigkeit oder Temperatur verwendet. Die Parameter können je nach Anwendung und Funktion verschiedene Einheiten und einstellbare Wertebereiche besitzen. Sehr vorteilhaft sind hierbei die meist vorhandenen Kurzbeschreibungen im Curtis Integrated Toolkit oder die Parameterdeklaration in der Anleitung.

3.1.2 Funktionen

Throttle and Brake

Die Hauptfunktion dieser Parametergruppen ist die genaue Einstellung der Potentiometer-Eingänge für den Bremsvorgang, Vorwärts- und Rückwärtsbetrieb. Es können der Start- und Endwert des Potentiometer festgelegt werden, ebenso bestimmte Formänderungen der Eingangskurve, welche die Intensität des Gas- bzw. Bremsbefehls abhängig von der Potentiometerstellung beschreibt. Ebenso gibt es mehrere mögliche Sicherheitskonfigurationen, Filtereinstellungen und auch die Möglichkeit der Ansteuerung mittels VCL.

CAN Interface

Das CAN-Interface wird in unserer Anwendung nicht benötigt, denn die Kommunikation wurde mittels VCL-CAN umgesetzt. Die vorgefertigte Version CANopen bietet jedoch auch mehrere Einstellungsmöglichkeiten, wie ID und Taktfrequenzanpassungen. Ebenfalls gibt es jeweils 4 Datenpakete, welche für den Senden- und Empfangenvorgang konfiguriert werden können.

Battery Setup

In diesem Parametermenü kann die Nennspannung festgelegt werden, ebenfalls gibt es mehrere Einstellungsmöglichkeiten, welche in einem Über- oder Unterspannungsfall von Bedeutung sind. Um den Ladestand des Akkumulators besser abschätzen zu können, sollten hier auch bestimmte Eigenschaften festgelegt werden.

Main Contactor

Dieses Menü dient zur Konfiguration Hauptschütz (Hochleistungs-Relais). Die Ansteuerungsspannung wird hier genau beschrieben, nach dem Schließen des Schützes kann eine kleine Spannung zum Halten der Kontakte verwendet werden. Ebenfalls kann eine Zeitverzögerung eingestellt werden, welche bestimmt, wie lange der KSI-Pin geöffnet sein darf, bevor der Hauptschütz geöffnet wird. Diese Funktion kann sehr wichtig sein, denn ein Wechsel des Antriebsmodus kann somit ebenfalls während des Betriebs erfolgen (Gaseingang muss aber 0% sein). Ebenfalls kann die Vorladefunktion und auch mehrere sicherheitsrelevante Funktionstests eingeschaltet und konfiguriert werden.

Pump Contactor

.

EM Brake Control

.

Emergency Reverse (EMR)

.

Interlock Braking

.

Dual Drive

.

Vehicle und Supervision

.

Current Limits

3.2 Drehmomentsteuerung (Torquecontrol)

Die Drehmomentsteuerung wird mithilfe von 12 unterschiedlichen Parametern beschrieben. Generell können diese Parameter eher als Feineinstellungen angesehen werden, da der grundsätzliche Vorgang immer der gleiche bleibt. Mit diesen Parametern werden jedoch die maximale Geschwindigkeit, die Reaktionszeit und die Aggressivität des Motors genau definiert, um das gewünschte Beschleunigungsmuster erhalten zu können.

3.2.1 Parameter

Grundsätzlich lassen sich diese Parameter in zwei Hauptgruppen unterscheiden:

- **Geschwindigkeitsbegrenzer-Parameter (Speed-Limiter)**

Bestimmen die maximale Geschwindigkeit und die Begrenzungsparameter des KPI-Reglers.

- **Reaktions-Parameter (Response)**

Bestimmen die verschiedensten Ansprechzeiten und Drehzahlen für bestimmte Ereignisse.

Diese Parameter werden in den folgenden Tabellen noch genau erklärt. Für ein besseres Verständnis können ebenfalls die englischen Tabellen „SPEED LIMITER MENU“ und „RESPONSE MENU“, aber auch die zugehörigen Abbildungen „Figure 9-11“ aus der Anleitung herangezogen werden.

Parameter	Einstellungsbereich	Beschreibung
Max Speed Max_Speed_TrqM	500 - 8000 U/min 500 - 8000	Definiert die maximale Geschwindigkeit in U/min, welche mittels der Drehmomentsteuerung angesteuert werden kann. (Unabhängig von der Gasdrehgriff-Stellung)
Kp Kp_TrqM	0 – 100 % 0 – 8192	Legt fest, wie aggressiv der Drehzahlregler versucht, die Motordrehzahl auf die maximale Drehzahl zu begrenzen. Größere Werte sorgen für eine genauere Kontrolle, können jedoch zu Schwankungen führen. Bei einem zu niedrigen Kp kann die maximal Geschwindigkeit den Parameter Max Speed überschreiten.
Ki Ki_TrqM	5 – 100 % 50 – 1000	Mit diesem Parameter kann die Integralregelung genauer beschrieben werden, welche die Drehzahlbegrenzung unterschiedlich stark beeinflusst, abhängig von der aktuellen Regelabweichung. Größere Werte ermöglichen eine schnellere Regelung, können jedoch zu Schwankungen führen. Bei zu niedrigen Werten kann es lange dauern, bis sich der Motor bei einer Überdrehzahl dem Max Speed nähert.
Kd Kd_TrqM	0 – 100 % 0 – 8192	Beschreibt die Dämpfung, wenn sich das Fahrzeug der Höchstgeschwindigkeit nähert, dadurch werden Überschwingungen verringert. Bei einem zu hohen Kd kann es lange dauern, bis die Höchstgeschwindigkeit erreicht wird. Wenn Kd zu niedrig eingestellt ist, kann die Höchstgeschwindigkeit überschritten werden, insbesondere beim bergab Fahren.

Tabelle VI.1: Geschwindigkeitsbegrenzer-Parameter

Parameter	Einstellungsbereich	Beschreibung
Accel Rate Accel_Rate_TrqM	0.1 - 30.0 s 100 - 30000	Legt fest, wie lange es dauert, bis das Motordrehmoment bei Vollgas auf das Maximum angestiegen ist. Größere Werte bedeuten eine langsamere Reaktion.
Accel Release Rate Accel_Release_Rate_TrqM	0.1 - 2.0 s 100 - 2000	Legt fest, wie schnell die Verzögerung des Fahrzeugs bei einem loslassen des Gasdrehgriffs eingeleitet wird. Bei einem geringen Wert wird der Übergang abrupt eingeleitet. Ist der Wert zu hoch eingestellt, fährt das Fahrzeug für kurze Zeit weiter.
Brake Rate Brake_Rate_TrqM	0.1 - 5.0 s 100 - 5000	Legt fest, wie lange es dauert, bis das Bremsmoment bei einem startenden Bremsvorgang oder einem Fahrtrichtungswechsel aufgebaut wird. Größere Werte bedeuten einen schonenderen Bremsvorgang.
Brake Release Rate Brake_Release_Rate_TrqM	0.1 - 2.0 s 100 - 2000	Beschreibt, wie schnell sich das Bremsmoment löst, wenn das Fahrzeug vom Bremsvorgang zum Fahrbetrieb wechselt. Bei zu hohen Werten wird der Bremsvorgang noch kurzzeitig fortgeführt.
Neutral Braking Neutral_Braking_TrqM	0 - 100 % 0 - 32767	Der neutrale Bremsvorgang tritt auf, wenn der Gasdrehgriff losgelassen wird oder keine Fahrtrichtung gewählt wurde. Der neutrale Bremsparameter ist von 0 bis 100% des maximalen Rekuperationsstromes einstellbar.
Neutral Taper Speed Neutral_Taper_Speed_TrqM	200 - 6000 U/min 200 - 6000	Legt die Motordrehzahl fest, an welcher der neutrale Bremsstrom rückgespeist wird, wenn der Gasdrehgriff losgelassen wird. Bei einem zu geringen Wert kann es zu Schwankungen kommen.
Forward Full Restraint Speed Forward_Full_Restraint_Speed_TrqM	100 - 32000 U/min 100 - 32000	Legt den Geschwindigkeitspunkt fest, an dem der volle Rekuperationsstrom rückgespeist wird, um das Vorwärtsrollen des Fahrzeugs zu verhindern. Kann auch als Parameter für die Rückhaltstärke angesehen werden. Bei einem zu geringen Wert kann es zu Schwankungen kommen.
Back Full Restraint Speed Back_Full_Restraint_Speed_TrqM	100 - 32000 U/min 100 - 32000	Legt den Geschwindigkeitspunkt fest, an dem der volle Rekuperationsstrom rückgespeist wird, um das Rückwärtsrollen des Fahrzeugs zu verhindern. Kann auch als Parameter für die Rückhaltstärke angesehen werden. Bei einem zu geringen Wert kann es zu Schwankungen kommen.

Tabelle VI.2: Reaktions-Parameter

3.2.2 ECO- und Sportmodus (Speed-Mode-Select)

Die oben genannten Parameter werden für die Erstellung der unterschiedlichen Antriebsmodi verwendet. Für den Ecomodus werden für die Parameter höhere Reaktionszeiten und weniger Aggressivität gewählt, daraus ergibt sich ein gemüthlicherer und schonenderer Fahrbetrieb, welcher gleichzeitig weniger Leistung verbraucht. Für den Sportmodus hingegen werden kürzere Reaktionszeiten und höhere Aggressivität gewählt, daraus ergibt sich ein sportlicheres Fahrverhalten, die gewünschte Geschwindigkeit wird schneller erreicht. Natürlich zieht dieser Antriebsmodus einen erhöhten Leistungsverbrauch nach sich. Der Wechsel des Antriebsmodus bedeutet jedoch eine Veränderung kritischer Parameter, weshalb der KSI-Pin aus- und eingeschaltet werden muss, um den normalen Fahrbetrieb wieder aufnehmen zu können. Da jedoch ein ausschalten des KSI-Pins zum sofortigen Stillstand (Einleiten des Bremsvorgangs bis die Geschwindigkeit 0 ist) des Motorrads führt, kann der Wechsel des Antriebsmodus nur im Stillstand erfolgen. Die einzelnen Modi können beliebig konfiguriert werden und auch im Nachhinein mittels dem Curtis Integrated Toolkit bzw. VCL-Studio sehr schnell und leicht verändert oder angepasst werden. Vorerst wird es nur zwei unterschiedliche Antriebsmodi geben, da in diesem Fall nur ein Pin für die Selektierung benötigt wird (1 digitaler Eingang). Wenn in Zukunft jedoch weiterhin Interesse an weiteren unterschiedlichen Antriebsmodi besteht, können diese mit relativ wenig Aufwand hinzugefügt werden.

Hier eine Tabelle der einzelnen Parameter im ECO- und im Sportmodus:

Parameter	ECO-Modus	SPORT-Modus
Max Speed	7000 U/min	8000 U/min
Kp	30 %	40 %
Ki	30 %	40 %
Kd	15 %	10 %
Accel Rate	2 s	1 s
Accel Release Rate	1 s	0.4 s
Brake Rate	2 s	1 s
Brake Release Rate	1 s	0.4 s
Neutral Braking	15 %	10 %
Neutral Taper Speed	500 U/min	800 U/min
Forward Full Restraint Speed	800 U/min	500 U/min
Back Full Restraint Speed	800 U/min	500 U/min

Tabelle VI.3: Antriebsmodi

Konventionelle Umsetzung

In konventionellen E-Motorrädern wird bei der Auswahl zwischen den Antriebsmodi ECO-Normal-Sport eine 7-Punkte Map hinterlegt, welche die Drehzahl abhängig vom Drehmoment beschreibt. Da dies für die schulische Umsetzung aber ebenfalls zu zeitintensiv wäre, wird dies wahrscheinlich bei späteren Optimierungen hinzugefügt.

3.3 Vehicle-Control-Language (VCL) Programmierung

3.3.1 Grundfunktion

Die Vehicle-Control-Language ist ein eigener Abschnitt der Programmierung und von der Grundidee auch sehr unterschiedlich. Die normale Parameterprogrammierung vereinfacht die generelle Programmierung des Curtis Controllers zwar sehr, beschränkt die Anzahl der Möglichkeiten jedoch auf die Anzahl der Parameter und deren Konfigurationsmöglichkeiten. Die VCL-Programmiersprache bietet hierbei eine sehr gute Erweiterungsmöglichkeit und bei Kombination der beiden Programmierarten kann die Programmierung des Curtis Controllers optimiert und enorm erweitert werden. Die Vehicle-Control-Language ist eine Programmiersprache auf der Basis von C und das VCL-Studio sieht der Benutzeroberfläche eines normalen Programms mit integriertem Editor und Compiler, wie zum Beispiel Dev-C++, sehr ähnlich. Da in diesem Fall jedoch jeder beliebige Programmcode verfasst werden kann, bietet VCL nahezu endlose Möglichkeiten. Die wichtigsten Grundlagen, auf die man bei der Programmierung von VCL aufpassen muss, sind in den beigelegten Skripten „WIN VCL User's Guide“, „VCL Programmer's Guide“ und „VCL Common Functions“ im Anhang genauer erklärt. Das Wichtigste ist jedoch die Kenntnis darüber, dass mit dem VCL-Studio nicht nur die vorhandenen oder selbsterstellten VCL-Variablen verändert werden können. Die meisten Variablen, die in den Parametermenüs vorhanden sind, können ebenfalls eingelesen und beschrieben werden. Hier ist natürlich Vorsicht geboten, denn viele Parameter dürfen in keinem Fall während des Betriebs geändert werden. Bei wichtigen Variablen muss daher auch ein Aus- und Einschalten des KSI-Pins durchgeführt werden, um die Veränderung wirksam zu machen und Komplikationen zu vermeiden. Generell ist die Hauptaufgabe einer ausgefeilten VCL-Programmierung jedoch die Automatisierung des gesamten E-Motorrades. Zum Beispiel kann beim Auftritt eines Fehlers automatisch ein zugehöriger Fehlerbehebungsvorgang eingeleitet werden. Da wir in unserem Projekt jedoch nur ein sehr kleines Zeitfenster zur Verfügung haben, konnte das VCL-Programm nicht derartig ausgereift werden. In unserem Fall beschränkt sich die VCL-Programmierung fast ausschließlich auf die Kommunikation mit dem Raspberry PI, denn die Lösung über VCL-CAN schien uns einfacher und vorallem viel flexibler wie die vorgefertigte Programmierung „CANopen“ zu verwenden.

3.3.2 Kommunikation (CAN-Bus)

Die Kommunikation erfolgt grundsätzlich nur in eine Richtung, da dies nicht nur einfacher zu realisieren war, sondern für unsere Anwendungen auch völlig ausreicht. Der Curtis Controller sendet die ausgewählten Parameter immer in der selben Reihenfolge an den Raspberry PI, dafür wurden 3 unterschiedliche Datenpakete mit jeweils einem einzigartigen Identifier und 7 folgenden Parametern erstellt. Ein Parameter enthält immer 4 Hexadezimalzahlen, also insgesamt 2 Byte. Wenn ein Fehler am Motorcontroller erkannt wurde, wird nach dem dritten Datenpaket noch ein zusätzliches Fehler-Datenpaket eingeschoben. Wenn zum Beispiel zwei Fehler am Controller vorliegen, werden diese 2 Fehler nach dem Fehler-Identifier (FFFF) gesendet, danach werden die 5 weiteren freien Plätze des Fehler-Datenpakets mit dem Fehler-Identifier aufgefüllt. Nachdem das Fehler-Datenpaket gesendet wurde, werden die ersten 7 Fehler vom Datenspeicher gelöscht, liegt der Fehler jedoch weiterhin vor, kann dieser auch nicht gelöscht werden. Hier werden die Datenpaket mit den zugehörigen Parametern noch ausführlich dargestellt:

	Datenpaket 1	Datenpaket 2	Datenpaket 3
Identifier	FFFC	FFFD	FFFE
Parameter 1	Vehicle_Speed	Vehicle_Speed	Vehicle_Speed
Parameter 2	Current_RMS	Capacitor_Volts	Vehicle_Acceleration
Parameter 3	Controller_Temperature	BDI_Percentage	Vehicle_Odometer
Parameter 4	Motor_Temperature	Interlock	Time_to_Capture_Speed_1
Parameter 5	Motor_Power	Throttle_Command	Time_to_Capture_Distance_1
Parameter 6	Motor_Torque	Brake_Command	Braking_Distance_Captured
Parameter 7	Modulation_Depth	EMR_State	Distance_Since_Stop

Tabelle VI.4: Datenpakete Deklaration

Der gesamte VCL-Programmcode befindet sich im Anhang, auffällig ist hierbei unter anderem die enorm lange Zeitverzögerung, welche den selben Delay-Befehl 3330 mal beinhaltet. Die gewünschte CAN-Bus Übertragungsfrequenz beträgt 100ms, da jedoch der integrierte Logic-Controller eine sehr viel kürzere applikationsabhängige Taktfrequenz besitzt, erwies sich das Aussenden von Parametern in der selben Reihenfolge vorerst als sehr schwierig. Es wurden viele unterschiedliche Methoden versucht, jedoch erwies sich die Synchronisation der beiden Taktfrequenzen als die einfachste. Da ebenfalls sehr wenig hilfreiche Informationen im Internet zu finden waren, wurde die Realisierung mit einer besseren Methode vernachlässigt. Die Vereinfachung bzw. Verkürzung der langen Zeitverzögerung mit einer Schleife oder ähnlichem erwies sich ebenfalls als schwierig und fehleranfällig, wurde deshalb weggelassen.

3.3.3 Speed-Mode-Select

Die Speed-Mode-Select Programmierung gehört eigentlich auch zum Punkt Drehmomentsteuerung, dieses Programm wurde aber ebenfalls in der Vehicle-Control-Language realisiert. Die zugehörigen Parameter, welche ausschlaggebend für die Drehmomentsteuerung sind, wurden bereits genau erklärt. Grundsätzlich ist das VCL-Programm sehr einfach und kurz aufgebaut, die Parameter zur Drehmomentsteuerung werden abhängig von einem digitalen Eingang verändert. Der digitale Eingang wird mittels eines externen Schalters realisiert, dieser wurde auf der Lenkstange befestigt. Wenn der Schalter auf den ECO-Antriebsmodus geschaltet wurde, werden die Parameter für den ECO-Antriebsmodus an den Drehmomentregler weitergegeben. Bei der Auswahl des Sport-Antriebsmodus werden die Parameter für den Sport-Antriebsmodus an den Regler weitergegeben.

Wie im folgenden Programmschnippel zu erkennen ist, ist der Aufbau dieses Programms äußerst einfach. Aufpassen muss man bei der Überschreibung der Parameter, da nicht die Werte mit den Einheiten, sondern die absoluten Werte verwendet werden müssen. Vorallem bei den Parametern des PID-Reglers sind unterschiedliche Absolutwerte vorgegeben, diese müssen auf den gewünschten Prozentwert skaliert werden.

```
;Speed-Mode-Select (Sport/ECO)
if(Switch_5 = 0) {
    Max_Speed_TrqM = 7000           ;ECO-Antriebsmodus
    Kp_TrqM = 2458                  ;7000rpm
    Ki_TrqM = 300                   ;30%
    Kd_TrqM = 1229                  ;30%
    Accel_Rate_TrqM = 2000          ;15%
    Accel_Release_Rate_TrqM = 1000  ;2s
    Brake_Rate_TrqM = 2000          ;1s
    Brake_Release_Rate_TrqM = 1000  ;2s
    Neutral_Braking_TrqM = 4915     ;1s
    Neutral_Taper_Speed_TrqM = 500  ;15%
    Forward_Full_Restraint_Speed_TrqM = 800 ;500rpm
    Back_Full_Restraint_Speed_TrqM = 800 ;800rpm
}
else if(Switch_5 = 1) {
    Max_Speed_TrqM = 8000           ;Sport-Antriebsmodus
    Kp_TrqM = 3277                  ;8000rpm
    Ki_TrqM = 400                   ;40%
    Kd_TrqM = 819                   ;40%
    Accel_Rate_TrqM = 1000          ;10%
    Accel_Release_Rate_TrqM = 400   ;1s
    Brake_Rate_TrqM = 1000          ;0.4s
    Brake_Release_Rate_TrqM = 400   ;1s
    Neutral_Braking_TrqM = 3276     ;0.4s
    Neutral_Taper_Speed_TrqM = 800  ;10%
    Forward_Full_Restraint_Speed_TrqM = 500 ;800rpm
    Back_Full_Restraint_Speed_TrqM = 500 ;500rpm
}
```

Abbildung VI.12: ECO/Sport-Select Programmschnippel

4 Inbetriebnahme

4.1 Leonard-Versuchsaufbau

Grundidee:

Der Bau des Li-Ionen-Akkumulators hat sich leider sehr verzögert. Um effektiv an der Inbetriebnahme des Antriebssystems weiterarbeiten zu können, musste vorübergehend eine alternative Spannungsversorgung gefunden werden, welche für die Anforderungen der Motorsteuerung geeignet ist. Da der Motor und die Motorsteuerung jedoch eine bipolare Spannungsquelle benötigen, um ordnungsgemäß in Betrieb genommen werden zu können, erwies sich dies vorerst schwieriger als gedacht. Die Beschaffung eines bipolaren Netzteils erwies sich als zu kosten- und zeitintensiv, weshalb der Betreuungslehrer vorschlug, die bipolare Spannungsquelle mittels eines Leonard-Umformers zu realisieren.

Fazit:

Der erste Schritt bei der Inbetriebnahme des Motors ist der Testlauf (Commissionierung) zur Ausmessung und Einstellung der Motorparameter. Bei der Durchführung dieses Testlaufs stoppte die Motorsteuerung jedoch immer wieder nach kurzer Zeit. Auch viele weitere Versuche bei geänderten Testparametern oder zusätzlichen parallelgeschalteten Kondensatoren brachten keine weiteren Erkenntnisse. Aufgrund des schwankenden Spannungspegels während der gescheiterten Test-Durchläufe nahmen wir genauere Messungen mittels eines Oszilloskops vor, um mögliche Fehlerursachen herausfinden zu können. Bei der Untersuchung der Gleichspannungs-Speisung konnten wir feststellen, dass in einem Zeitbereich von circa 40ms ein unerwarteter Einschwingvorgang zu beobachten war, welcher einer negativen Sinus-Schwingung sehr ähnelte. Es trat zuerst eine negative Flanke in einem Zeitbereich von 12ms und mit einer Spannungsunterhöhung von circa 30V auf, dann folgte eine Spannungsüberhöhung mit etwa den selben Werten. Nach weiteren 16ms war der Schwingungsvorgang wieder auf die Eingangsspannung von 50V zurückgefallen. Aufgrund dessen konnten wir rückschließen, dass unsere Leonard-Spannungsquelle zu träge für die Motorsteuerung ist. Außerdem entstand aus den hohen Induktivitäten des Motors und den langen Leitungen kombiniert mit den großen Kondensatoren der Motorsteuerung eine Art Schwingkreis, welcher den Trägheitseffekt zusätzlich verstärkte.

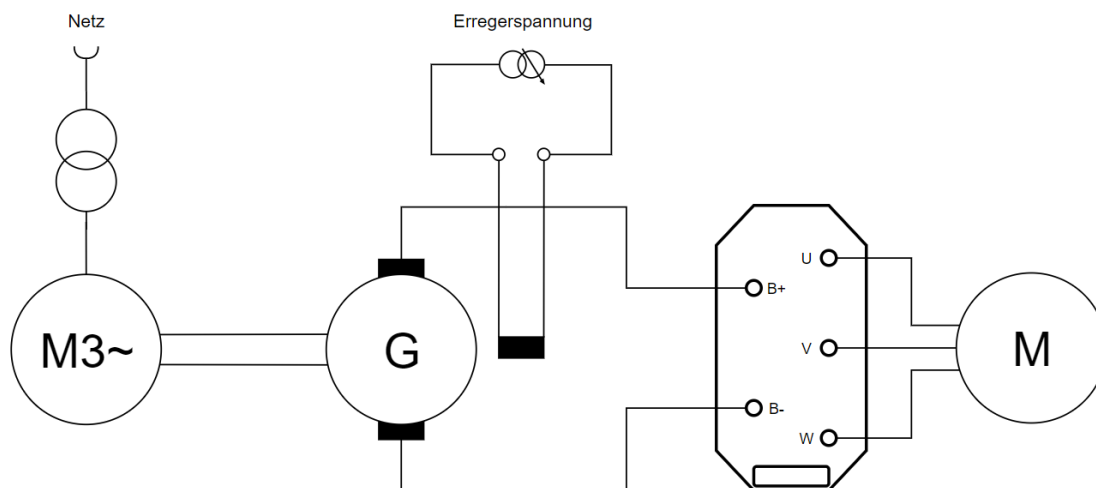


Abbildung VI.13: Leonardumformer Versuchsaufbau

4.2 Bleiakku-Versuchsaufbau

Grundidee:

Der Leonard-Versuchsaufbau hat aufgrund der Trägheit der Spannungsquelle nicht funktioniert. Übrig blieb deshalb nur die Realisierung der Spannungsquelle mithilfe eines Ersatz-Akkumulators. Zufälligerweise konnten wir im Projektraum vier Bleiakкумуляtoren ausfindig machen, welche wir nun seriell zu einer 48V-Spannungsquelle verschalten wollten. Die Bleiakkus waren zwar teils angeschlagen bzw. sehr tief entladen, mittels eines intelligenten Ladegeräts konnten aber 3 von 4 Akkus wieder erfolgreich aufgeladen werden. Mit einer von Zuhause mitgebrachten Autobatterie und zusätzlichen Starterkabeln konnte letztendlich aber die 48V-Spannungsquelle realisiert werden.

Fazit:

Der Aufbau mit den Bleiakкумуляtoren hat vorübergehend ganz gut funktioniert. Ein Problem stellten vorerst aber die großen Einschaltströme dar, welche bei der Schließung des Stromkreises zu Lichtbögen führten. Um Beschädigungen an den Kondensatoren zu verhindern, konnte dieses Problem jedoch durch Vorladen der Kondensatoren mithilfe eines 48V Netzgerätes behoben werden.

Erste Inbetriebnahme:

Der Testlauf zur Einstellung der Motorparameter hat mithilfe der Bleiakкумуляtoren beim ersten Versuch erfolgreich funktioniert. Der Motor konnte nach weiteren Konfigurationen letztendlich auch eine bestimmte Drehzahl abhängig von einem Spannungssignal anfahren.

Abbildung VI.14: Bleiakku

Kapitel VII

Akku und Ladekonzept

1 Section

Kapitel VIII

Endergebnis

1 Section

Anhang A

Arbeitsnachweis

- 1 Zeitplan
- 2 Kosten

Anhang B

Programmier-Code

Anhang C

CAD-Zeichnungen

Anhang D

Schaltpläne

Abbildungsverzeichnis

VI.1 Grundaufbau des Laststromkreises	12
VI.2 Grundaufbau des Steuerstromkreises	18
VI.3 Digital Input Specifications	19
VI.4 Analog Input Specifications	19
VI.5 Throttle Input Specifications	20
VI.6 Sin/Cos Sensor Input Specifications	20
VI.7 KSI and Coil Return Input Specifications	21
VI.8 Analog Output Specifications	21
VI.9 Digital and PWM Output Specifications	22
VI.10 Power Supply Output Specifications	22
VI.11 Communications Port Specifications	23
VI.12 ECO/Sport-Select Programmschnippel	32
VI.13 Leonardumformer Versuchsaufbau	33
VI.14 Bleiakku	34

Tabellenverzeichnis

VI.1 Geschwindigkeitsbegrenzer-Parameter	27
VI.2 Reaktions-Parameter	28
VI.3 Antriebsmodi	29
VI.4 Datenpakete Deklaration	31

Listings