

Diplomarbeit

Höhere Technische Bundeslehr- 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

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 Großstädten 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 Möglichkeiten, um für ihr Hobby auf eine emissionsfreie Alternativen 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

| | | |
|---|---|--------------------|
| Namen der Verfasser | Martin Kronberger, Jakob Lackner, Simon Kern, Tobias Schmeisser | |
| Jahrgang Schuljahr | 5AHET 2020/21 | |
| Thema der Diplomarbeit | Entwicklung eines emissionsfreien Sportmotorrades | |
| Kooperationspartner | Schrack for Students, Sigmatek EBG GmbH, | |
| Aufgabenstellung | <p>Es soll ein vollständig elektrifiziertes E-Motorrad aus einen alten Model mit Verbrennungsmotor entwickelt werden.</p> <p>Der vorherige Verbrennungsmotor wird durch eine elektrische Steuer und Motoreinheit ersetzt. Ebenfalls soll das Zweirad über ein eigenständiges Akkusystem, mit einem für das Motorrad individuellem Ladesystem verfügen. Über eine zentrale Steuereinheit wird die Kommunikation zwischen den Systemen und dem Menschen gewährleistet.</p> | |
| Realisierung | <p>Als Chassie wird eine ausgeschlachtete Duacati Monster S4 2001 verwendet und mit einem eigensentwickelten Rahmen versehen.</p> <p>Angetrieben wird das Motorrad über eine bürstenlose Synchronmaschine, welche über ein BMS gesteuertes 50,4 Volt Lithiumionen Akkupack versorgt wird. Das Moment wird vom Motor über ein Kettengetriebe mit einer Übersetzung von ungefähr 1/9 auf die Straße übertragen. Die Peripherie wird über einen Raspberry Pi Minicomputer und Taster am Lenker gesteuert.</p> <p>Ebenso wird über ihn die Benutzeroberfläche gesteuert, welche über ein 11,6 Zoll Touch Panel angezeigt und gesteuert werden kann.</p> | |
| Ergebnisse | <p>Zum Abgabepunkt befindet sich die Komponenten des Motorrads im Entwicklungszustand. Der Rahmen ist noch in der Endphase der Fertigung. Der Motor und dessen Software ist Einsatzbereit und müsste nur mehr eingebaut werden. Die Versorgung ist zu Ende entwickelt und muss ebenso nur mehr gefertigt werden. Die Steuerung der Benutzeroberfläche befindet sich im Prototypen-Status, beinhaltet jedoch noch einige experimentelle Funktionen, welche noch etwas Programmier und Testzeit benötigen. Gesamt ist das gesamte Konzept vollständig und kann mit etwas mehr Zeit und Sponsorengelder fertiggestellt werden.</p> | |
| Möglichkeit der Einsichtnahme in die Arbeit | <p>Die Diplomarbeit ist in gebundener Form sowohl in der Schulbibliothek als auch bei AV Prof. Dipl.-Ing. (FH) Roland Holzer einzusehen.</p> <p>Darüber hinaus besitzt jedes Mitglied des Projektteams eine vollständige Version in gebundener und digitaler Form.</p> | |
| Approbation (Datum/Unterschrift) | Prüfer | Abteilungsvorstand |

DIPLOMA THESIS

DOCUMENTATION

| | | |
|---------------------------------|---|--------------------|
| Author(s) | Martin Kronberger, Jakob Lackner, Simon Kern, Tobias Schmeisser | |
| Form | 5AHET | |
| Academic year | 2020/21 | |
| Topic | Development of an emission-free sports motorcycle | |
| Co-operation partners | Schrack for Students, Sigmatek EBG GmbH, | |
| Assignment of Tasks | <p>The plan is to develop a fully electrified e-motorcycle. The previous internal combustion engine is replaced by an control unit and electric motor unit. The two-wheeler should also have an independent battery system with a charging system that is individual for the motorcycle. Communication between the systems and humans is ensured via a central control unit.</p> | |
| Realisation | <p>A cannibalized Duacati Monster S4 2001 is used as the chassis and provided with a specially developed frame. The motorcycle is driven by a brushless synchronous machine, which is supplied by a BMS controlled 50.4 volt lithium ion battery pack. The torque is transmitted from the engine to the road via a chain gear with a ratio of about 1/9. The periphery is controlled via a Raspberry Pi minicomputer and button on the handlebar. It also controls the user interface, which can be displayed and controlled via an 11.6 inch touch panel</p> | |
| Results | <p>The components of the motorcycle are at the time of delivery in the state of development. The framework is still in its final stages Production. The engine and its software are ready for use and would just have to be built in. The supply is over developed and just needs to be manufactured. The Control of the user interface is in the prototype status, however still contains some experimental functions which are still unavailable</p> | |
| Accessibility of Diploma Thesis | The diploma thesis is available in the school library and at Prof. Dipl.-Ing (FH) Roland Holzer's office. Furthermore, each member of the project team has a complete version. | |
| Approval (Date/Sign) | Examiner | Department Manager |

Erklärung

Die unterfertigten Kandidaten haben gemäß §34 (3) SchUG im 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

Prof. Dipl.-Ing. (FH) Johannes Ferner
Prüfer

Prof. Dipl.-Ing. Adolf Reinhart, MBA
Prüfer

Prof. Dipl.-Ing. Peter Lindmoser
Prüfer

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

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

Inhaltsverzeichnis

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

Prof. Dipl.-Ing. (FH) Johannes Ferner

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

Prof. Dipl.-Ing. Adolf Reinhart, MBA

unterstützte Jakob Lackner bei der Entwicklung des Antriebssystems

Prof. Dipl.-Ing. Peter Lindmoser

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

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

Simon Kern

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

Tobias Schmeisser

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

Kapitel II

Einleitung

1 Motivation

Seit kurzem ist die E-Mobilität unter anderem ein neuer schulautonomer Schwerpunkt in der Abteilung Elektrotechnik, an der HTBLuVA-Salzburg. Passend zu diesem Schwerpunkt ergab sich die Idee ein Projekt zum Bereich E-Mobilität zu realisieren, um zukünftige Schüler daran zu interessieren. Die E-Mobilität umfasst Elemente aus der Mechanik, Elektrotechnik, Kunststofftechnik und Informatik, das Projekt sollte so viele wie möglich davon abdecken und darstellen können. Gleichzeitig soll das Projekt, eine Art von Prototyp für neu entwickelte Elektromotorräder sein und nicht nur als Abschlussprojekt dienen.

Das Umdenken der Gesellschaft von Verbrennungsmotoren auf Elektromotoren hat zur Folge, dass alltägliche Maschinen immer öfter mit Elektromotoren ausgestattet werden. Motorräder in dieser Größenordnung sind bis dato nicht vorhanden oder erhältlich. Es sind einige Firmen mit der Entwicklung dieser beschäftigt und es werden immer öfter neue Produkte präsentiert, doch diese Zeitalter ist erst am Anfang und benötigt noch Zeit.

Für die Herstellung eines zugelassenen Motorrades ist der Umfang einer Diplomarbeit, aus zeitlichen, sowie budgetären Gründen nicht realisierbar und aus diesem Grund Ist diese Projekt ein Prototyp eines vielleicht zukünftigen Elektro-Sport-Motorades, welches die Verwirklichung des Systems wiedergeben soll.

2 Zielsetzung

Ziel dieses Projektes war ein funktionierendes Motorrad, ohne Licht, Hupe oder sonstigen Zusatzfunktionen. Es sollte einfach das System funktionieren, welches die Fortbewegung ermöglichen soll. Das Betriebssystem soll Funktionsfähig und die Versorgung über die Akkus sichergestellt sein.

Am Ende soll ein fahrtüchtiges Elektromotorrad mit den selben Fähigkeit, wie das Original das Ergebnis sein. Das Gewicht sollte wenn möglich reduziert, aber niemals erhöht werden. Die Zulassung wird in den darauffolgenden Jahren mit der Erweiterung von Licht, Hupe, und so weiter in der Studienzeit erlangt werden. Diese Projekt soll das Interesse des Projektteams an einer Entwicklung eines solchen Produkts bei Firmen zeigen, um aus diesen Prototypen einmal ein Produkt werden lassen zu können.

Die Allgemeinen Funktionen sind die allbekannten. Fahren mit Spitzen bis zu 130 km/h, Bremsen, ABS. Bei elektrischen Antrieben kann die Bremsleistung beim bergabfahren wieder in den Akku eingespeist werden. Diese Funktion nennt sich Rekuperation und wird bei Elektroautos schon verwendet und soll natürlich auch bei dem Elektromotorrad vorhanden sein.

3 Topologie des Gesamtsystems

4 Leitfaden

Kapitel III

Stand der Technik

1 Kühlung

Bei dem Vorgang der Kühlung oder Abkühlung, wird einem System Wärme, oder thermische Energie entzogen. (Deshalb auch Entwärmung genannt) Unter Kühlung versteht man die Übertragung von Wärme einer technischen Komponente, an die Umwelt. Dieses Phänomen wird oft beabsichtigt hervorgerufen, um bestimmte temperaturabhängige Eigenschaften erreichen und erhalten, aber auch Systeme vor Überhitzung schützen zu können. Durch Isolierungen, wie beispielsweise bei Häusern, kann unerwünschter Wärmeentzug zu einem gewissen Teil verhindert werden.

1.1 Thermodynamische Grundlagen

Der Entzug von Wärme geht bei Feststoffen und Flüssigkeiten durch Wärmeübertragung entsprechend einem Temperaturgradienten vonstatten. Die wesentlichen Prozesse sind dabei Wärmeleitung und Wärmestrahlung, eingeschränkt auch die Konvektion. Da all diese Prozesse spontan ablaufen und folglich entsprechend den Grundgesetzen der Thermodynamik einen Temperaturausgleich zur Folge haben, kann eine künstlich erwünschte Kühlung eines Gegenstandes gegen einen Temperaturgradienten nur unter hohem Energieaufwand erfolgen.

Insgesamt wird dies jedoch immer mit einer Erhöhung der Gesamtentropie und damit im Regelfall einer Umwandlung Energieformen höherer Ordnung in thermische Energie resultieren. Eine Kühlung im Sinne einer Reduzierung der thermischen Energie eines abgeschlossenen Systems ist daher nicht möglich, was sich in der Praxis zum Beispiel darin äußert, dass auch Kühlschränke letztlich die Temperatur (der Umgebung) erhöhen und nicht senken, wenn dies auch lokal der Fall sein mag.

Die entscheidenden Einflussfaktoren sind dabei durch Wärmeleitkoeffizient, Wärmeübergangskoeffizient und Wärmekapazität gegeben. Bei Flüssigkeiten spielt die Wärmeleitung und Wärmestrahlung ebenfalls eine Rolle, hinzu kommt jedoch die Konvektion als wesentlicher Prozess des Temperaturausgleichs. Dieser dominiert hingegen bei Gasen, wobei diese allgemein nur sehr schlecht über Prozesse der Wärmeleitung abkühlen. Sie unterliegen jedoch verschiedenen Gasgesetzen, wodurch vor allem der adiabatischen Abkühlung und dem Joule-Thomson-Effekt eine große Rolle zukommt.

1.2 Technische Anwendung

Kühlsysteme können nach dem verwendeten Wärmeträgermedium unterteilt werden. Die geläufigsten Arten der Kühlung sind:

- Wasserkühlung und
- Luftkühlung.
- Ölkühlung z. B. im Automotor und in Hydrauliksystemen (hydraulischen Antrieben)

- Natriumkühlung in Kernkraftwerken
- Kühlung durch Peltier-Elemente Kühlung von Prozessoren

1.3 Funktionsweise

Eine Kühlung basiert meist auf der Übertragung der Wärme (Wärmeleitung) vom zu kühlendem Körper zum Kühlstoff (Gas oder Flüssigkeit) und deren Abtransport (Wärmeströmung). Bei manchen Anwendungen mit engen Platzverhältnissen (innerhalb eines Computers oder HiFi-Verstärkers) werden zum Abtransport Heatpipes verwendet. Bei den meisten Motoren wird eine spezielle Kühlflüssigkeit eingesetzt.

1.4 Einsatzgebiete

Kühlungen werden in fast allen technischen Geräten, die sich erwärmen, eingesetzt. Zumeist wird jedoch eine passive Kühlung, das heißt die Abgabe der Wärme über Kühlkörper an die umgebende Luft, genutzt. Das bekannteste Beispiel ist der Kühlschrank zur Konservierung von Lebensmitteln. In Kfz wird meist eine Wasserkühlung benutzt, in Computern kommen überwiegend Luftkühlungen zum Einsatz. Ein weiteres großes Einsatzgebiet ist zum Beispiel die Klimaanlage.

1.5 Beispiele

- Kühlsysteme von Kraftwerken und chemischen Prozessen
- Kühlung in der Klimatechnik
- Öl- und Ladeluftkühler im Turbodiesel-Motor
- Abgaskühlung in AGR-Systemen (zur Emissionsreduzierung (NOx))
- Wasserkühlung eines Automotors
- Luftkühlung eines Prozessors

Zu Kühlung siehe auch [?, ?]

1.6 Wasserkühlung

Bei einer Wasserkühlung (Flüssigkeitskühlung), wird Wasser als primäres Kühlmittel verwendet wird. Die Wasserkühlung kann sehr vielseitig eingesetzt werden. Wasser wird als Kühlung in Elektro- wie auch in Verbrennungsmotoren, Hochöfen, Stromrichtern, Kraftwerken, Computern und noch vielen weiteren Anwendungen verwendet.

1.6.1 Wasserkühlung bei elektronischen Geräten

Seit 1930 werden die röhrenbestückten Endstufen von Hochleistungssendern mit Wasser gekühlt. Da hierbei hohe elektrische Spannungen zum Einsatz kommen, kann nur destilliertes deionisiertes Wasser zum Einsatz kommen. Dieses gibt in einem Wärmeübertrager seine Wärme an einem zweiten Kreislauf ab, in dem das Wasser keinen besonderen Reinheitsanforderungen genügen muss, da es mit keinen spannungsführenden Komponenten in Kontakt kommt.

Bei Hochleistungsröhren wird die Siedekondensationskühlung angewandt. Bei dieser Technik sind Dampferzeugung und Kondensation räumlich nicht voneinander getrennt. Das Kühlmittel durchfließt den Kühlkanal, der mit zur Anodeninnenseite hin orientierten Nuten ausgestattet ist. Der in diesen Nuten entstehende Dampf gerät in den Hauptkühlkanal, wo er verwirbelt wird und wieder kondensiert. Da sich dieser Vorgang bei Temperaturen von über 100 °C abspielt, und den Aggregatzustand flüssig zu gasförmig nutzt, können mit diesem Kühlverfahren auf Grund der dafür notwendigen Verdampfungswärme auch bei relativ kleinen Röhren große Wärmemengen abgeführt werden. Moderne, halbleiterbestückte Sender haben keine Wasserkühlung mehr. Wasserkühlung wird auch in der Leistungselektronik angewandt. Zum Beispiel für Stromrichter in Anlagen der Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung oder für Traktionsstromrichter in Schienenfahrzeugen.

1.6.2 Wasserkühlung in Personal Computern

Wasserkühlungen werden auch in modernen PC-Systemen zur leisen und effektiven Kühlung einzelner Komponenten eingesetzt. Dabei wird am häufigsten der Hauptprozessor gekühlt. Weitere Komponenten, die in den Kühlkreislauf eingebunden werden können, sind Grafikkarten, Hauptplatinenchipsätze, Festplatten, Netzteile, Spannungswandler und auch RAM-Bausteine. Wasserkühlungen für PCs sind in PC-Moddingkreisen sehr verbreitet. Mittlerweile ist ein großer Markt um Wasserkühlungen entstanden. Die Vorteile einer Wasserkühlung sind zum einen die effektive Kühlung der Hardware mit für Modder und Overclocker wichtigem Übertaktungsspielraum der CPU durch verbesserte Wärmeabfuhr. Zum anderen arbeitet die Kühlung fast lautlos, da auf dem Radiator (Wärmeübertrager) große, langsam drehende Lüfter eingesetzt oder auch passive Radiatoren ohne Lüfter verwendet werden können. Außerdem erhöht sich in der Regel die Zuverlässigkeit und Lebensdauer der mit Wasser gekühlten Komponenten. Je nach verwendeter Pumpe kann die Wasserkühlung eine der stromsparendsten Kühlungsmethoden sein. Nachteilig ist der erheblich größere Installationsaufwand, die vergleichsweise hohen Kosten und der Wartungsbedarf. Häufig führt der Verzicht auf den Einsatz von Gehäuselüftern dazu, dass einzelne Komponenten überhitzten, die nicht in den Kühlkreislauf einbezogen werden können. Je nach Anzahl der verbauten Komponenten kann ein größerer Platzbedarf im Gehäuse erforderlich sein. Reines destilliertes Wasser besitzt verglichen mit allen anderen natürlichen Stoffen, die bei Zimmertemperatur flüssig sind, den höchsten Wärmeleitkoeffizienten und ist daher erste Wahl beim Bau einer Flüssigkühlung.

Zu Wasserkühlung siehe auch [?]

1.7 Luftkühlung

Durch Luftkühlung wird die Oberfläche von wärmeerzeugenden Objekten wie elektronischen Bauelementen der Leistungselektronik, Verbrennungsmotoren und Klimaanlagen durch daran vorbei strömende Luft gekühlt. Die zur Luftkühlung notwendige Luftbewegung kann entweder durch Konvektion, Gebläse oder bei Fahrzeugen durch den Fahrtwind bewirkt werden. Das zu kühlende Objekt steht frei oder wird kanalisiert umflossen. Häufig ist das zu kühlende Objekt auch mit Kühlrippen oder einem Kühlkörper als Wärmeübertrager versehen, die durch eine größere Oberfläche einen größeren Wärmeabfluss ermöglichen.

1.7.1 Luftkühlung bei Personalcomputern

Im Verhältnis zur Baugröße geht - insbesondere bei Prozessoren ab der Klasse Intel 486/66 - mit der kommerziell wirtschaftlich zur Verfügung stehenden Technologie eine große Wärmeentwicklung einher. Leistungsstarke Mikrochips, wie sie in aktuellen PCs verwendet werden, erzeugen erhebliche Verlustwärmе, die überwiegend durch eine Luftkühlung abgeführt wird. Zweck ist, eine thermische Überlastung der Chips zu verhindern.

Da die gesamte Aufnahmleistung in Wärme umgesetzt wird, wurde zunächst die Betriebsspannungen der wärmeerzeugenden Komponenten reduziert. Ferner werden in aktuellen Prozessoren Teile des Rechenwerkes bei Nichtgebrauch in der Taktfrequenz reduziert oder ganz abgeschaltet. Trotzdem reichte die natürliche Wärmeabfuhr durch Strahlung und Konvektion nicht mehr aus, so dass die thermisch wirksamen Oberflächen erst durch den Einsatz von Kühlkörpern gekühlt wurden und dann - weil immer noch nicht ausreichend - die mögliche Wärmeabfuhr durch Einsatz von elektrisch betriebenen Ventilatoren vergrößert wurde (vgl. Prozessorkühler).

Das am stärksten gekühlte System in PCs ist die CPU, doch auch das Netzteil und seit einiger Zeit auch die Prozessoren von Grafikkarten werden luftgekühlt. Alternativ dazu kann man auch in PCs eine Wasserkühlung einbauen.

Weitere Anwendungen:

- HiFi-Verstärker
- Spanen an hygroskopischen(Feuchtigkeitziehenden) Kunststoff

Zu Luftkühlung siehe auch [?, ?]

1.8 Ölkühlung

Unter Ölkühlung versteht man eine Kühlung mit Öl. Die Ölkühlung wird hauptsächlich für leistungselektrische Geräte, wie Transformatoren angewandt, wobei das Öl auch die Funktion der Isolation übernimmt. Bei der Ölkühlung befindet sich das wärmeentwickelnde Element in einem Ölbad, welches mit einem Ausdehnungsgefäß ausgestattet ist, um Volumenschwankungen des Öls auszugleichen.

1.9 Aktive Kühlung

Bei aktiver Kühlung wird die zu kühlende Komponente mit Hilfe eines Lüfters oder einer Pumpe gekühlt.

1.9.1 Aufbau

Im Regelfall besteht eine aktive Kühlung aus folgenden Komponenten: Kühlmittel kann aus Luft, Wasser oder einer speziellen Kühlflüssigkeit bestehen, welche meist noch für eine Schmierung der Bauteile sorgt. Lüfter oder Pumpe, welcher einen Kühlmittelstrom erzeugt der den Wärmeübertrager Radiator durchströmt und das Kühlmedium auf seine Ausgangstemperatur herunterkühlt, oder aber durch den Luftstrom das zu kühlende Bauteil direkt kühlt.

Funktionsprinzip: Flüssigkühlung Das Kühlmedium (Wasser, Kühlmittel) wird mit Hilfe einer Pumpe durch diverse Leitungen an das zu kühlende Bauteil befördert. Dort umströmt es entweder das Bauteil direkt oder fließt durch einen speziellen Aufsatz am zu kühlenden Bauteil (z.B. Prozessor in einer PC-Wasserkühlung). Hierbei nimmt das Kühlmittel die Wärme des Bauteils auf und transportiert sie beim Weiterfließen ab. Das Kühlmittel fließt anschließen, (bei nur einer zu kühlenden Komponente), durch den Radiator welcher aktiv mit Lüfter, oder passiv ohne Lüfter, dafür aber größer ausgelegt sein kann.

Durch den Radiator kann das Kühlmedium die Wärme an die Umgebung abgeben. Ein Temperaturgefälle ist dazu immer notwendig; je größer das Temperaturgefälle, desto größer die Wärmemenge, die je Zeiteinheit und Fläche übertragen werden kann. Funktionsprinzip Luftkühlung

Zu Aktive Kühlung siehe auch [?]

2 Akkusysteme

Verschiedene Speicher für elektrische Energie, die auf einer elektrochemischen Basis basieren, nennt man Batterien oder auch Akkumulatoren. Elektrochemische Speicher haben in den vergangenen Jahren immer mehr an Bedeutung gewonnen und werden auch in Zukunft immer öfter Gebrauch finden. Möglich wurde unsere heutige elektronische Mobilität erst mit der Erfindung der galvanischen Zelle. Seit dieser Erfindung, die mit Hilfe eines Stromkreises chemische Energie in elektrische Energie umzuwandeln, hat sich über die Jahrzehntelange Weiterentwicklung der Batterie einiges getan. Die Einsatzmöglichkeiten von Akkumulatoren sind extrem vielfältig. Kleine Lithium-Ionen Akkus werden zum Beispiel als Knopfzellen in Smartphones verwendet. Jedoch können sie auch bis hin zu großen stationären Energiespeichern für erneuerbare Energien benutzt werden. Wie bereits vorher erwähnt, sind elektrische Energiespeicher ein wichtiger Bestandteil für den Erfolg der Elektromobilität geworden. Es gibt unzählig viele verschiedene Arten von Batterien, die sich im chemischen Aufbau, ihrer Form und natürlich in ihren Einsatzmöglichkeiten unterscheiden. Durch die äußerst besonderen chemischen Eigenschaften und die vielseitigen Anwendungsbereiche, hat sich der Lithium-Ionen Akku durchgesetzt.

3 Batteriearten

3.1 Bleiakkumulator

Die ersten Versuche, einen auf Blei basierenden Akkumulator zu entwickeln, wurden am Anfang des 19. Jahrhunderts durchgeführt. Industriell wurde der Bleiakku interessant, als Forscher und Chemiker zusammen 1880 ein Verfahren entwickelten, bei dem der Bleiakkumulator bereits nach wenigen Ladezyklen, eine hohe Kapazität erreichte. Der erste technisch einsetzbare Bleiakkumulator wurde 1886 von Henri Tudor entwickelt. Dieser besitzt eine Zellspannung von ungefähr 2V (abhängig vom Ladezustand), was eine durchaus große Spannung für sogenannte "wässrige Systeme" ist. Der Ausdruck "wässrige Systeme" leitet sich von dem Elektrolyt ab. Bei Bleiakkumulatoren wird wässrige Schwefelsäure als Elektrolyt verwendet. Im entladenen Zustand bestehen beide Pole aus Blei(II)-sulfat ($PbSO_4$). Weiters besteht die Kathode aus Blei und die Anode aus Bleioxid. Bleiakkumulatoren sollten keinesfalls tiefenentladen werden, da dies zu Schäden führt und den Akku unbrauchbar macht. Ein extrem großer Nachteil ist das Gewicht, da nur 30 bis 40Wh/kg erreicht werden können. Diese Art von Akku zeichnet sich durch das kurzzeitige Zulassen hoher Ströme aus die zum Beispiel für Fahrzeug -bzw. Starterbatterien notwendig sind. Unter anderem sind 50 Prozent des Batterimarkets von Bleiakkumulatoren belegt. Wie vorher bereits erwähnt werden diese oftmals in Autos, LKWs oder auch Motorräder verbaut.

3.2 Nickel-Metallhybrid Akkumulatoren

Die technischen Grundlagen des Nickel-Metallhybrid Akkumulator wurden von Stanford R. Ovshinsky und Masahiko Oshitani ab 1962 bis 1982 zur marktreifen Zelle entwickelt. Seit dem Jahr 2006 sind spezielle NiMH-Akkumulatoren auf dem Markt, die sich gegenüber herkömmlichen NiMH-Akkus durch eine deutlich reduzierte Selbstentladung auszeichnen. Die positive Elektrode eines Nickel-Metallhybrid Akkumulators(NiMH) besteht aus Nickel(II)-hydroxid wogegen sich die negative Elektrode aus einem Metallhybrid zusammensetzt. Als Elektrolyt verwendet dieser Akkumulator eine Wasserstoffspeicherlegierung aus Nickel und seltenen Erden. NiMH-Akkus erreichen bis zu 80Wh/kg. Sie sind vielfach in den üblichen Bauformen von Standardbatterien verbreitet und liefern pro Zelle eine Spannung von 1,2V. Oftmals werden sie als wiederaufladbare Alternative der gängigen Alkalibatterien in haushaltsüblichen Geräten eingesetzt. Ein großer Vorteil gegenüber den Nickel-Cadmium Batterien ist es, dass der NiMH Akku nicht aus giftigen Cadmium besteht und er außerdem eine höher Energiedichte aufweist. Der Anwendungsbereich von NiMH Akkumulatoren ist sehr vielfältig. Vorzugsweise kommen sie wie NiCd Akkus überall dort zur Anwendung, wo ein hoher Energiebedarf besteht und hohe Batteriekosten vermeiden werden sollten. Typische Anwendungsbereiche sind zum Beispiel Foto- Videogeräte, Elektroautos, Elektrowerkzeuge und noch viele mehr. NiMH Akkus werden außerdem oft als Energiespeicher für Notbeleuchtungsanlagen verwendet.

3.3 Nickel-Cadmium Akkumulatoren

1899 wurde der Nickel-Cadmium Akku von dem Schweden W. Jungner entwickelt. NiCd Akkus zeichnen sich dadurch aus, dass sie einen eingebauten Ent- und Überladeschutz integriert haben. Das hat zur Folge, dass man keine aufwendige elektronische Schaltung durchführen muss. Als Material für die Kathode dieses Akkus verwendet man Nickeloxidhydroxid. Die Anode dagegen besteht aus dem giftigen Material Cadmium, welches jedoch eine äußerst hohe spezifische Ladung (478Ah/kg) besitzt. Bei Nickel-Cadmium Akkumulatoren besteht das Elektrolyt aus Kalilauge. Die typische Nennspannung ist exakt die selbe wie bei NiMH Akkus, 1,2V. Aus dieser Zellenspannung ergibt sich eine spezifische Energie von ungefähr 60Wh/kg. Eine Eigenschaft die man bei anderen Technologien nur selten antrifft ist das hervorragende Tieftemperaturverhalten von NiCd Akkus. Selbst bei einer Temperatur von -40°C ist eine Inbetriebnahme noch möglich. Im Jahr 2004 wurde jedoch die Verwendung von Nickel-Cadmium Akkus wegen dem giftigen Material auf medizinische und sicherheitrelevante Bereiche begrenzt. Diese Akkumulatoren sind in 2 verschiedenen Bauformen verfügbar, die sich durch die unterschiedlichen Anwendungsbereiche unterscheiden. Die offene Bauweise wird meist für Starterbatterien für Verbrennungsmotoren und Traktionsbatterien für Elektrofahrzeuge verwendet. Bei der anderen Bauweise, werden die Zellen gasdicht verschlossen. Oftmals werden sie für zentrale Stromversorgungssysteme für Notbeleuchtung verwendet.

3.4 Lithium-Ionen Batterie

3.4.1 Geschichte

Schon bereits in dem Jahr 1970 wurde von Jürgen Otto Besenhard und anderen das grundlegende Funktionsprinzip der Alkalimetallionen-Interkalation in Kohlenstoff-Elektroden sowie auch in oxidischen Elektroden erforscht und veröffentlicht. Ebenfalls wurde dabei die Anwendung in Lithium Batterien untersucht auch wenn zu der Zeit die praktische Anwendbarkeit als Elektroden für Lithium Batterien noch nicht erkannt wurde. Der erste auf dem Markt erhältliche Lithium-Ionen Akkumulator wurde von Sony im Jahr 1991 angeboten. Dieser Lithium-Cobaltdioxid Akku wurde in einer Videokamera verbaut. Die Batterie, die eine Spannung von 7,2V aufweiste, bestand aus zwei seriell verschalteten Zellen und weiste etwa eine Kapazität von 1200mAh auf. Sogar bis heute wird diese Bauform von Akkumulatoren mit Kapazitäten bis zu 6900mAh angeboten und in äußerst vielen Geräten eingesetzt. Drei Physiker bzw. Chemiker (Whittingham, Goodenough und Yoshino) erhielten 2019 sogar den Nobelpreis für Chemie, für die Entwicklung der Lithium-Ionen Batterie. Forscher einer Universität fanden im Jahr 2020 heraus, dass durch die Zugabe von dem Element Kalium die Lithium Akkumulatoren langlebiger und sicherer werden. Außerdem verhindert das Kalium in dem Akku unerwünschte chemische Nebenreaktionen.

3.4.2 Allgemeines

Es gibt zahlreiche verschiedene Bauformen von Lithium-Ionen Akkumulatoren. Diese Batterien unterscheiden sich nicht nur in ihrer Größe und der Bauform, sondern auch in der chemischen Zusammensetzung ihrer Komponenten und haben unter anderem auch verschiedene Spannungsbereiche. Kenndaten wie Zellenspannung, Lade- und Entladeschlussspannung, Temperaturempfindlichkeit und der maximal zulässige Lade- oder Entladestrom variieren bauartbedingt und sind wesentlich vom eingesetzten Elektrodenmaterial und den Elektrolyten abhängig. Eine Eigenschaft die alle Lithium-Ionen Akkumulatoren gemeinsam haben ist, dass sie gasdicht versiegelt sein müssen und außerdem lageunabhängig betrieben werden können. Die spezifische Energiedichte liegt ungefähr in der Größenordnung von 150Wh/kg und weist eine Energiedichte von 400Wh/l auf. Durch diese Eigenschaften findet diese Art von Batterie besonderen Einsatz in der mobilen Branche als elektrischer Energiespeicher. Ein weiteres wichtiges Merkmal aller Lithium-Ionen Akkumulatoren ist, dass sie Überladungen nicht verkraften können. Wenn man mehrere Zellen zum Beispiel in Reihe schaltet, um eine höhere elektrische Spannung zu erzielen, müssen zum Ausgleichen der Toleranzen in der Kapazität zwischen den Zellen meistens zusätzlich ein Batteriemanagementsystem (BMS) und ein Balancer vorgesehen werden.

3.4.3 Prinzip der Lithium-Ionen Batterie

Ein Lithium-Ionen Akkumulator erzeugt durch die Verschiebung von Lithium-Ionen eine elektromotorische Kraft. Beim Ladevorgang wandern positiv geladene Lithium-Ionen durch einen Elektrolyten hindurch von der positiven Elektrode zur negativen, während der Ladestrom die Elektronen über den äußeren Stromkreis liefert. Eine negative Elektrode aus Lithium-Metall ist elektrochemisch optimal, für einen Akku aber ungeeignet. Da sich die Elektrode beim Entladevorgang genauso wie bei einer Lithium-Batterie auflöst, besteht beim Ladevorgang keine Möglichkeit mehr, ihre Geometrie zu rekonstruieren.

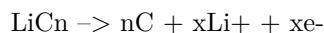
Aufbau:

Die negative Elektrode eines gänigen Lithium-Ionen Akkus besteht meist aus Graphit. Die positive Elektrode hingegen enthält meist Lithium-Metalloxide in Schichtstruktur wie Lithiumcobaltoxid (LiCoO_2). Der Lithium-Ionen Akkumulator muss wasserdicht sein, da es sonst zu einer Nebenreaktion zwischen dem Wasser (H_2O) mit dem Leitsalz (LiPF_6) zu Flußsäure (HF) reagieren kann. Das am häufigsten verwendete Elektrolyt in Lithium-Ionen Akkumulatoren besteht aus einer Mischung zwischen wasserfreien Lösungsmitteln (Ethylencarbonat, Propylencarbonat) mit Alkylcarbonaten/Äthern (Dimethylcarbonat, Diethylcarbonat) und natürlich mit Lithiumsalzen.

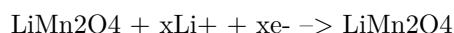
Beim Aufladen der Lithium-Ionen Akkus, d.h. anlegen einer äußeren Potenzials, fließen Lithium-Ionen zwischen die Graphitebenen ($n\text{C}$). Zusammen mit dem Kohlenstoff bilden diese Ionen eine Interkalationsverbindung ($\text{Li}_{x\text{n}}\text{C}$). Anders als beim Aufladen, wandern die Lithium-Ionen beim Entladen wieder in das Metalloxid und die Elektronen der Batterie können über einen äußeren Stromkreis wieder zur positiven Elektrode fließen. Ausschlaggebend für diese Interkalationsverbindung ist die Ausbildung einer schützenden Deckschicht auf der negativen Elektrode. Für die Lithium-Ionen ist diese Schicht durchlässig, jedoch die Lösungsmittelmoleküle können diese Deckschicht nicht durchdringen. Es kann passieren, dass diese Deckschicht nicht genügend ausgebildet worden ist. Das hat zur Folge, dass die Lithium-Ionen mit den Lösungsmittelmolekülen interkalieren, wodurch die Graphitelektrode stark beschädigt, oder sogar zerstört wird.

Reaktionsgleichungen:

- **Negative Elektrode (Entladung):**



- **Positive Elektrode (Entladung):**



- **Redox Gleichung:**

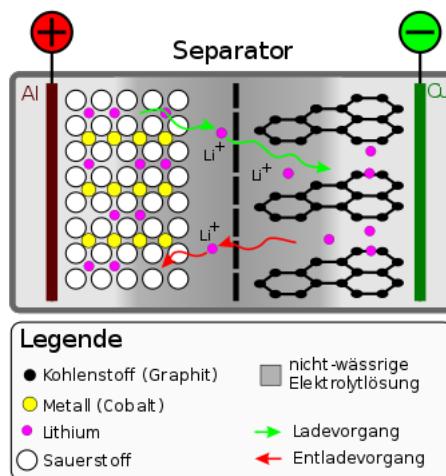
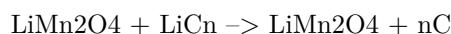


Abbildung III.1: Grundaufbau einer Lithium-Ionen Zelle

3.4.4 Lagerung und Sicherheitshinweise

Auch wenn Lithium nur als Li-Verbindungen in Lithium-Ionen Akkumulatoren vorhanden sind, sind die Komponenten eines solchen Akkus extrem leicht entzündbar, da Lithium ein hochreaktives Metall ist. Beim Überladen sind Ausgleichsreaktionen (z.B. die Zersetzung von Wasser), bei Lithium-Ionen Akkus nicht möglich, wie bei anderen Akkumulatoren dies der Fall ist. Schutzschaltungen die intern verbaut sein sollten, müssen eine solche Verpufferung verhindern. Anderfalls wird sonst die Funktionsfähigkeit des Akkus zerstört und er wird unbrauchbar. Jedoch kann es nicht nur zu inneren Beschädigungen kommen. Im Falle von inneren Kurzschlüssen, kann es passieren, dass mechanische Beschädigungen entstehen. Der hohe Kurzschlussstrom lässt zum Beispiel das Gehäuse schmelzen oder sogar in Flammen aufgehen. Es kann auch passieren, dass man den Defekt nicht unmittelbar erkennen kann. Doch kurze Zeit später kann es bereits zum Ausbruch eines Feuers kommen.

Lagerung:

Im Idealfall, sollten Lithium Ionen Akkus bei einem Ladezustand zwischen 40 - 60 Prozent kühl aufbewahrt und gelagert werden.

Sicherheitshinweise:

- Es ist wichtig, dass Lithium-Ionen Akkus nur mit passenden Ladegeräten aufgeladen werden. Schnell-Ladegeräte für Lithium Akkumulatoren können beispielweise eingesetzt werden. Man muss darauf achten, dass sie immer unter Aufsicht und möglichst nicht in der Nähe von brennbaren Materialien benutzt werden.
- Lithium-Ionen Akkus sind zwar hermetisch gekapselt, dennoch sollten sie unter keinen Umständen in Wasser getaucht werden. Besonders defekte und vollgeladene Lithium-Zellen reagieren meist heftig mit Wasser.
- Lithium-Ionen Akkumulatoren sind mechanisch sehr empfindlich. Durch einen internen Kurzschluss und einem Kontakt mit Luft können sie sich schnell entzünden.
- Eine Lithium-Ionen Zelle die in Flammen steht, wenn möglich mit Sand und nicht mit Wasser löschen, da dies zu einer heftigen Reaktion führen kann.
- Lithium-Zellen sollten niemals über 4,2V geladen und nicht unter 2,5V pro Zelle entladen werden. Außerdem dürfen Zellen niemals kurzgeschlossen werden. Bei einem Ladvorgang ist auf eine gute Wärmeabfuhr zu achten (nicht in die Sonne legen).
- Mehrere Lithium-Zellen sollten nur dann gleichzeitig geladen werden, wenn eine Schutzschaltung vorhanden ist.
- Die Elektrolytflüssigkeit ist brennbar. Sollte aus einer Zelle Elektrolytflüssigkeit austreten, diese am besten sofort ordnungsgerecht entsorgen.
- Man sollte versuchen die Lithium-Zellen bei einer Restkapazität von 20 Prozent nachzuladen.

3.4.5 Anwendungsbereiche von Lithium-Ionen Akkumulatoren

Lithium-Ionen Akkus versorgten anfangs hauptsächlich tragbare Geräte mit hohem Energiebedarf, für die herkömmliche Nickel-Cadmium- oder Nickel-Metallhydrid Akkus zu schwer oder zu groß waren, beispielsweise Mobiltelefone, Tablets, Digitalkameras, Camcorder, Notebooks, Handheld-Konsolen oder Taschenlampen. In der heutigen Zeit sind Lithium-Ionen Akkumulatoren fast in allen denkbaren Bereichen aufzufinden. In der Elektromobilitätsbranche dienen sie oftmals als Energiespeicher für Elektroautos, moderne elektronisch betriebene Rollstühle und auch für Hybridfahrzeuge. Auch im Modellbau haben sie schon früh Verwendung gefunden. Dadurch, dass Lithium Akkus ein deutlich geringeres Gewicht als andere Batteriearten aufweisen, sind sie in Verbindung mit bürstenlosen Gleichstrommotoren und den entsprechenden Reglern, gut als Antriebseinheit im Flugmodellbau geeignet. Schon seit Anfang des 21. Jahrhunderts, gibt es Lithium-Ionen Akkus auch in Elektrowerkzeugen wie zum Beispiel Akkuschraubern. Auch im Flugbetrieb haben diese Batterien Verwendung gefunden. In der Boeing 787 werden ebenfalls Lithium-Kobaltoxid-Akkus (LiCoO_2) verwendet. Zum Großen Teil werden Lithium-Ionen-Batterie-Systeme auch in Batterie-Speicherkraftwerken und Solarbatterien eingesetzt.

3.5 Batteriemanagementsystem

Batteriemanagementsysteme (BMS) sind elektronische Regelschaltungen, die Akkumulatoren oder Akkupacks auf Ladung und Entladung überwachen und ebenfalls regeln. Die Batteriekennwerte die man überwachen kann bzw. möchte, hängen oftmals von dem Projekt ab. Zu den häufigsten Batteriekennwerten gehören die Erkennung des Batterietyps, die Batteriespannung, die Spannung sowie die Temperatur einzelner Batteriezellen, die Akkukapazität, der Ladzusatz, die Restbetriebszeit, die Stromentnahme und einige Kennwerte mehr. Die Hauptaufgabe von BMS-Systemen besteht darin, sicherzustellen, dass die Restenergie in einer Zelle optimal genutzt wird. Um keine Beschädigungen an Zellen zu bekommen, schützt das Batteriemanagementsystem die Batterien vor Tiefenentladung, vor Überspannung, vor zu schneller Ladung (begrenzen des Ladestroms) und ebenfalls vor einem zu hohen Entladestrom. Bei Akkupacks, d.h. Akkumulatoren mit mehreren Zellen, sorgt das Batteriemanagementsystem außerdem für ein sogenanntes Balancing, das sich darin ausdrückt, dass die verschiedenen Batteriezellen gleiche Ladezustände und Entladezustände haben.

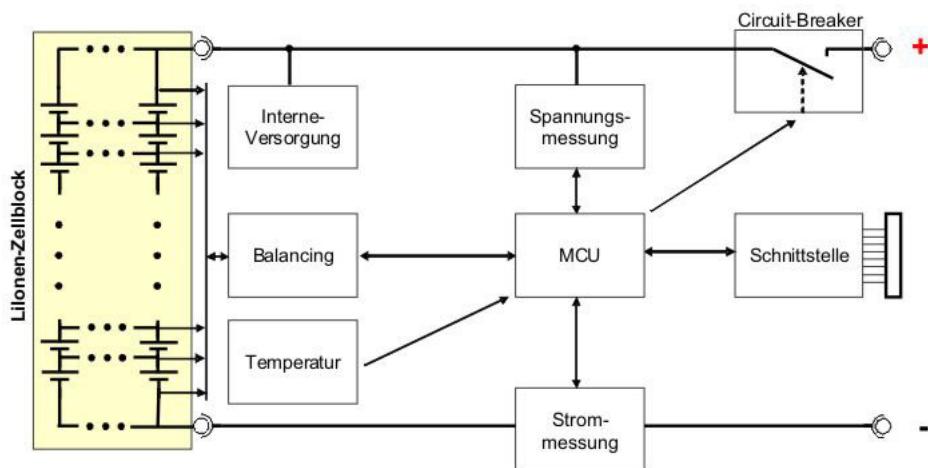


Abbildung III.2: Grundschatzung eines Batteriemanagementsystems

Grundsätzlich setzt sich ein vollständiges Batteriemanagementsystem aus folgenden Komponenten zusammen:

- **Cell Supervising Circuit(CSC):**

Die Aufgabe des CSC besteht darin die Zellen auf Spannung und Temperatur zu überwachen.

- **Kontrolleinheit:**

Die Kontrolleinheit berechnet die State of Charge (SOC), die State of Health (SOH) und überprüft auch die Funktionalität der Batterien (State of Function). Außerdem wird von der Kontrolleinheit auch der Ladeausgleich gesteuert und kommuniziert über eine serielle Schnittstelle mit einem Prozessor.

- **Circuit Breaker:**

Der Circuit Breaker trennt im Fehlerfall die Batterie von der Last. Dies erfolgt mithilfe eines HS-Kontaktors.

- **Strommessvorrichtung:**

Diese Komponente ist für die Messung des Stromes zuständig.

- **Temperaturüberwachung:**

Diese Komponente überprüft, ob sich die Batterien oder die Akkupacks in einem zulässigen Temperaturbereich befinden.

3.5.1 Komponenten eines BMS

Cell Supervising Circuit (CSC): Die erste Komponente eines Batteriemanagementsystem ist für die Spannungs- und Temperaturüberwachung der einzelnen Zellen zuständig und wird als Cell Supervising Circuit (CSC) bezeichnet. Ein Akkusystem besteht immer aus mindestens 2 einzelnen Zellen, oftmals jedoch aus mehreren. Deswegen ist die Spannungs- und Temperaturüberwachung jeder einzelnen Zelle nicht möglich. Es kommt durchaus vor, dass mehrere einzelne Zellen zu sogenannten Akkupacks zusammengeschraubt oder zusammengeschweißt werden. Man hat dann wiederum die Möglichkeit, jedes Akkupack für sich mithilfe eines CSC zu überwachen.

Kontrolleinheit: Die nächste Komponente wird auch als Kontrolleinheit bezeichnet. Die Aufgabe dieser Komponente liegt darin, die SOC (State of Charge) und auch die SOH (State of Health) zu berechnen. Außerdem steuert die Kontrolleinheit auch den Ladeausgleich der einzelnen Zellen oder der Akkupacks. Diese Komponente übernimmt auch die Kommunikation des Batteriemanagementsystems mit anderen angeschlossenen Einheiten. Diese Kommunikation erfolgt über eine serielle Schnittstelle wie den I2C-Bus oder dem CAN-Bus. Die Werte (SOC und SOH) und auch die SOF (State of Function) werden dann an einen Prozessor übermittelt auf dem die BMS-Software läuft und außerdem der SOC-Algorithmus implementiert ist. Die Kontrolleinheit ist fähig sich selbst in einen Ruhezustand zu versetzen um den eigenen Stromverbrauch um ein Minimum zu reduzieren.

- **State of Health (SOH):**

Beschreibt den aktuellen Alterungszustand der Batterie. Ein Kriterium dafür ist, welche Ladungsmengen die Zellen noch aufnehmen. Je älter die Akkumulatoren werden, desto weniger Aufnahmevermögen haben sie.

- **State of Charge (SOC):**

Beschreibt den momentanen Ladezustand der Batterie. Außerdem gibt er Auskunft darüber, wie viel beziehungsweise wie lange die Batterie noch Energie bereitstellt. Beim Aufladen der Akkus gibt es an, wie viel Energie er noch aufnehmen kann.

- **State of Function (SOF):**

Gibt die Funktionalität der Batterie an. State of Function beschreibt die Leistungsfähigkeit der Batterie. Also wie viel kW der Energiespeicher dem Motor zum Beispiel bereitstellen kann. Die Leistungsfähigkeit lässt mit zunehmendem Batteriealter nach.

Circuit-Breaker: Tritt ein Fehler bei einer einzelnen Zelle oder auch einem ganzen Akkupack auf, wird diese Batterie mithilfe eines HS-Kontaktors (Circuit-Breaker) von der Last getrennt. Dies schützt den Akkumulator. Dieser Kontaktor übernimmt außerdem noch die Trennung eines Akkumulators im Ruhezustand. Fehler die durch Trennen der Last beseitigt werden können sind zum Beispiel Kurzschlüsse oder auch Übertemperatur. Für den Kurzschlussfall sind meistens auch Schmelzsicherungen (eine Art Sollbruchstelle im Stromkreis; die Wärmewirkung des Stromes wird ausgenutzt) verbaut die verhindern, dass Leitungen oder auch das Gehäuse in Flammen aufgehen.

Strommessvorrichtung: Diese Komponente ist wie der Name schon beschreibt, für die Messung des Stromes zuständig. Oftmals werden dazu zwei voneinander unabhängige Systeme verwendet. Um den Strom messen zu können, wird ein Messsensor verwendet. Dies ist meist ein einfacher Widerstand. Bei der zweiten Methode wird der Strom über das elektromagnetische Feld gemessen.

Temperaturüberwachung: Die letzte Komponente, die benötigt wird, um das Batteriemanagementsystem zu vervollständigen, ist für den Temperaturausgleich zuständig. Das heißt, es wird überwacht ob sich der Akkumulator in einem zulässigen Temperaturbereich befindet. Sollte das nicht der Fall sein, können innere sowie auch äußere Schäden an der Batterie entstehen. Außerdem wirkt sich die Temperatur auf die Lebensdauer der Akkus auf.

3.5.2 Battery-Balancing

Der Ausdruck Balancing bezogen auf Akkumulatoren bedeutet so viel wie Ladeausgleich. Ohne Battery-Balancing bestimmt in einem Mehrzellen-Akku immer die schwächste Zelle darüber, welche Kapazität oder Spannung das Gesamtsystem aufweist. Das ergibt sich daraus, da sich jede Zelle minimal von einer anderen Zelle, durch ihre chemischen Struktur, unterscheidet. Einzelne Batteriezellen können auch unterschiedlich altern und deswegen kann man nie sicherstellen, dass jede Zelle exakt die identische Kapazität aufweist. Manche Zellen laden etwas schneller oder langsamer als andere. Wiederrum andere Batterien entladen sich etwas zügiger oder eben auch langsamer. In der Regel gibt es zwei verschiedene Arten von Battery-Balancing.

- **Passives Battery-Balancing**
- **Aktives Battery-Balancing**

Akkupacks:

Muss noch zitiert werden: Cluster oder Akkupacks bestehen zur Erhöhung der Nennspannung in der Regel aus mehreren in Reihe geschalteten Einzelzellen oder Zellblöcken. Fertigungs- und alterungsbedingt gibt es hierbei Schwankungen in der Kapazität, im Innenwiderstand und weiteren Parametern dieser Zellen. Die schwächste Zelle ist dabei bestimmend, wie viel geladen oder entladen werden darf. Im praktischen Einsatz von mehrzelligen in Reihe verschalteten Akkus führt dieser Umstand dazu, dass die Zellen in Reihe unterschiedlich geladen und entladen werden.

Es kommt dann im Verbund zu kritischer Tiefentladung oder bei der Ladung zu einer Überladung und Überschreiten der Ladeschlussspannung einzelner Zellen. Je nach Akkutyp kann es dabei zu einer irreversiblen Schädigung einzelner Zellen kommen. Die Folge: das gesamte Akkupack verliert an Kapazität. (Ende des Zitates) Um das zu verhindern, spielen im Batteriemanagementsystem die Balancer eine wichtige Rolle. Beim Battery-Balancing gibt es zwei verschiedene Arten.

- **Passives Battery-Balancing**
- **Aktives Battery-Balancing**

4 Synchronmaschine mit Dauermagneterregung

4.1 Allgemeines

Permanenterregte Synchronmotoren haben eine mindestens doppelt so große Bemessungsleistung wie Asynchronmaschinen mit gleicher Baugröße, zudem besitzen sie ebenfalls weniger Gesamtverluste. Die fehlende Läufernutung und die hohe Remanenzflussdichte der Dauermagnete erlauben höhere Luftspaltflussdichten, dadurch lassen sich ebenfalls höhere Leistungsdaten realisieren. Die Permanentmagneten befreien die Ständerwicklung von der Aufgabe der Magnetisierung durch Aufnahme einer Blindstromkomponente, dies erhöht den Wirkstrom und damit auch die erreichbare Leistung. Die PSM müssen jedoch anwendungsspezifischer ausgelegt werden, denn es entfallen alle Einflussmöglichkeiten auf die Betriebsdaten, speziell auf Betrag und Phasenlage des Ständerstroms, die sonst durch die Änderung des Feldes über den Erregerstrom gegeben sind.

4.2 Aufbau

Um eine gute Ausnutzung des Bauvolumens realisieren zu können, wird der Ständer meist mit einer sechspoligen Drehstromwicklung ausgeführt. Der Läufer ist dabei wie in folgender Abbildung beschrieben mit Dauermagneten ausgeführt. Große Aussparungen im Läuferblech (2) reduzieren das Trägheitsmoment.

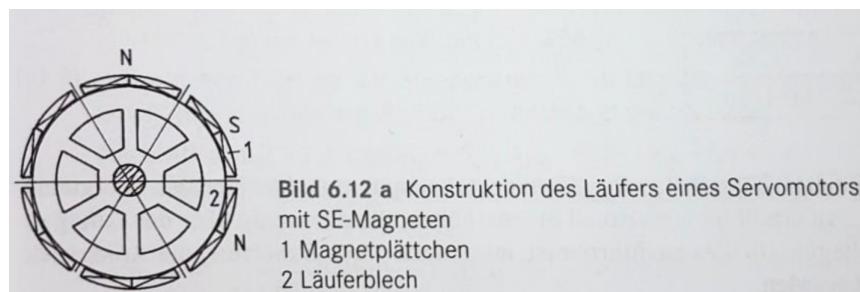


Abbildung III.3: Läufer einer dauerstärkerregten Synchronmaschine

4.3 Funktionsweise

Im Motorbetrieb wird an die Klemmen der Ständerwicklungen ein Drehstrom angelegt und dadurch ein sinusförmiges Drehfeld erzeugt. Da sich ungleiche magnetische Pole anziehen, wird der Rotor mit seinem zugehörigen Magnetfeld synchron mit dem angelegten Drehfeld mitbewegt. Im Leerlauf stehen sich also der Norpol des Stator-Drehfelds und der Südpol des permanenterregten Rotor-Magnetfelds exakt gegenüber, die Drehzahl des Läufers ist also synchron mit der Drehzahl des angelegten Drehfelds. Bei bremsender Last eilt das Magnetfeld des Permanentmagneten dem Stator-Drehfeld um den Polradwinkel nach. Die Größe des Winkels stellt sich also abhängig von der Stärke des Lastdrehmoments ein. Dies kann jedoch nur bis zum sogenannten Kippmoment (Polradwinkel $\vartheta = 90^\circ$) gesteigert werden. Übersteigt das Drehmoment der Last das Kippmoment, so spricht man vom „Abreißen“ der magnetischen Felder und die Synchronmaschine bleibt stehen. Das selbe gilt für den Generatorbetrieb, hier eilt aber das Drehfeld des Rotors vor. Bei Frequenzumrichterspeisung mit Feldorientierung kann jedoch dauerhaft mit $\vartheta = +/ - 90^\circ$ gefahren werden, man spricht von sogenannter Querstromspeisung, der Zusammenhang zwischen (Läufer)-Feld und (Ständer)-Strom entspricht dann jenem der fremderregten Gleichstrommaschine.

4.4 Auswertung der Antriebswelle (Encoder)

Für den Betrieb einer permanentmagneterregten Synchronmaschine wird immer ein zugehöriger Frequenzumrichter benötigt. Um eine gute Regelung einer Synchronmaschine gewährleisten zu können, benötigt dieser die Rückmeldung von einem Resolver (Encoder) oder einem hochauflösenden Inkrementalgeber, welcher im Motorgehäuse integriert ist. Denn im Betrieb mit sinusförmigen Strömen muss die exakte Läuferfeldlage bekannt sein, um eine feldorientierte Regelung durchführen zu können.

Die Übertragung des elektrischen Signals erfolgt in Synchronmaschinen mit eingebauten Dauermagneten am häufigsten mit einem Sinus/Cosinus-Sensor. Der Sensor besteht aus zwei Versorgungsleitungen (positive Spannungsversorgung + Ground) und zwei Sensordrähten. Abhängig vom Stand der Motorwelle wird über die zwei Sensordrähte ein Sinus- und ein Cosinus-Signal ausgeben. Bei einer korrekten Auswertung dieser Signale kann der aktuelle Stand der Motorwelle in jeder beliebigen Position absolut bestimmt werden.

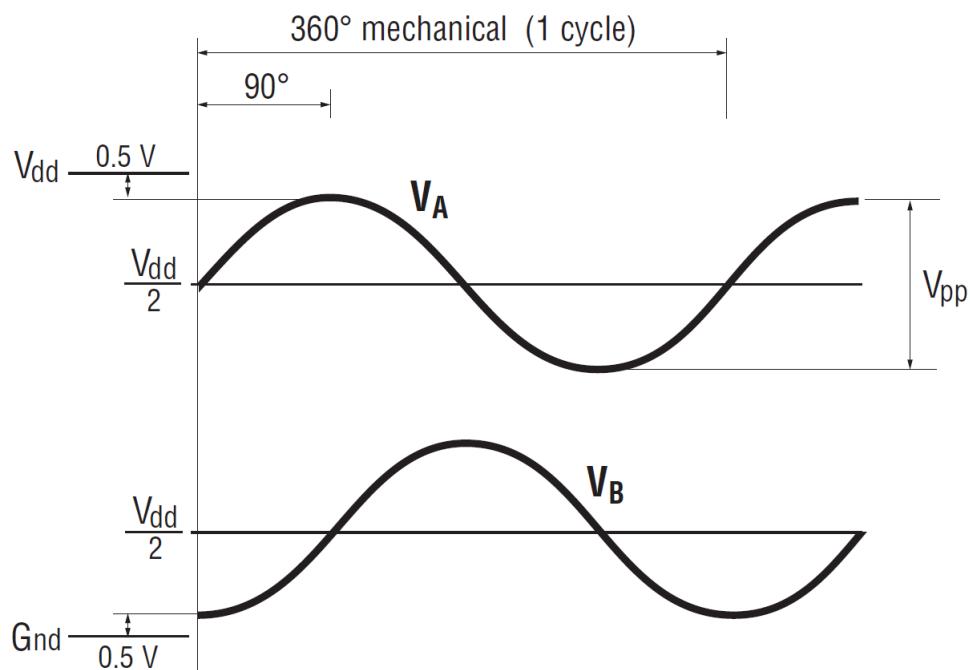


Abbildung III.4: Aufbau eines AC-Motorsystems

5 Curtis Controller

5.1 Allgemeines

5.2 Feldorientierte Regelung

6 Leonard-Umformer

6.1 Allgemeines

6.2

7 PID-Regler

7.1 Einleitung

Regelungen sind ein Bestandteil unseres Lebens und das nicht nur seit Erfindung der Dampfmaschine.

Allein schon der aufrechte Gang funktioniert nur mit Regelung. Dabei wirken die Sinne als Sensoren, das Gehirn als Regler und die Muskeln als Aktuatoren. Weitere Regelungen in unserem Körper sind z.B. die Konstanthaltung der Körpertemperatur, der Blutdruck, die Anpassung der Pupille auf Helligkeitsänderungen usw.

Der Begriff Regelung ist zu unterscheiden von dem im allgemeinen Sprachgebrauch oft synonym gebrauchten Begriff der Steuerung. Das Steuern ist ein rein vorwärts gerichteter Prozess ohne Rückkopplung. Die Ausgangsgröße wird dabei nicht überwacht und kann sich durch Störungen von außen verändern. Ein Beispiel ist die Steuerung eines Motors mit einer einstellbaren Spannung. Durch Laständerungen wird sich die Drehzahl des Motors ändern. Soll nun die Drehzahl konstant gehalten werden, bedarf es einer Rückkopplung um über die Spannung die Drehzahl anzupassen. Diese Rückkopplung ist das Kennzeichen einer Regelung.

Das Regeln ist ein Vorgang, bei dem die Ausgangsgröße, im Beispiel die Drehzahl, fortlaufend überwacht wird und bei Abweichung über die Stellgröße, im Beispiel die Spannung, korrigiert wird. Der sich dabei ergebende Wirkungsablauf findet in einem geschlossenen Kreis, dem Regelkreis, statt.

7.2 Der Regelkreis

Das Prinzip einer Regelung ist das fortlaufende: Messen – Vergleichen – Stellen

- **Messen**

Die Regelgröße wird direkt oder mittels Sensoren gemessen.

- **Vergleichen**

Der Wert der Regelgröße wird mit dem Sollwert verglichen. Die Differenz ist die Regelabweichung.

- **Stellen**

Aus der Regelabweichung wird unter Berücksichtigung der dynamischen Eigenschaften der Regelstrecke die Stellgröße bestimmt.

Ein Regelkreis dient dazu, eine vorgegebene physikalische Größe, die Regelgröße, auf einen gewünschten Wert (Sollwert) zu bringen und dort zu halten, unabhängig von eventuell auftretenden Störungen. Um die Regelungsaufgabe zu erfüllen, muss der Augenblickswert der Regelgröße – der Istwert – gemessen und mit dem Sollwert verglichen werden. Bei auftretenden Abweichungen muss in geeigneter Art und Weise nachgestellt werden.

Um nun diese Aufgabe technisch zu lösen, gibt es die Regelungstechnik. Sie baut im wesentlichen auf die mathematische Beschreibung und Modellbildung des Systems Regelkreis. Zur Modellierung, Beschreibung und Simulation werden Blockschaltbilder mit diskreten Signalgliedern verwendet.

Ein Regelkreis besteht entsprechend des vereinfachten Blockschaltbildes, wie es oft in der Regelungstechnik verwendet wird, aus den Hauptteilen Regler und Regelstrecke:

- **Regler G_R**

Ist der Teil des Regelkreises, der unter Berücksichtigung der dynamischen Eigenschaften der Regelstrecke aus der Regelabweichung die Korrekturmaßnahmen zum Ausregeln ergreift.

- **Regelstrecke G_S**

Ist der Teil des Regelkreises, der vom Regler ausgeregelt werden soll.

- **Führungsgröße w (Sollwert)**

Vorgegebener Wert, auf dem die Regelgröße durch die Regelung gehalten werden soll. Sie ist eine von der Regelung nicht beeinflusste Größe und wird von außen zugeführt.

- **Regelgröße x (Istwert)**

Ist die Ausgangsgröße der Regelstrecke, die zum Zweck des Regelns erfasst und zum Vergleich rückgeführt wird. In vielen Fällen ist in der Rückführung noch eine Messeinrichtung (Sensor) gezeichnet, die den Istwert erfasst, hier der Einfachheit halber weggelassen.

- **Regelabweichung e**

Differenz zwischen Führungsgröße und Regelgröße $e = w - x$, bildet die eigentliche Eingangsgröße des Reglers.

- **Stellgröße y**

Ausgangsgröße der Regeleinrichtung und zugleich Eingangsgröße der Strecke. Sie überträgt die steuernde Wirkung des Reglers auf die Strecke.

- **Störgröße z**

Eine von außen wirkende Größe, die eine Änderung des Istwertes der Regelgröße bewirkt und einen Regelvorgang auslöst.

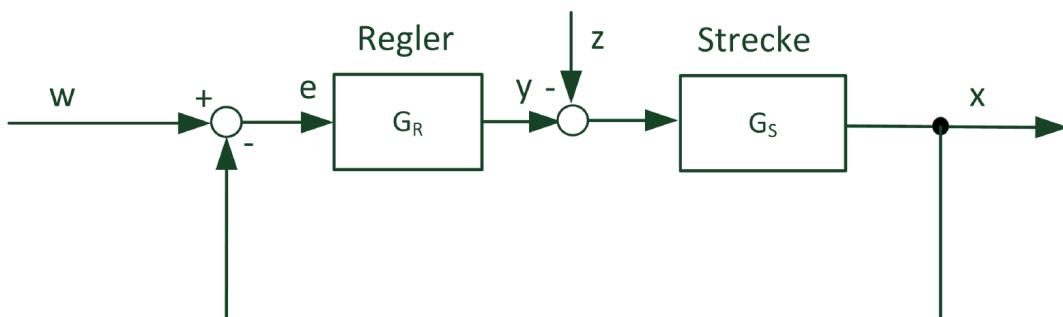


Abbildung III.5: Grundaufbau des allgemeinen Regelkreises

7.3 Die Regelstrecke

Die Regelstrecke stellt den zu regelnden Teil bzw. den zu regelnden Prozess dar und umfasst normalerweise eine Reihe von einzelnen Gliedern, welche das dynamische Verhalten der Regelstrecke beschreiben. Zur Unterteilung werden die Glieder entsprechend ihrem Zeitverhalten charakterisiert. Um das Zeitverhalten herauszufinden, legt man an den Eingang ein Testsignal an und zeichnet die Antwort auf. Im einfachsten Fall wird der Eingang mit einer sprunghaften Änderung beaufschlagt. Die Antwort auf die sprunghafte Änderung der Eingangsgröße wird Sprungantwort genannt und gibt Aufschluss über die Art der Regelstrecke und kann eventuell bereits genutzt werden, um die Parameter der Regelstrecke zu bestimmen.

Für den Aufbau eines gut funktionierenden Regelkreises und die Auslegung von Reglern ist es eine Voraussetzung zu wissen, wie die Regelstrecke reagiert. Ohne ein genaues Wissen um das dynamische Verhalten der Regelstrecke ist es nicht möglich geeignete Regler auszuwählen und diese zu parametrieren. Die einzelnen Eigenschaften der Glieder zu beschreiben würde aber den Rahmen sprengen.

7.4 Der Regler

Der Regler hat die Aufgabe, die Regelgröße zu messen, sie mit dem Sollwert zu vergleichen und bei Abweichungen die Stellgröße so zu verändern, dass Soll- und Istwert der Regelgröße wieder übereinstimmen bzw. die Differenz minimal wird.

Die Wahl eines bestimmten Reglertyps richtet sich nach dem geforderten Zeitverhalten und der geforderten Regelgenauigkeit der Regelstrecke. Nachfolgend finden Sie eine kurze Beschreibung der wichtigsten klassischen Reglertypen:

P-Regler

Der proportionalwirkende Regler multipliziert die Regelabweichung mit seinem Verstärkungsfaktor K_P und gibt das Ergebnis unverzögert weiter. Der P-geregelte Kreis ist einfach und mittelschnell im Vergleich zu anderen Regelungen. Das Problem ist die bleibende Regelabweichung!

$$\text{Reglergleichung: } y(t) = K_P \cdot e(t) \quad \text{bzw.} \quad G_R = K_P$$

I-Regler

Der integralwirkende Regler summiert die Regelabweichung über der Zeit auf und multipliziert die Summe (d.h. das Integral) mit dem Faktor K_I . Je länger eine Regelabweichung ansteht, desto größer wird die Stellgröße des I-Reglers. Der I-geregelte Kreis ist langsam im Vergleich zu anderen Regelungen. Er hat aber den Vorteil, dass die Abweichung vollständig eliminiert wird.

$$\text{Reglergleichung: } y(t) = K_I \cdot \int_0^t e(t) dt \quad \text{bzw.} \quad G_R = \frac{K_I}{s}$$

PD-Regler

Der proportional-differential wirkende Regler kombiniert den P-Regler mit einem D-Anteil (einen D-Regler gibts es nicht). Der D-Anteil bewertet die Änderung einer Regelabweichung, er differenziert und berechnet so deren Änderungsgeschwindigkeit. Diese wird mit dem Faktor K_D multipliziert und zum P-Anteil hinzugefügt. Der PD-Regler reagiert damit schon auf Ankündigungen von Veränderungen, das bewirkt sozusagen ein Vorhalten beim Regeln.

Der PD-geregelte Kreis ist sehr schnell im Vergleich zu anderen Regelungen, und manche Regelkreise (solche mit zweifacher Integration) sind ohne D-Anteil überhaupt nicht stabilisierbar. Das Problem des P-Reglers, die bleibende Regelabweichung, ist beim PD-Regler allerdings weiterhin vorhanden!

Ein Nachteil aller Regler mit D-Anteil kann die Unruhe im Kreis sein. Ist das Sensorsignal verrauscht, so wird dieses Rauschen durch das Differenzieren weiter verstärkt und wieder in den Kreis hineingegeben. Dadurch wird der Aktuator stärker belastet. Solche Probleme können aber durch Anpassung der Regelparameter oder mit dem Hinzufügen eines Filters behoben werden.

$$\text{Reglergleichung: } y(t) = K_P \cdot e(t) + K_D \cdot \frac{de(t)}{dt} \quad \text{bzw.} \quad G_R = K_P + K_D \cdot s$$

PID-Regler

Der PID Regler vereinigt die guten Eigenschaften der anderen Regler. Der PID-geregelte Kreis ist genau und sehr schnell. In den meisten Anwendungen kommt deshalb der PID-Regler zum Einsatz. Vorab sollte man jedoch überprüfen, ob ein einfacherer bzw. billigerer Regler für die Realisierung der gewünschten Anwendung ebenfalls ausreicht.

$$\text{Reglergleichung: } y(t) = K_P \cdot e(t) + K_I \cdot \int_0^t e(t) dt + K_D \cdot \frac{de(t)}{dt} \quad \text{bzw.} \quad G_R = K_P + \frac{K_I}{s} + K_D \cdot s$$

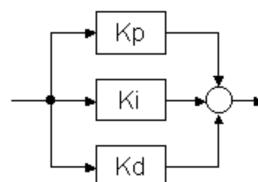


Abbildung III.6: Zusammensetzung des PID-Reglers

Hier ist für ein besseres Verständnis jeweils eine Sprungantwort der unterschiedlichen klassischen Reglertypen dargestellt:

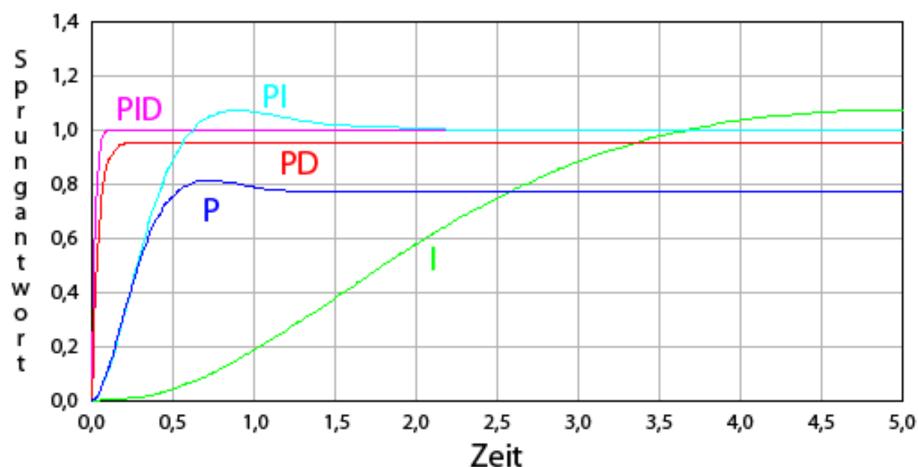


Abbildung III.7: Vergleich der verschiedenen Reglertypen

8 Steuereinheiten

9 Bussysteme

Kapitel IV

Mechanische Umsetzung

1 Gehäuse

1.1 Anforderung an das Gehäuse

Da das Grundprodukt eine Ducati S4 Monster 2001 mit Verbrennungsmotor war, musste der Motor entfernt werden, um die benötigten Teile für eine Umrüstung auf E-Antrieb unterbringen zu können. Bei allen Motorrädern ist der Motorblock ein Teil des Gehäuses beziehungsweise des Rahmens. Aus diesem Grund musste, statt des Verbrennungsmotors, ein platzsparender Ersatz gefunden werden. Das neue Gehäuse muss also die, bei einer Fahrt, auftreffenden Kräfte und Spannungen aufnehmen können. Die Schraubpunkte, mit denen der Rahmen des Motorrades zuvor zusammengehalten wurde, mussten ebenfalls im selben Bauteil ersetzt werden. Gleichzeitig mussten neue Schraubpunkte für Getriebe, Motor, Akkupacks, und weiteren Komponenten geschaffen werden, da sonst ein sicherer Betrieb nicht möglich wäre. Weiters sollte das neue Gehäuse ein Schlag- und Spritzschutz für die dahinter, im inneren liegenden Bauteile und Komponenten des Motorrades sein. Neben alldem soll natürlich auch der Fahrer nicht mit Körperteilen, oder sonstigen, am Körper anliegenden Gegenständen, in das Getriebe, oder beispielsweise die Motorsteuerung, gelangen können.

Zusammenfassend soll der Motorblockersatz folgendes übernehmen:

- Anfallende Kräfte in Normal-, sowie in Unfallsituationen verkraften.
- Schraubpunkte des Motorblocks ersetzen, ohne die das Motorrad in sich zusammenfallen würde.
- Neue Anschraubpunkte für Bauteile und Getriebe vorsehen.
- Schlag- und Spritzschutz für Bauteile und wichtige Komponenten, sowie Schutz für den Fahrer.

1.2 Dimensionierung

Die Dimensionierung richtete sich im Großen und Ganzen nach dem Platzbedarf der Bauteile und dem Gewicht, welches noch belegt werden darf, bis der Grenzwert erreicht ist. Nach der Wahl des Gesamtkonzepts beziehungsweise nachdem feststand, was alles für ein funktionstüchtiges Motorrad benötigt wird, könnte mit der Dimensionierung des Gehäuses begonnen werden.

1.3 Gewicht

Da die Akku-Zellen mit Abstand das schwerste am neuen Motorrad sind, musste, um nicht die Grenzwerte des vorhergehenden Motorrades zu sprengen, der Rest so Gewichtsparend wie möglich geplant werden. Anstatt von Stahl konnte durch Berechnungen auch Aluminium als ausreichendes Material ausfindig gemacht werden. Da Aluminium leichter als Stahl ist, wurde neben Kosten auch Gewicht gespart.

1.4 Gesamtgewicht des Zero-Emission-Power-Bikes:

| Bezeichnung | Gewicht in kg |
|--------------------------------------|---------------|
| Akkuzellen | 39,200 |
| Akkupacks | 3,269 |
| Getriebe (ohne Seitenplatte) | 13,031 |
| Seitenplatte Links | 5,067 |
| Seitenplatte Rechts | 5,821 |
| BMS | 1,100 |
| Motorsteuerung | 1,200 |
| Akkusteuerung | 0,700 |
| Sonstiges (Schrauben, Leitungen,...) | 2,900 |
| Motorrad-Grundgerüst | |
| Motor | 19,500 |
| Gesamt | |

Tabelle IV.1: Gewichtstabelle

1.5 Festlegung der Maße

Nach Absprache mit einigen Lehrern, Maschinenbau-Ingenieuren und dem Projektteam wurde als sinnvollster Ersatz für den Motorblock, zwei Platten ausgewählt. Die Platten enthielten zu Anfang nur die je 3 Bohrungen, als Ersatz für den Rahmen. Mit Fortlauf der Zeit und des Projektes wurden immer mehr Details, vor allem an der Linken Platte vorgenommen. Nach Fertigstellung der Seitenplatten musste das Material und die Stärke ausgewählt werden. Nach einigen statischen Berechnungen, war eine 20 mm Aluminiumplatte ausreichen für die anfallenden Kräfte. Mit der Entscheidung Aluminiumplatten zu verwenden, konnten Kosten, wie auch Gewicht gespart werden.

1.6 Material

| | |
|------------------------------|--------------------------------|
| Aluminiumlegierung: | 3.3547 , AlMg4.5Mn, EN-AW 5083 |
| Dichte: | 2,660 kg/dm |
| Wärmeausdehnungskoeffizient: | 0,0000 /c |
| Wärmeleitfähigkeit: | 0,204 kW/m-C |
| Spezifische Wärme: | 940,000 J/kg-C |
| Elastizitätsmodul: | 70000,000 MPa |
| Poissonscher Beiwert: | 0,390 |
| Streckgrenze: | 270,000 MPa |
| Zugfestigkeit: | 345,000 MPa |

Tabelle IV.2: Aluminium: AlMg4.5Mn Materialdaten

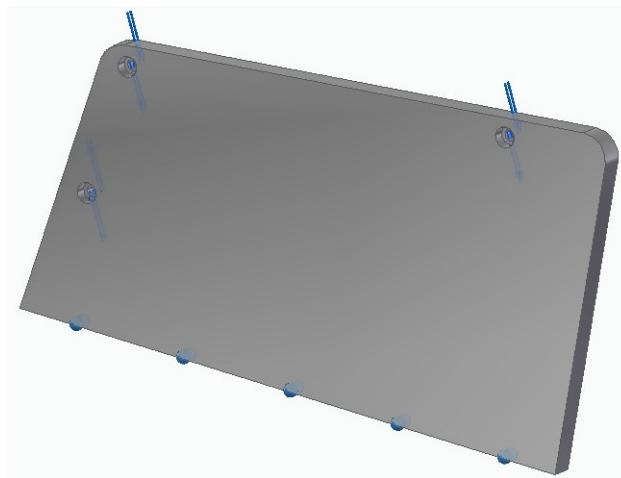


Abbildung IV.1: Seitenplatte Rechts

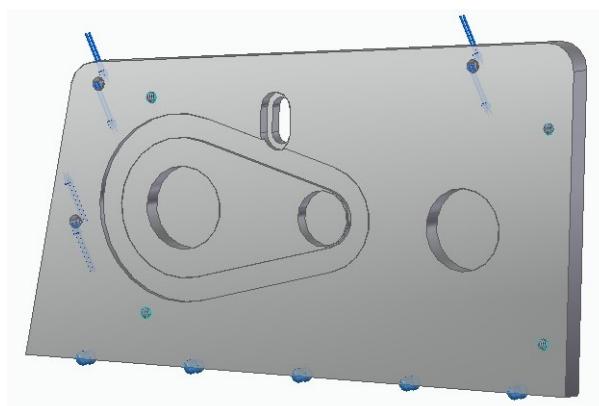


Abbildung IV.2: Seitenplatte Links Innenansicht

Neben den Platten, waren noch weitere kleinere Gehäuseteile nötig um den Rahmen neu in Betrieb zu nehmen. Dabei handelt es sich um den Achsenersatz für den Schwingarm, an dem das Hinterrad angebracht ist.



Abbildung IV.3: Wellenersatz

2 Getriebe

2.1 Aufgabe des Getriebes

Durch die hohen Umdrehungswerte des Elektromotors musste ein Getriebe diese herunterwandeln, weil ansonsten beim Start ein zu geringes Drehmoment vorhanden gewesen wäre und bei maximaler Drehzahl, eine theoretische Geschwindigkeit von gerundet 300 km/h, das Ergebnis gewesen wäre. Im Projekt wurde dieses Getriebe mit einem Kettengetriebe realisiert um ein Zahnradgetriebe zu vermeiden. Der Grund dafür wird unten näher erläutert.

2.2 Das Getriebe

Bei dem Getriebe wurde entschieden, dass kein Zahnradgetriebe verwendet werden wird, da ein solches in Öl getränkt sein muss und dafür die Getriebebox vollständig wasserdicht sein müsste. Stattdessen wurde ein Kettengetriebe als ausreichend empfunden. Nach reichlicher Recherche wurde klar, dass nicht nur eine zusätzliche Kette, sondern sogar zwei zusätzliche Ketten notwendig waren um ein Übertragungsverhältnis von 1: 9,25 zu erhalten. Die Zahnräder wären aufgrund der großen Drehmomente, der hohen Anzahl an Zähnen und des damit verbundenen Durchmessers zu groß gewesen. Somit entstand ein Fahrwerk mit insgesamt drei Ketten, sechs Kettenrädern und 2 Kettenspannern. Bei den Kettenrädern, sowie auch bei der Kette musste der Platzbedarf zu den auftretenden Kräften abgewogen werden. Die originale Kette ist eine aus der Normreihe B-1 10. Da aber in dieser Norm die Zahnräder größer sind, um größeren Kräften standhalten zu können, hätte ein größeres Getriebe eingeplant werden müssen. Nach Berechnungen könnte eine kleinere Norm ebenfalls als ausreichend befunden werden. Die maximalen Drehmomente in der Norm B-1 08, sind immer noch ausreichen für Extrem- und Alltagssituationen. Mit dieser Erkenntnis könnte wieder einiges an Platz gespart werden.

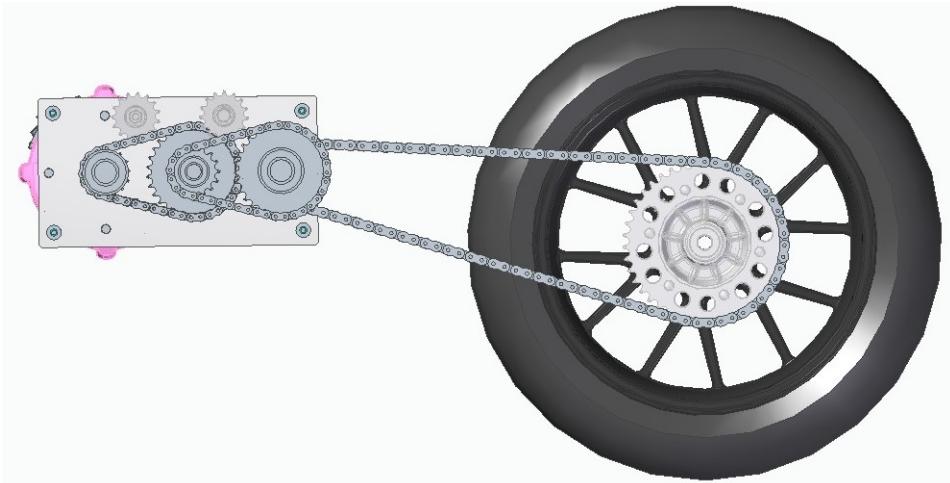


Abbildung IV.4: Getriebeansicht Seitlich

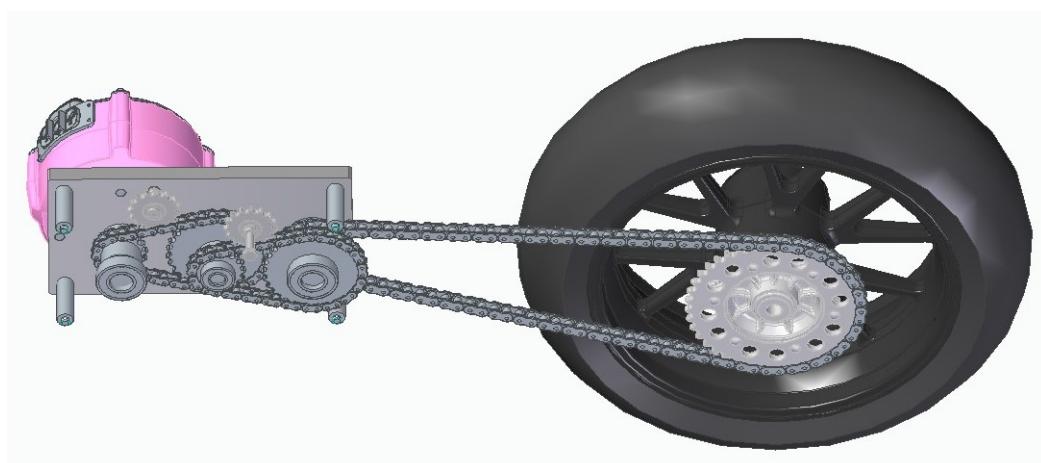


Abbildung IV.5: Getriebeansicht Schräg

Einzelteile

Die Zahnräder sind auf insgesamt 3 Achsen montiert, welche die Kraft von einem Kettenrad zum nächsten übertragen soll. Um dies zu gewährleisten, werden diese aus Stahl gefertigt, um das Risiko eines Reißens der Achse zu vermeiden. Die Zahnräder werden mit Passfedern und Schrauben an die Achse gepresst. Die Achsen sind Kugelgelagert in der linken Seitenplatte und der Aufbauplatte versenkt.

Achse 1 / Antriebsachse

Achse 1/Antriebsachse : Verbindet die Motorwelle mit dem ersten Zahnrad (15 Zähne B-1 08). Am anderen Ende befindet sich ein Kugellager.

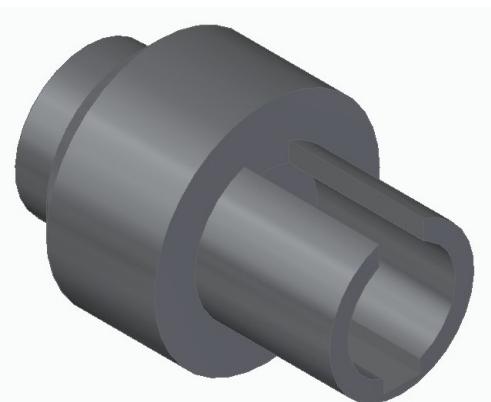


Abbildung IV.6: Achse 1/Antriebsachse

Achse 2

Am größerem Zylinder sitzt ein Zahnrad mit 30 Zähnen (B-1 08), welches mittels einer Kette mit dem ersten Zahnrad (15 Zähne B-1 08) von der 1. Achse verbunden ist. Über die Achse wird das Drehmoment und die Drehzahl auf das Nächste Zahnrad (16 Zähne B-1 08) übertragen. An beiden Enden ist jeweils ein Kugellager, wobei auf der rechten Seite, von dieser Perspektive aus gesehen, ein kleineres notwendig war, um den Kettenverlauf des Zahnrades nicht zu behindern. (Eine genauere Erklärung folgt.)



Abbildung IV.7: Achse 2

Achse 3

Dies ist die letzte Achse, bevor das Hinterrad angetrieben wird. Am größeren Zylinder befindet sich wieder ein 30-zähniges Kettenrad der Norm B-1 08 und am kleineren Zylinder ein 15-zähniges Zahnrad der Norm B-1 10. Bei dem Kettenrad mit 30 Zähnen war ein Eingriff in die

Norm-Bauform notwendig, um die Antriebskette nicht zu blockieren (Eine genauere Erklärung später). An beiden Seiten der Achse befindet sich jewils ein Kugellager der selben Bauform.

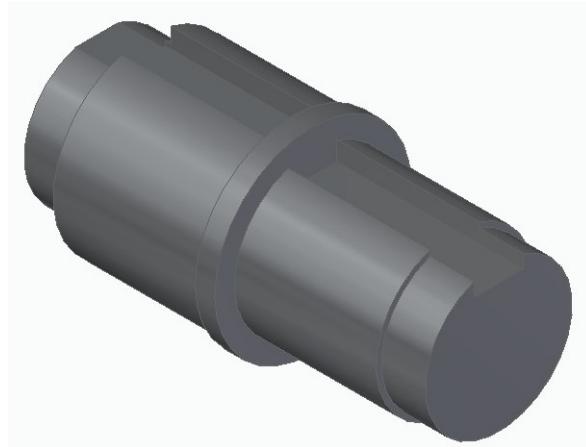


Abbildung IV.8: Achse 3

Getriebegegenplatte und Abstandhalter

Für das Getriebe war, wie schon erwähnt, eine Gegenplatte notwendig. An diese Platte wird auch der Motor und das mittlere Akkupack befestigt. Mit 4 Schrauben und dazugehörigen Abstandhalter wird das Getriebe zusammengehalten. Die Abstandhalter sind 4 Stahlrohre mit Innendurchmesser 10 mm und Außendurchmesser 20 mm.



Abbildung IV.9: Getriebegegenplatte



Abbildung IV.10: Abstandhalter

Kettenspanner

Wenn Ketten zu schwingen beginnen, werden diese sehr schnell kaputt und beeinträchtigen das Fahrverhalten. Um diese Problem zu lösen werden bei Kettenantrieben immer Spannräder benötigt. Bei den ersten beiden Ketten, vom Motor ausgehend, ist jeweils eines vorhanden. Bei der letzten Kette kann diese am Anschraubpunkt der Hinterachse gespannt oder entspannt werden und deshalb ist kein Spannrad notwendig. Die beiden Kettenräder haben 15 Zähne und stammen aus der Norm B-1 08. Die beiden Spannräder werden mittels einer Außensechskantschraube M16 und 3 Muttern M16 befestigt. Das, vom Motor aus, erste Kettenrad ist an der Aufbauplatte montiert, dort wo auch der Motor befestigt ist. Das zweite Kettenrad ist auf der Seitenplatte befestigt. Für die Befestigung sind an beiden Platten Nuten eingefräst.



Abbildung IV.11: Kettenspanner

Kettenräder

Das Getriebe umfasst insgesamt fünf Kettenräder (ohne Antriebskettenrad an der Hinterachse) mit verschiedenen Größen, Bezogen auf die Anzahl der Zähne, aus zwei verschiedenen Normen, um das Getriebe mit an die originale Kette anpassen zu können:

ISO 08 B-1 Teilung 1/2 x 5/16"

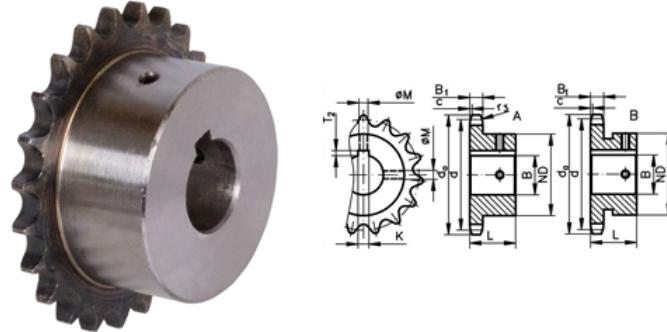


Abbildung IV.12: ISO 08 B-1

Werkstoff: Stahl C45. Zähne gefräst und induktiv gehärtet (ca. HRC 50). Einbaufertig, für diverse Wellendurchmesser. Fertigbohrung H7 -Rauwert Ra 1,6, Nut nach DIN 6885/1 auf Zahnspitze ausgerichtet, 2 Stellschraubengewinde, einmal auf Nut ausgerichtet, einmal 90° versetzt. Allgemeine Abmessungen: B1 = 7,2 mm, c = 1,3 mm, r3 = 13 mm. Weiter Daten sind aus der folgenden Tabelle zu entnehmen.

| Produkt | Zähne | B H7 | Type | da | d | ND | L | KH9 | T2 | M | Gewicht |
|----------|-------|------|------|-------|--------|----|----|-----|-----|----|---------|
| | | mm | | mm | mm | mm | mm | mm | mm | mm | kg |
| 10681532 | 15 | 32 | B | 65,5 | 61,09 | 49 | 28 | 10 | 3,3 | M8 | 0,300 |
| 10581632 | 16 | 32 | A | 69,5 | 65,10 | 53 | 28 | 10 | 3,3 | M8 | 0,334 |
| 10583038 | 30 | 38 | A | 126,1 | 121,50 | 80 | 30 | 10 | 3,3 | M8 | 1,219 |

Tabelle IV.3: Auszug Wertetabelle ISO 08 B-1

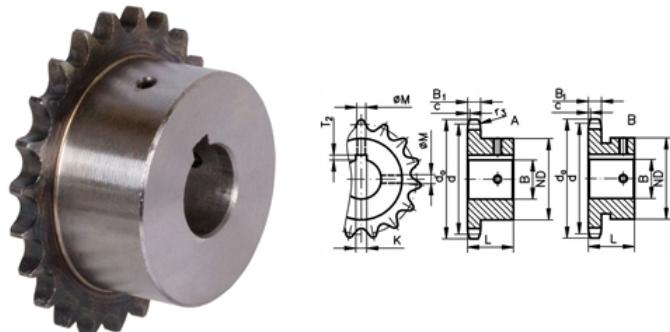
ISO 10 B-1 Teilung 5/8 x 3/8"


Abbildung IV.13: ISO 10 B-1

Werkstoff: Stahl C45. Zähne gefräst und induktiv gehärtet (ca. HRC 50). Einbaufertig, für diverse Wellendurchmesser. Fertigbohrung H7 -Rauwert Ra 1,6, Nut nach DIN 6885/1 auf Zahnspitze ausgerichtet, 2 Stellschraubengewinde, einmal auf Nut ausgerichtet, einmal 90° versetzt. Allgemeine Abmessungen: B1 = 9,1 mm, c = 1,6 mm, r3 = 16 mm. Weiter Daten sind aus der folgenden Tabelle zu entnehmen.

| Produkt | Zähne | B H7 | Type | da | d | ND | L | KH9 | T2 | M | Gewicht |
|----------|-------|------|------|------|-------|----|----|-----|-----|----|---------|
| | | mm | | mm | mm | mm | mm | mm | mm | | kg |
| 10681532 | 15 | 32 | B | 83,0 | 76,36 | 57 | 30 | 8 | 3,3 | M6 | 0,501 |

Tabelle IV.4: Auszug Wertetabelle ISO 10 B-1

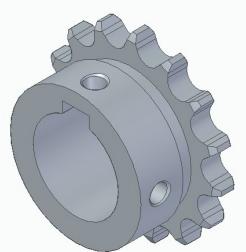


Abbildung IV.14: Kettenrad Z=15 B-1 08

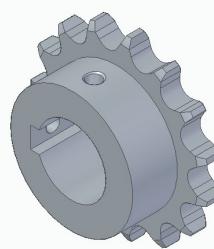


Abbildung IV.15: Kettenrad Z=15 B-1 10

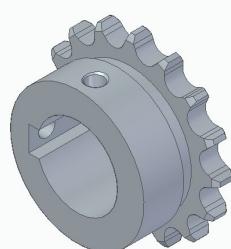


Abbildung IV.16: Kettenrad Z=16 B-1 08

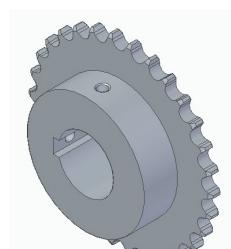


Abbildung IV.17: Kettenrad Z=30 B-1 08



Abbildung IV.18: Ducati Kettenrad Z=37 B-1 10

Kugellager

Kugellager: Innendurchmesser 20 mm Außendurchmesser 42 mm Stärke 12 mm



Abbildung IV.19: Kugellager 1

Kugellager: Innendurchmesser 30 mm Außendurchmesser 62 mm Stärke 16 mm



Abbildung IV.20: Kugellager 2

Vor Beginn der Planung, muss die Verfügbarkeit der Bauteile, durch Lieferanten und Firmen sichergestellt werden. Nach fixer Zusage von Lieferanten sowie verschiedenen Firmen wurde das Getriebe unter Hochdruck geplant. Da im Getriebe sehr hohe Kräfte aufkommen, muss garantiert sein, dass alles in der Genauigkeit eines Hundertstelmillimeter passt. Ebenfalls dürfen die Zahnräder nicht an Seitenplatten anstoßen oder streifen, weil ein enorm hoher Verschleiß die Folge wäre.

Das Getriebe ist eine Spezialanfertigung, welches für diese Projekt erstellt wurde. Alle Abstände von Zahnrad zu Zahnrad, sind so klein wie möglich. Die Befestigungspunkte für den Aufbau, sind ebenfalls mit dem geringsten Abstand zu den Kettenrädern angebracht. Durch sämtliche Optimierungen konnte Geld für das Material und Gewicht für das Motorrad gespart und dennoch ein sicherer Betrieb ermöglicht werden.

Seitenplatte mit Getriebe-Fräslungen

Diese ist die komplizierteste Platte bei diesem Projekt. Wie die rechte Seitenplatte, enthält diese auch die drei Bohrungen für die Rahmen- und Schwingarmaufhängung. Aber unter anderem ist diese auch Teil des Getriebes. Das Getriebe ist ausschließlich auf dieser Platte aufgehängt und trägt somit auch den Motor und einen Teil des mittleren Akkus. Es war ein Mittelweg zu finden, der es ermöglicht Kugellager, welche die Achsen beinhalten, Form-Fräslungen für den Verlauf von Ketten, weitere zusätzliche Bohrungen zu erstellen und noch die erforderliche Festigkeit für den Motorblock zu erhalten. Mit jeder Entfernung von Material vom Bauteil, wird seine Festigkeit verringert und damit die Gefahr eines Zusammenbruchs größer. Dieses Bauteil erforderte große Sorgfalt und genaue Planung um all dies zu vermeiden. Berechnungen (siehe Anhang).

Problemstellung des Getriebes

Wie oben schon erwähnt, musste eines der beiden 30-Zahn-Kettenräder bearbeitet werden. Wie im Bild zu sehen, würde ohne Bearbeitung die Kette zerstört werden, beziehungsweise würde das Getriebe nicht funktionieren. Es muss ein kleiner Teil weggedreht werden, um einen fehlerfreien Betrieb gewährleisten zu können.

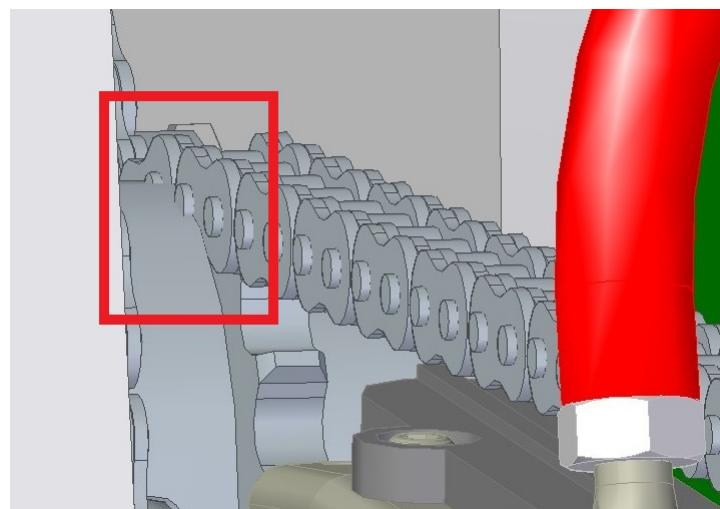


Abbildung IV.21: Getriebeproblem 1

Das zweite Problem war aufgrund eines Kugellagers, welches das selbe Problem zur Folge hätte, wie bei dem Kettenrad von oben. Die Lösung war ein kleineres Kugellager, welches einen kleineren Durchmesser hat, die Zahnscheibe des Kettenrades.

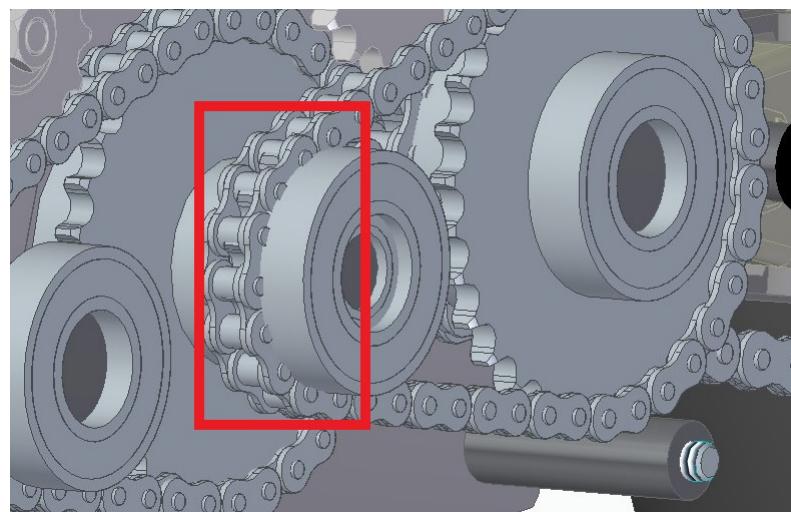


Abbildung IV.22: Getriebeproblem 2

3 Akkupacks

Als am besten geeignetes Material für die Packs ergab sich Polycarbonat. Dieses Material lässt sich verkleben und zurechtschneiden, ist dann aber doch nahezu unzerstörbar. Mit 6 mm Stärke ist das für dieses Projekt ausgewählte Material Schlagsicher. Mit 8 mm wäre es schon kugelsicher. Zudem wiegen diese Platten auch nicht sehr viel und sind daher ein perfektes Material. Die Packs sind so entworfen, dass sich ein Vielfaches von 40 Zellen einfach zusammenschließen lässt. Neben den Akkus muss natürlich auch eine Kühlmöglichkeit Platz finden. Das Design ist zu erst einmal darauf ausgelegt, dass so viele Zellen wie nur möglich in den Packs Platz haben, sportliches Aussehen oder Design ist zweitranig.

3.1 Akkupack Vorderseite

Die vordere Akkubox beinhaltet 240 Akkuzellen. Das Design richtet sich ein wenig nach der Originalform der Ducati S4 und bildet einen Übergang auf die Seitenplatten. Befestigt wird diese Box mit Schrauben nach oben weg. Die Steuerbox und eine weitere Platte bilden ein Gegenstück für Schrauben. Um sicher gehen zu können wird die Box noch von einem Metalgurt, der unten um dem Körper führt, welcher dann am Rahmen befestigt wird. Die Verbindung von Akku zur Akku- und Motorsteuerung wird mit Leitungen ermöglicht. Damit die Bohrungen für die Leitungen keine undichte Stelle wird, wird hier eine Kabelverschraubung verwendet um die Stelle abzudichten.

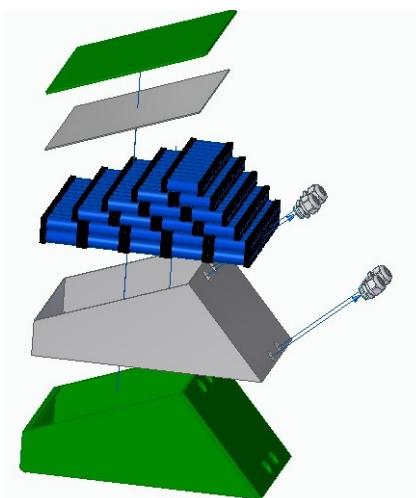


Abbildung IV.23: Akku Vorderseite

3.2 Akkupack Motorblock

Die große Akkubox in der Mitte beinhaltet 220 Akkuzellen, also um 20 zu wenig, oder zu viel. Diese 20 Zellen werden mit 20 Zellen aus der oberen liegenden Box verbunden um die gewünschte Spannung zu erreichen. Dieses Akkupack ist in den Freiraum zwischen den beiden Platten (Rechte Seitenplatte und Aufbauplatte vom Getriebe) und dem Motor eingepasst. Dieser Akku wird dann mit Schrauben an der linken und rechten Seite befestigt. Damit eine Verbindung zu dem vorderen Akku geschaffen werden kann, ist auch hier eine Kabelverschraubung notwendig, durch die die Leitung verlaufen soll.

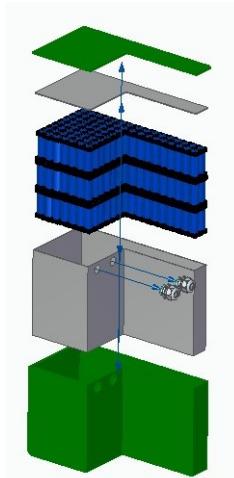


Abbildung IV.24: Akku Motorblock

3.3 Akkupack Mitte

Die kleine Akkubox in der Mitte des Motorrades, direkt unter dem Sitz, beinhaltet die oben schon erwähnten fehlenden 20 Zellen des großen Akkupacks und den Rest auf die Endsumme von 560 Zellen. Diese Box ist im Rahmen so eingepasst, dass der Platz am besten genutzt ist und der Stoßdämpfer, vom Schwingarm die Box nicht beschädigt. Die Verbindung vom oberen zum unteren Pack wird mit einer Bohrung hergestellt. Weil diese beiden Boxen gemeinsam verschraubt werden, müssen keine weiteren Dichtungsmaßnahmen vorgesehen werden.

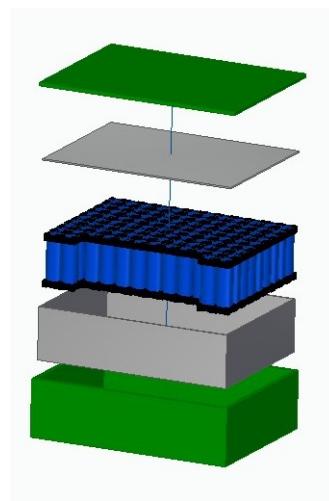


Abbildung IV.25: Akku Mitte

4 Akkukühlung

Für den Prototypen, wurde das Kühlungssystem so einfach, wie nur möglich gestaltet. Die ohnehin zu geringe Zeitvorgabe, war der Grund, warum eine Wärmeübertragungskühlung gewählt wurde. Diese Kühlungsmethode entspricht in etwa dem der Peltier-Elemente. Im Inneren der Akkupacks sind die Wände mit Aluminiumplatten ausgekleidet. Zusätzlich sind noch Platten mitten hindurch eingeplant, die verschiedene Teile des gesamten Packs unterteilen. Sämtliche Aluminiumplatten, sind thermisch und somit auch elektrisch, miteinander verbunden. Mithilfe von Leitfähigen Leitern, werden diese Kühlungen mit Teilen außerhalb des Akkus verbunden. Teile, die am Motorrad angebracht sind, werden vom Fahrtwind umströmt und dadurch gekühlt. Dieser Effekt, wird bei diesem System ausgenutzt. Die Wärmeenergie der Akkuzellen, soll also an die Umgebung abgegeben werden. Bei zukünftigen Modellen, wird ein Flüssigkeitssystem in Form einer Wasserkühlung verwendet werden, um die bestmögliche Kühlung gewährleisten zu können.

Siehe Akkukühlung im Motorblock-Pack

Siehe Akkukühlung im Mittel-Pack

Siehe Akkukühlung im Vorderseiten-Pack

4.1 Warum eine Kühlung notwendig ist

Wenn ein Akku eine gewisse Größe erreicht, muss dieser gekühlt werden, um nicht zu überhitzen. Wenn eine Akkuzelle Leistung abgibt, erwärmt sich diese. Die logische Schlussfolgerung ist nun, je mehr Akkuzellen vorhanden sind, desto größer ist die Erwärmung in diesem Raum. Es würde mit dem Fahrtwind eine Luftkühlung völlig ausreichend sein, nur die Packs sind in Boxen untergebracht. Durch die zusätzliche Hülle, um die Zellen vor Wasser, Steinschlag, oder Ähnlichem zu schützen, kann eine Luftkühlung nicht realisiert werden. Gleichzeitig wirkt die Box wie eine Isolierung, wodurch sich die Packs immer schneller erhitzen. Wenn nun keine Kühlung verwendet wird, erhitzt sich das Innere so lange, bis sich sämtliche Zellen aufzulösen beginnen. Das Polycarbonat würde extrem beansprucht werden. Wenn die Zellen immer weiter Leistung abgeben, kommt es bei Lithium-Ionen-Zellen schlussendlich zu einer Explosion. Gegen solche Fälle ist im Betriebssystem ein Warnsystem vorhanden. Ebenfalls sind Schutzeinrichtungen wie Sicherungen eingebaut, die ein solches Szenario verhindern sollen. Weil keine 100 prozentige Sicherheit für alle Fälle besteht, ist das Material, wie oben schon erwähnt, ebenfalls auf Extremsituationen ausgelegt und kann die Wärmeentwicklung für einen kleinen Zeitraum standhalten, um im schlimmsten Fall ein Entfernen vom Motorrad zu ermöglichen.

5 Zusammenbau

Die beiden Seitenplatten, sind mit jeweils 3 Sechskantschrauben mit Rahmen und dem Schwingarm verbunden. Die Schrauben werden mit Sicherheitsmuttern und einer Zulegscheibe festgeschraubt. Bei dem Ersatzteil für die Welle, ist ein Gewinde integriert.

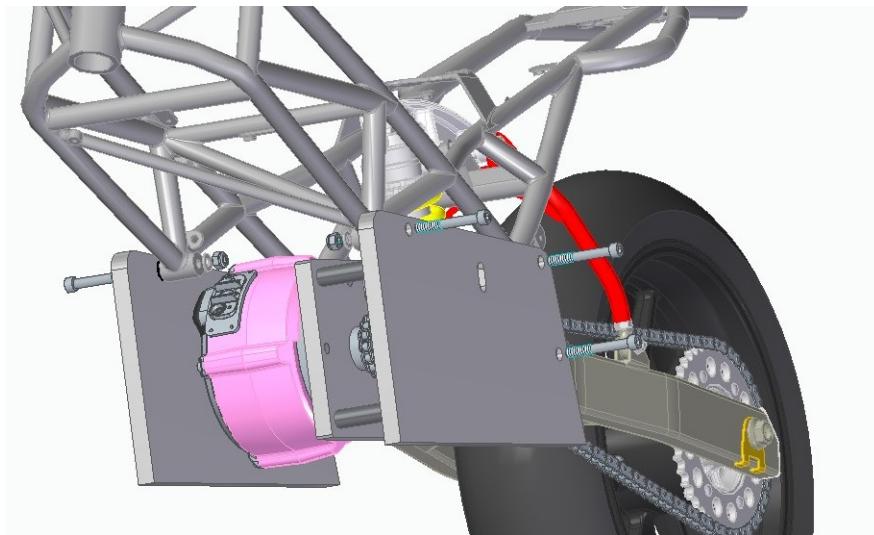


Abbildung IV.26: Befestigung der Seitenplatten

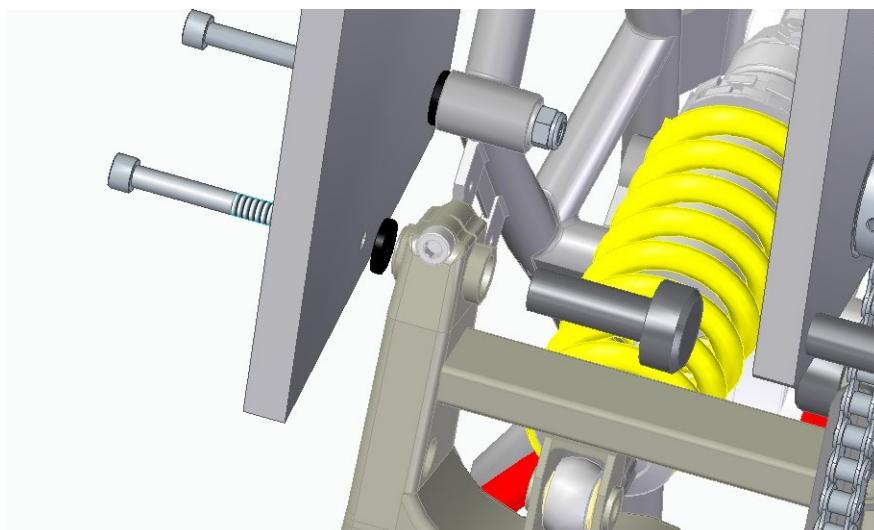


Abbildung IV.27: Befestigung des Schwingarmes

In den folgenden Bildern ist das Getriebe mit all seinen Einzelteilen abgebildet. In der Mitte die drei Achsen. Jeweils zwei beziehungsweise ein Kettenrad links und rechts der Achsen und zwischen den Kettenrädern und den beiden Aluminiumplatten noch Kugellager. sämtliche Schrauben, die das Getriebe zusammenhalten sollen, sind auch sichtbar gemacht worden.

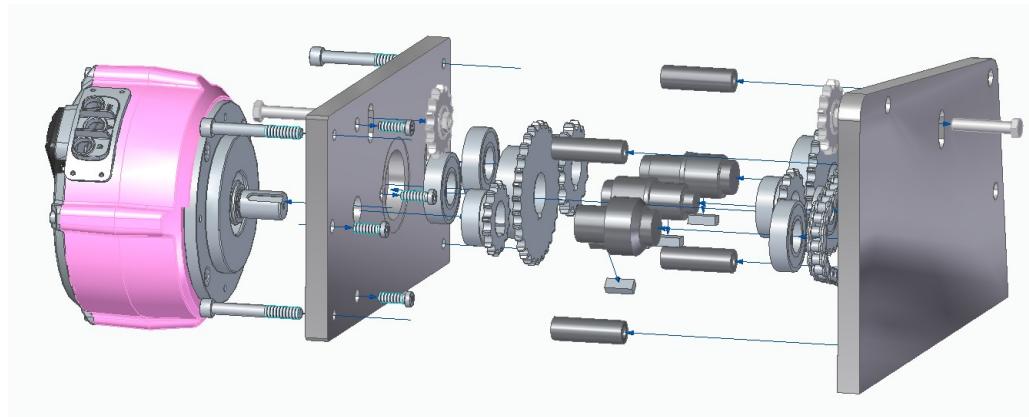


Abbildung IV.28: Explosionsansicht des gesamten Getriebes

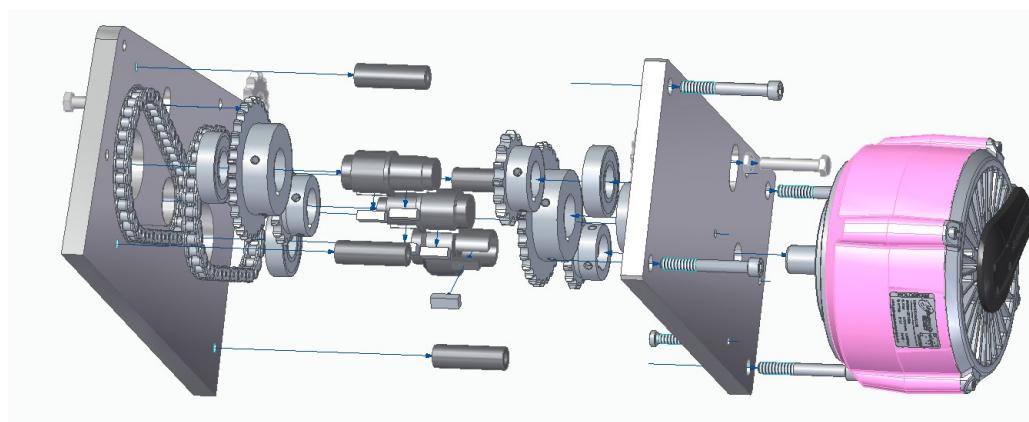


Abbildung IV.29: Detailansicht Getriebe

Kapitel V

Akku und Ladekonzept

1 Übersicht

1.1 Aufgaben der Energieversorgung

In den Bereichen der Wirtschaft und der Technik bedeutet der Ausdruck Energieversorgung so viel wie, die Belieferung von Verbrauchern mit Energie. Es gibt unterschiedliche Arten von Energieträgern. Einerseits gibt es leitungsgebundene Energieträger wie den elektrischen Strom andererseits gibt es auch feste Energieträger wie Kohle oder Holz. In naher Zukunft werden regenerative Energie vermehrt an Bedeutung gewinnen.

Eine stabil Energieversorgung, die mit allen Verbrauchern verbunden ist, wird benötigt, um dem emissionsfreien Sportmotorrad Mobilität zu verleihen. Die Aufgabe der Energieversorgung besteht daher darin, alle Komponenten mit ausreichend Spannung zu versorgen und noch wichtiger, diese Komponenten bei elektrischem Versagen vor Schäden zu schützen. Daher ist die Energieversorgung ein äußerst wichtiger Bestandteil eines solchen Projekts. Im weiteren Verlauf dieses Kapitel wird erklärt, wie die Energieversorgung geplant und in weiterer Folge umgesetzt wurde.

1.2 Aufgaben des Batteriemanagement

Wie bereits im Kapitel 2.5 erklärt wurde, bestehen die Aufgaben des Batteriemanagements darin, Kennwerte der Akkumulatoren aufzunehmen und an eine Steuereinheit weiterzuleiten. Weiters ist es auch für den Schutz der Akkumulatoren zuständig und ebenfalls für einen geregelten Ladevorgang.

Ein Bestandteil des Batteriemanagements ist das sogenannte Batteriemanagementsystem (BMS). Das BMS hat die Aufgabe die Akkumulatoren auf ihre Ladung und Entladung zu überwachen und ebenfalls zu regeln. Die Hauptaufgabe des Batteriemanagementsystem besteht jedoch darin, die Restenergie in den Zellen optimal zu nutzen. Um keine Beschädigungen an Zellen zu bekommen, schützt das Batteriemanagementsystem die Batterien vor Tiefenentladung, vor Überspannung, vor zu schneller Ladung (begrenzen des Ladestroms) und ebenfalls vor einem zu hohen Entladestrom. Bei Akkupacks, d.h. Akkumulatoren mit mehreren Zellen, sorgt das Batteriemanagementsystem außerdem für ein sogenanntes Balancing, das sich darin ausdrückt, dass die verschiedenen Batteriezellen gleiche Ladezustände und Entladezustände haben. Das Batteriemanagementsystem liest und verarbeitet alle Daten, die anschließend über ein Bussystem an die Zentralsteuerung weitergegeben werden.

Um die Akkumulatoren beziehungsweise die Akkupacks wieder aufladen zu können, wird ein externes Ladegerät benötigt. Bei Bedarf wird dieses Ladegerät mit den Akkumulatoren verbunden um den Ladevorgang in Gang zu setzen.

2 Energieversorgung

2.1 Dimensionierung der Akkuzellen

Es ist besonders wichtig die Daten der Zellen vorher zu beachten um die Dimensionierung gut zu planen und schließlich auch umzusetzen. Um die Energie effizient speicher zu können wurden Lithium-Ionen Akkumulatoren verwendet. Da der Elektromotor mit einer Spannung von 50,4V gespeist werden muss, haben wir uns deswegen auch auf ein solches Versorgungssystem geeinigt. Weiters ist bei Dimensionierung besonders wichtig auf die Lade- und Entladeströme zu achten. Einerseits muss beim Ladestrom nur auf den Strom des Ladegeräts berücksichtigt werden. Andererseits ist es beim Entladestrom etwas komplizierter. Um den Richtwert des Entladestrom einzuhalten, muss der Nennstrom aller Verbraucher in einem System addiert werden.

Der Verbrauch der Steuerelemente setzt sich aus dem verwendeten Raspberry, dem Batteriemanagementsystem und dem Motorcontroller zusammen. Der Raspberry benötigt eine Spannung von 5V und darf eine maximale Leistung von ca. 8W aufweisen. Der Motorcontroller weist eine Nennspannung von 50,4V auf und benötigt eine Leistung von ungefähr 19,5kW. In den folgenden Formeln wird der Strom dieser Komponenten berechnet.

$$I_{Raspberry} = \frac{P_{Raspberry}}{U} = \frac{8W}{5V} = 1,6A$$

$$I_{Motorcontroller} = \frac{P_{Motorcontroller}}{U} = \frac{19,5kW}{50,4V} = 387A$$

Natürlich müsst auf der Stromverbrauch des Batteriemanagementsystem mit eingerechnet werden. Dieser ist jedoch vernachlässigbar, weil dieser bei wenigen mA liegt.

In der Nachfolgenden Abbildung kann man die Kenndaten einer einzelnen Lithium-Ionen Zelle betrachten. Durch diese Kenndaten setzt sich weitere Dimensionierung des Akkukonzeptes zusammen.

| | |
|-----------------------------------|------------------|
| EAN / GTIN: | 8438493108880 |
| Marke: | Samsung |
| Batteriegröße: | 21700 |
| Batteriechemie: | Li-Ion |
| Batterie: | Wiederaufladbar |
| Stromspannung | 3,6V |
| Mindest. Kapazität in mAh: | 4.900,00 |
| Batterieverision: | Flache Oberseite |
| Entladestrom: | 9,80 |
| Lithium - Schutzschaltung: | Ungeschützt |
| Höhe: | 70,80 |
| Durchmesser in mm: | 21.25 |

Abbildung V.1: Eigenschaften und Kennwerte einer Lithium Ionen Zelle

Wie man in der Tabelle erkennen kann, liegt die Spannung einer Lithium Ionen Zelle bei 3,6V. Da jedoch ein Versorgungssystem mit 50,4V notwendig ist müssen die Zellen beziehungsweise die Akkupacks seriell sowie auch parallel verschalten werden.

Die Nennkapazität einer Zelle beträgt 4900mAh. Um die Kapazität zu erhöhen wurden innerhalb eines Akkupacks 40 einzelne Akkumulatoren parallel verschalten.

$$Q_{Gesamt} = Q_{Akkupack} = Q_{Zellen} \cdot 40 = 4900 \text{ mAh} \cdot 40 = 196.000 \text{ mAh}$$

Die Nennkapazität einer Lithium Ionen Zelle beträgt 3,6V. Innerhalb der Akkupacks werden diese 40 Zellen parallel verschalten, was nicht zu einer Erhöhung der Spannung führt. Da wir aber ein Versorgungssystem mit 50,4V benötigen, musst wir die 14 Akkupacks seriell verschalten um die Versorgungsspannung zu erreichen.

$$U_{Gesamt} = U_{Akkupack} \cdot 14 = U_{Zelle} \cdot 14 = 3.6 \text{ V} \cdot 14 = 50.4 \text{ V}$$

2.2 Zusammenstellung der Batteriezellen

Die Aufgabe besteht darin, die einzelnen Zellen zu sogenannten Akkupacks zusammenzuschalten. Dafür wurde Abstandshalter verwendet um die Zellen anzurorden und anschließend mit einem Hiluminband zusammen zu schweißen.



Abbildung V.2: Explosionsdarstellung einer Doppelzelle

Im nächsten Schritt wurden diese Doppelzellen zusammengeschalten, die vereint ein Akkupack ergeben. Die Schwierigkeit dabei war, die Doppelzellen so anzurorden, dass der Platz in der Schutzbox für die Akkumulatoren möglichst effizient genutzt wird. Jedoch waren wir beim designen der Akkubox relativ eingeschränkt, da wir darauf achten mussten, diese Boxen auch an unser Motorrad anzubringen. Die Boxen zusammen mit dem Inhalt sind auch extrem schwer. Deswegen war es wichtig, diese Boxen möglichst unten und in der Mitte anzubringen um den Schwerpunkt des emissionsfreien Sportmotorrads nicht drastisch zu verändern.

Wie bereits vorher erwähnt müssen diese Akkupacks geschützt werden. Dies ist notwendig um die Lebenszeit der Akkumulatoren hinauszuzögern und um sie vor äußeren Einflüssen zu schützen. Diese Akkuboxen haben unterschiedliche Formen, da sie an unterschiedlichen Positionen an dem Sportmotorrad angebracht werden. Grundsätzlich haben wir 3 verschiedene Akkuboxen designt und angefertigt.

1. Akkubox:

Die erste Akkubox besteht aus 2 Akkupacks. Das heißt insgesamt beinhaltet sie 80 Zellen.

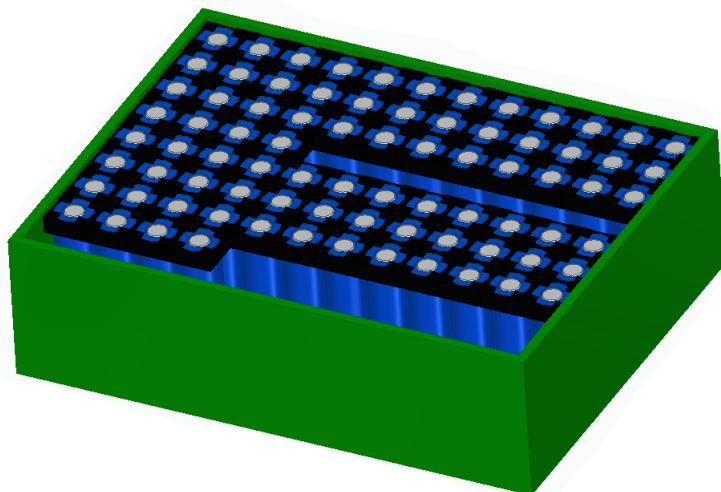


Abbildung V.3: 1. Akkubox

2. Akkubox:

Die zweite Akkubox besteht aus insgesamt 6 Akkupacks. Diese Akkubox ist in drei Ebenen aufgeteilt wobei in einer Ebene 2 Akkuboxen Platz finden. Die nächsten beiden Akkuboxen liegen auf der ersten Ebene auf. Schlussendlich befinden sich die letzten 2 der 6 Akkuboxen auf der letzten, der dritten Ebene.

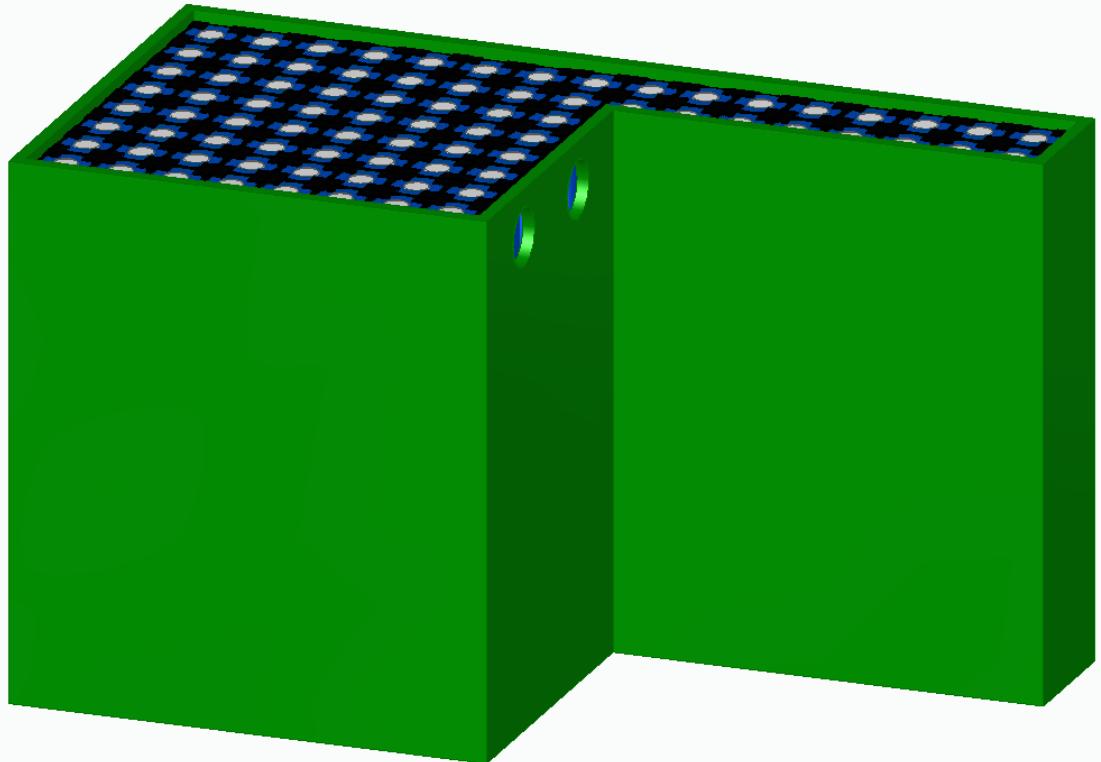


Abbildung V.4: 2. Akkubox

3. Akkubox:

Die dritte und somit letzte Akkubox beinhaltet insgesamt 6 Akkupacks. Diese Box wird an der Vorderseite, genauer parallel zu den Stoßdämpfern, angebracht. Es ist wichtig die Box so nahe es geht am Mittelpunkt und möglichst weit in Bodennähe anzubringen, um den Schwerpunkt des Motorrads nicht drastisch zu verändern.

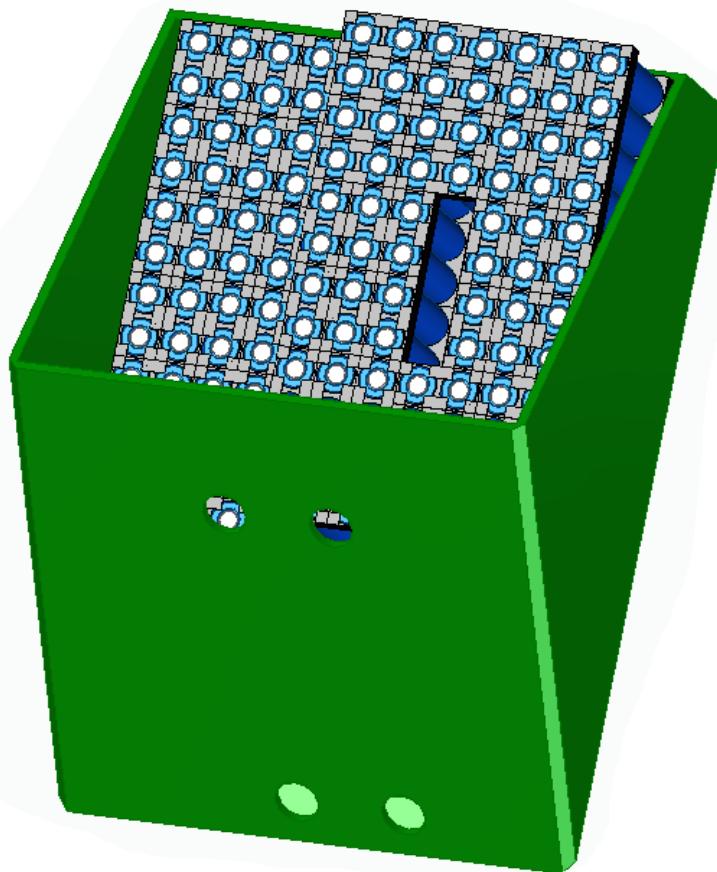


Abbildung V.5: 3. Akkubox

Ergebnis: Zuerst wird die Anzahl der Akkupacks im gesamten System berechnet.

$$\text{Akkupacks}_{\text{Gesamt}} = 1.\text{Akkubox} + 2.\text{Akkubox} + 3.\text{Akkubox} = 2 \text{ Packs} + 6 \text{ Packs} + 6 \text{ Packs} = 14 \text{ Akkupacks}$$

Anschließend werden die Zellen jeder einzelnen bereits oben beschriebenen Akkubox berechnet.

$$\text{Zellen}_{1.\text{Akkupack}} = 1.\text{Akkubox} = 2 \text{ Packs} = 80 \text{ Zellen}$$

$$\text{Zellen}_{2.\text{Akkupack}} = 2.\text{Akkubox} = 6 \text{ Packs} = 240 \text{ Zellen}$$

$$\text{Zellen}_{3.\text{Akkupack}} = 3.\text{Akkubox} = 6 \text{ Packs} = 240 \text{ Zellen}$$

Schlussendlich wird die Zellanzahl der verschiedenen Akkuboxen miteinander addiert und ergeben die Gesamtanzahl der verwendeten Zellen in dem Konzept.

$$\begin{aligned} \text{Zellen}_{\text{Gesamt}} &= \text{Zellen}_{1.\text{Akkupack}} + \text{Zellen}_{2.\text{Akkupack}} + \text{Zellen}_{3.\text{Akkupack}} \\ &= 80 \text{ Zellen} + 240 \text{ Zellen} + 240 \text{ Zellen} = 560 \text{ Zellen} \end{aligned}$$

2.3 Verschaltung der Batteriezellen

Bei der Verschaltung der Batteriezellen war es wichtig auf die Kennwerte der Komponenten zu achten. Da unser elektrischer Motor mit einer Spannung von 50,4V versorgt werden muss, haben wir uns daher auch auf ein 50,4V Versorgungssystem geeinigt. Im weiteren Verlauf wurde geplant und schließlich auch umgesetzt wie die Zellen am besten verschaltet werden sollten.

Grundsätzlich gibt es 3 verschiedene Möglichkeiten einzelne Zellen zu verschalten:

- **Serienschaltung**
- **Parallelschaltung**
- **Kombination aus Serien-und Parallelschaltung**

2.3.1 Serienschaltung

Das Prinzip der Serienschaltung ist relativ einfach. Der Minuspol der einen Batterie wird einfach mit dem Pluspol der anderen Batterie verbunden. Das hat zur Folge, dass alle Zellen mit dem selben Strom durchflossen werden. Jedoch addieren sich alle Teilspannungen der Zellen zu einer Gesamtspannung. Die Serienschaltung von Batterien wird häufig auch als Hintereinanderschaltung oder Reihenschaltung bezeichnet.

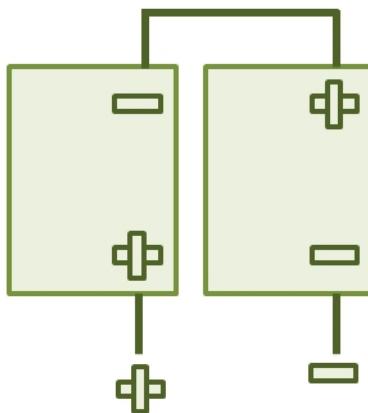


Abbildung V.6: Serienschaltung beliebig vieler Zellen

Beispiel: Werden zwei Batterien mit jeweils 300Ah (Amperestunden) und 9V (Volt) in Reihe geschaltet, ergibt sich eine Ausgangsspannung von 18V mit einer Kapazität von 300 Ah.

Vorteile und Nachteile:

Durch die Reihenschaltung wird ermöglicht, höhere Gesamtspannungen zu erzeugen. Ein bedeutender Nachteil ist jedoch, dass die schwächste Zelle die Leistung der gesamten Reihenschaltung beeinflusst. Außerdem kann es vorkommen, dass wenn eine einzelne Batteriezelle defekt ist, die gesamte Batteriereihe ausfällt. Daher ist es notwendig zusätzliche Sicherungen hinzu zu schalten. Im Normalfall können nur Batteriezellen vom gleichen Hersteller, Typ und von der selben Batterietechnik kombiniert und in Serie geschalten werden.

2.3.2 Parallelschaltung

Das Prinzip der Parallelschaltung ist relativ ähnlich zu der Serienschaltung. Der große Unterschied jedoch besteht darin, dass der Minuspol der einen Batterie mit dem Minuspol der anderen Batterie verschaltet wird. Dadurch summieren sich die Ladekapazitäten (Ah) der einzelnen Zellen zu einer gesamten Ladekapazität. Die Gesamtspannung entspricht jedoch der Spannung einer einzelnen Batterie.

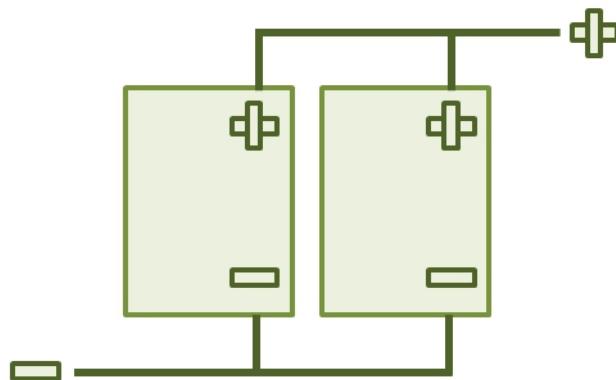


Abbildung V.7: Parallelschaltung beliebig vieler Zellen

Beispiel: Werden zwei Batterien mit jeweils 300 Ah und 9V parallel geschaltet, so ergibt sich eine Ausgangsspannung von 9V und eine Gesamtkapazität von 600Ah.

Vorteile und Nachteile:

Die Parallelschaltung führt dazu, die Leistungsfähigkeit und außerdem die Lebensdauer zu steigern. Jedoch ist die Laderegelung bei einer Parallelschaltung nicht unkompliziert, da jede Zelle unterschiedlich schnell altern und damit eine Fehlerquelle darstellen kann. Deshalb kann es vorteilhaft sein, eine größere Batterie anstatt mehrerer einzelner Zellen zu verwenden. Sollte trotzdem einer Parallelschaltung mehrerer Zellen vorgenommen werden, sollt unbedingt darauf geachtet werden Batterien mit gleicher, Kapazität, Bauart und Ladezustand einzusetzen. Außerdem ist es von Vorteil möglichst kurze Leitungen einzusetzen, um Spannungsverlust zu verhindern.

2.3.3 Kombination aus Serien- und Parallelschaltung

Durch eine Kombination aus einer Serien- und Parallelschaltung ermöglicht man eine größeres Flexibilität zur Erreichung einer bestimmten Spannung und auch Leistung. Wie bereits vorher erwähnt erreicht man durch eine Parallelschaltung die benötigte Gesamtkapazität und durch die Serienschaltung die gewünschte Betriebsspannung.

Diese Methode wird in der Praxis am häufigsten eingesetzt und ist auch bei unserem Akkusystem zum Einsatz gekommen.

Verschaltung der einzelnen Zellen in den Akkupacks:

Da wir uns auf ein 50,4V Versorgungssystem geeinigt haben, und jede einzelne Zelle eine Spannung von 3,6V aufweist haben wir jeweils 40 einzelne Lithium Ionen Akkus zusammengeschaltet. Die einzelnen Batterie werden in den Akkupacks parallel verschaltet, da wir so einen deutlich höheren Leistungsfähigkeit erreichen und die Lebensdauer dadurch verlängert wird.

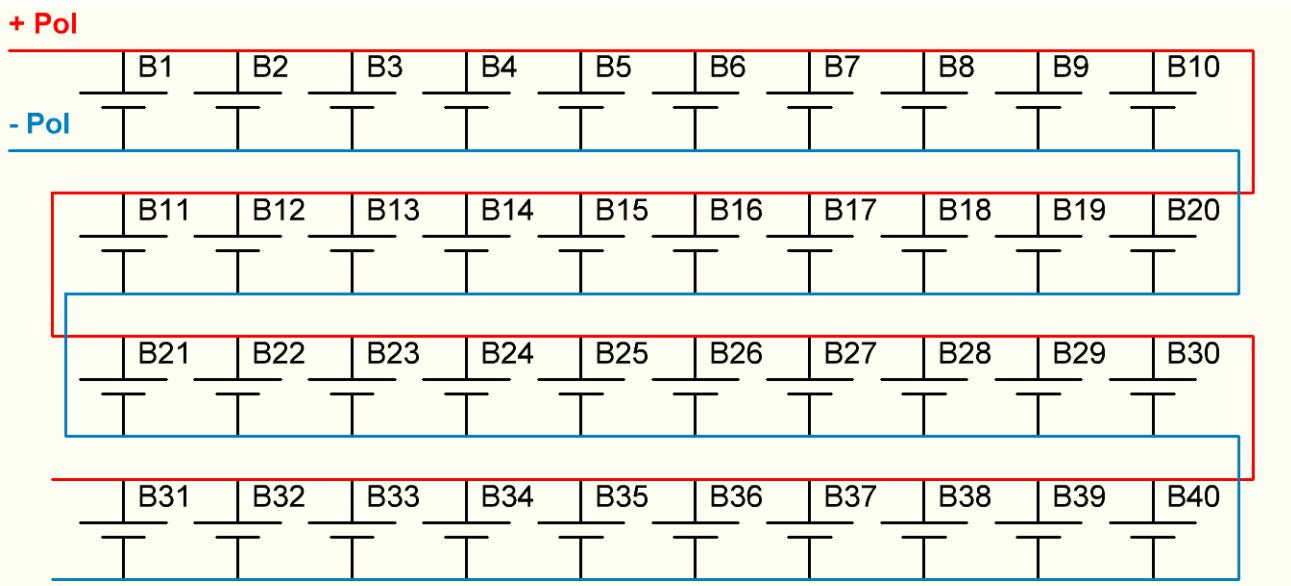


Abbildung V.8: Verschaltung der einzelnen Zellen innerhalb der Akkupacks

Verschaltung der Akkupacks:

Durch die Parallelschaltung innerhalb der Akkupacks wird jedoch nicht die Spannung erhöht. Wir haben eine Anzahl von 560 einzelnen Lithium Ionen Zellen. Ein Akkupack beinhaltet 40 Zellen was dazu führt, dass wir insgesamt 14 Akkupacks haben. Diese 14 Akkupacks werden seriell verschalten um die Spannung von 3,6V auf die gewünschten 50,4V zu vergrößern.

Die separaten Zellen werden mithilfe eines Hiluminband Punktgeschweißt um so eine Verbindung zwischen den Zellen herzustellen. Wichtig ist darauf zu achten, dass das Hiluminband nur bis zu einer Stromstärke von 30A zulässig ist. Da wir jedoch weitaus höhere Ströme zu erwarten haben, muss wir dieses Hiluminband verstärken. Dies erfolgt über eine Metallplatte die jeweils an der Oberseite sowie auch an der Unterseite angebracht wird. Dadurch wird die Schweißverbindung gestärkt und in weiterer Folge werden keine Fehler auftreten.

$$U_{Gesamt} = U_{Akkupack} \cdot 14 = U_{Zelle} \cdot 14 = 3.6 \text{ V} \cdot 14 = 50.4 \text{ V}$$

Aus Darstellungsgründen wurden die Akkupacks 4 - 13 durch das Akkupack ... ersetzt.

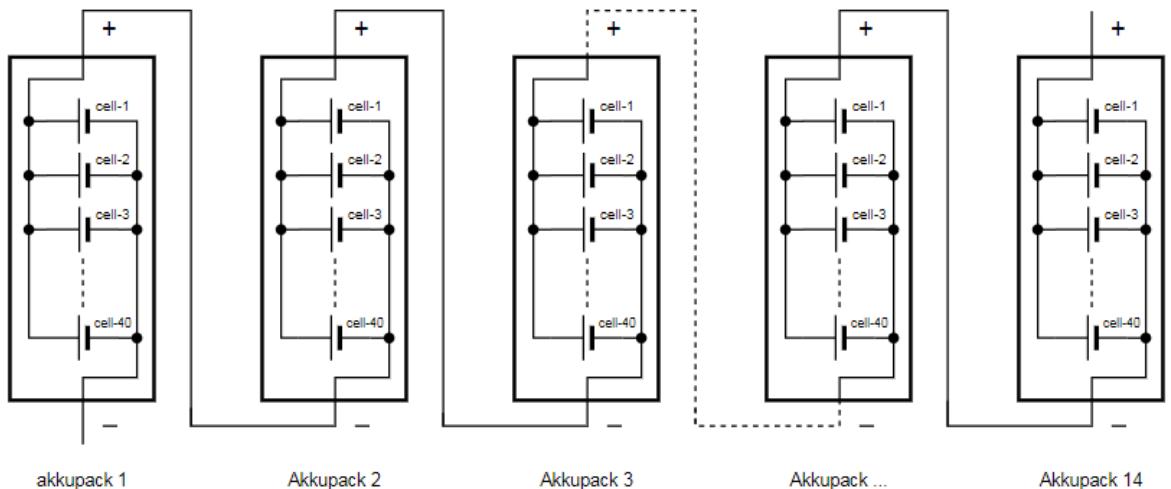


Abbildung V.9: Verschaltung der Akkupacks

2.3.4 Geschätzte Betriebszeit des Akkumulators

In diesem Abschnitt wurden alle relevanten Daten gesammelt, um schließlich eine Näherung für die Laufzeit des Akkumulators durchzuführen. Diese Daten wurden bereits im Kapitel Dimensionierung teilweise berechnet.

Im ersten Schritt wird die Energie, die der Akkumulator aufnehmen kann berechnet.

$$W_{Akkumulator} = U_{Gesamt} \cdot Q_{Gesamt} = 50.4 \text{ V} \cdot 196.000 \text{ mAh} = 9880 \text{ Wh}$$

Als nächstes wird die Leistung berechnet. Da sich das Motorrad jedoch nicht immer mit voller Geschwindigkeit fortbewegen wird, haben wir eine Auslastung von 75 Prozent angenommen und eine realistische Akkulaufzeit zu berechnen.

$$P_{Gesamt} = P_{Motorcontroller} \cdot P_{Raspberry} = 19.5 \text{ kW} \cdot 8 \text{ W} = 19.508 \text{ kW}$$

Wie bereits vorher erwähnt müssen von dieser berechneten Gesamtleistung 25 Prozent abgezogen werden.

$$P_{Gesamt,real} = P_{Gesamt} \cdot 75$$

Schlussendlich kann die ungefähre Laufzeit des emissionsfreien Sportmotorads berechnet werden.

$$t_{Laufzeit} = \frac{W_{Akkumualtor}}{P_{Gesamt,real}} = \frac{9880 \text{ Wh}}{14.63 \text{ kW}} = 0,68 \text{ h} = 41 \text{ min}$$

Die geschätzte durch eine Näherung berechnet Laufzeit des Akkumulator, beträgt in etwa 41min.

2.4 Allgemeine Übersicht der Elektroinstallation

3 Batteriemanagementsystem

Der zweite Teil, der für ein funktionierendes Akkusystem notwendig ist, ist das Batteriemanagementsystem. Die Aufgabe des BMS ist es die Akkumulatoren zu überwachen und an die aufgenommenen Daten über eine serielle Schnittstelle an die Zentralsteuerung weiterzugeben.

In unserm Projekt wurde ein BMS Mini des Hersteller EMUS verwendet. Wir haben uns für das EMUS BMS Mini entschieden, da es ein eigenständiges Lithium-Batteriemanagementsystem mit vielen bereits integrierten Bauteilen und die passenden Spezifikationen für unser Projekt hat. Unter anderem passen die Anwendungsbereiche des Batteriemanagementsystems genau zu unserer Diplomarbeit. Außerdem sind all diese BMS-Funktionen in einem einzigen Gerät integriert.



Abbildung V.10: Mini Batteriemanagementsystem der Firma EMUS

Funktionen des EMUS BMS Mini:

- Messung der Zellenspannungen und Zellentemperaturen
- Batteriestrommessung
- Ausgleich der Zellen (Battery-Balancing)
- Integriertes Schütz zum Schutz der Batterie
- Integrierter Vorladekreis für den Sanftanlauf der Motorsteuerung
- Konnektivität zu verschiedenen Arten von Ladegeräten
- Konnektivität zu Eingängen zur Steuerung des BMS und der Batterie
- Konnektivität zu den Ausgängen zur Anzeige des Batteriestatus und der Steuerung
- Gegebenfalls Konnektivität zu Smartphones zur Steuerung und Konfiguration

Spezifikationen des BMS:

- Anzahl der Zellen(Akkupacks): 6-16
- Einzellenspannung: 1,00 - 4,95 V
- Batteriepackspannung: DC 15,0 - 67,2 V
- Betriebstemperatur: -40°C bis +80°C
- Verbrauchte Leistung: im aktiven Modus (11mA bei 24V)
- Verbrauchte Leistung: im Leerlaufmodus (4mA bei 24V)
- Verbrauchte Leistung: im Tiefschalf (1mA bei 24V)
- Ausgleichsstrom: bis zu 200mA
- Dauerstrom 45A laden/entladen (Spitze 100A - 5s)
- Maße: 97 x 67,1 x 16,6mm

Verwendbare Schnittstellen:

- CAN v2.0 A/B
- RS-232 zur Fernüberwachung
- Drahtlose Smartphone - Konnektivitätsschnittstelle

Ladegeräte die das BMS unterstützt:

- Schützgesteuertes NonCAN-Ladegerät
- Elcon J1939 Ladegerät
- DeltaQ CANopen Ladegeräte

Wie bereits vorher erwähnt beinhaltet unser Akkusystem 560 Zellen. Die Bezeichnung 16s bedeutet, dass das Batteriemanagement insgesamt maximal 16 Zellen überwachen kann. Daher ist es nicht möglich jede Zelle einzeln zu überwachen da so viele Anschlüsse nicht vorhanden sind. Jedes Akkupack beinhaltet 40 Zellen.

$$\text{Akkupacks} = \frac{\text{Zellen}_{\text{gesamt}}}{\text{Zellen}_{\text{Akkupack}}} = \frac{560 \text{ Zellen}}{40 \text{ Zellen}} = 14 \text{ Akkupacks}$$

3.1 Funktionen des Batteriemanagementsystems

Unter dem Begriff Batteriemanagementsystem versteht man die Überwachung und Regelung von Akkumulatoren beim Laden und ebenfalls Entladen. Ein BMS ist nichts anderes als eine elektronische Regelschaltung. Zu den häufigsten Batteriekennwerten gehören die Erkennung des Batterietyps, die Batteriespannung, die Spannung sowie die Temperatur einzelner Akkumulatoren oder gesamter Akkupacks, die Akkukapazität, der Ladezustand, die Restbetriebszeit, die Stromentnahme und einige Kennwerte mehr. Die Aufgabe des Batteriemanagementsystems besteht also darin, sich zugehen, dass die Energie in einer Zellen effizient genutzt wird. Um Beschädigungen von Akkus zu vermeiden, haben die Akkus einen Tiefentladungsschutz, einen Überspannungsschutz und außerdem schützt das BMS auch vor zu schneller Ladung und ebenfalls vor einem zu hohen Entladestrom. Oft ist es der Fall, dass in einem Projekt mehrere einzelne Akkus oder sogar Akkupacks zum Einsatz kommen. In einem solchen Fall sorgt das Batteriemanagementsystem für ein sogenanntes Balancing. Das Battery-Balancing sorgt dafür, dass die Akkupacks oder einzelne Zellen gleiche Ladezustände und Entladezustände haben.

In den folgenden Unterpunkten werden die Funktionen des Batteriemanagementsystems genauer erklärt.

Balancing:

Grundsätzlich wurde das Battery-Balancing bereits im Kapitel ?? erklärt. Im weiteren Verlauf wird das Battery-Balancing im Zusammenhang mit den Akkupacks genauer erklärt und welche verschiedenen Arten es davon gibt.

Balancing in Zusammenhang mit den Akkupacks:

Muss noch zitiert werden: Cluster oder Akkupacks bestehen zur Erhöhung der Nennspannung in der Regel aus mehreren in Reihe geschalteten Einzelzellen oder Zellblöcken. Fertigungs- und Alterungsbedingt gibt es hierbei Schwankungen in der Kapazität, im Innenwiderstand und weiteren Parametern dieser Zellen. Die schwächste Zelle ist dabei bestimmend, wie viel geladen oder entladen werden darf. Im praktischen Einsatz von mehrzelligen in Reihe verschalteten Akkus führt dieser Umstand dazu, dass die Zellen in Reihe unterschiedlich geladen und entladen werden.

Es kommt dann im Verbund zu kritischer Tiefentladung oder bei der Ladung zu einer Überladung und Überschreiten der Ladeschlussspannung einzelner Zellen. Je nach Akkutyp kann es dabei zu einer irreversiblen Schädigung einzelner Zellen kommen. Die Folge: das gesamte Akkupack verliert an Kapazität. (Ende des Zitates) Um das zu verhindern, spielen im Batteriemanagementsystem die Balancer eine wichtige Rolle. Beim Battery-Balancing gibt es zwei verschiedene Arten.

- **Passives Battery-Balancing**
- **Aktives Battery-Balancing**

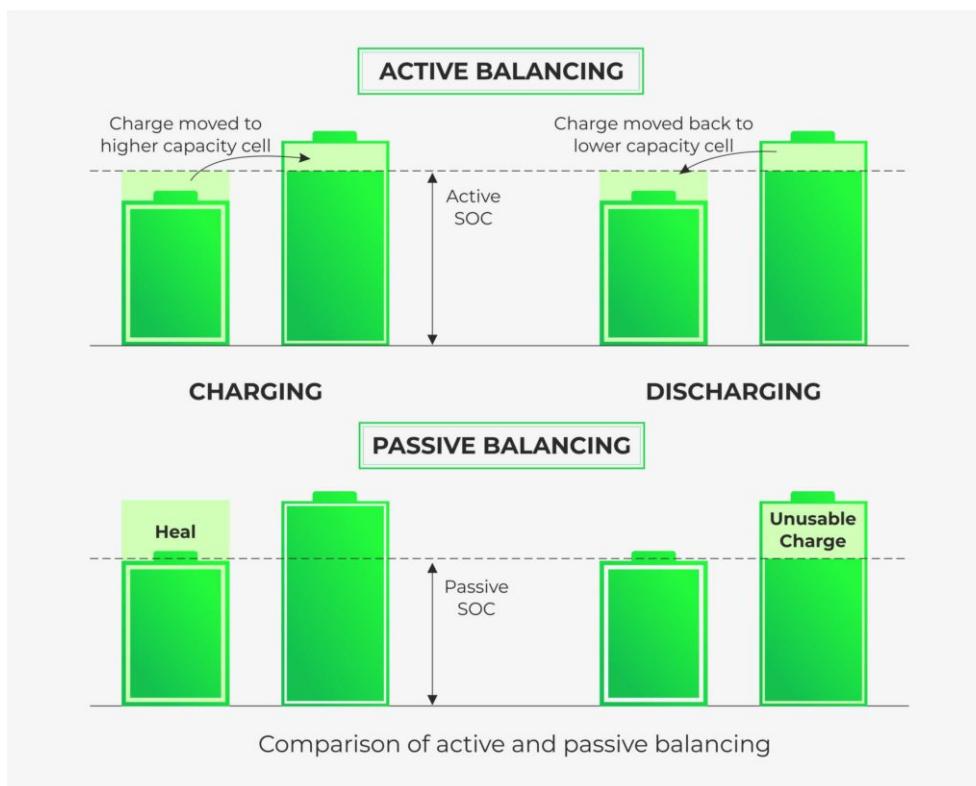


Abbildung V.11: Vergleich zwischen Aktiven- und Passiven-Battery Balancing

Passives Battery-Balancing:

Eine technische weit verbreitete Methode für das Balancing, ist das Passive Battery-Balancing. Dabei arbeitet es nur im Bereich des Ladeschlusses. Der Ausdruck Ladeschluss bedeutet soviel, dass wenn die Akkumulatoren fast vollständig aufgeladen sind das Balancing zu arbeiten beginnt. Sobald die Zellen die Ladeschlussspannung erreicht haben, wird durch den Balancer ein Widerstand parallel dazugeschalten, um so die Spannung auf die Ladeschlussspannung zu begrenzen. Zellen, welche diese Spannung bereits erreicht haben, werden dann nur noch geringfügig weitergeladen oder teilweise sogar etwas entladen. Die Zellen, die jedoch noch in der Reihenschaltung verschalten sind und die Ladeschlussspannung noch nicht erreicht haben, werden weiterhin mit dem Ladestrom versorgt und somit weitergeladen. Wichtig ist darauf zu achten, dass die Leistung des Parallelwiderstandes auf den Ladestrom angepasst werden muss, da sonst zuviel Energie in Form von Wärme am Widerstand auftreten wird.

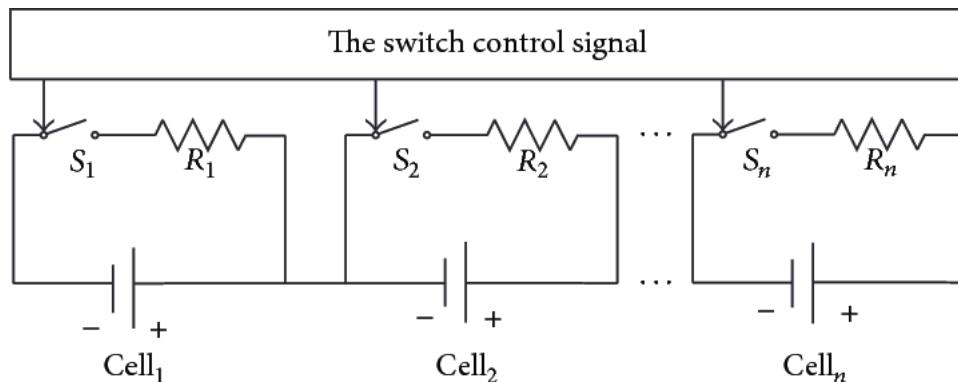


Abbildung V.12: Funktionsweise des Passiven Battery-Balancing

Vorteile des Passiven Battery-Balancing:

- sehr kostengünstig
- technisch relativ leicht realisierbar

Nachteile des Passiven Battery-Balancing:

- Ladevorgang kann extrem lange dauern, da man warten muss bis die schwächste Zelle den geforderten State of Charge (SOC) erreicht hat
- viel Energie verpufft in Form von Wärme
- Diese Verlustwärme wirkt sich negativ auf die Lebensdauer der Akkumulatoren aus
- nicht unerhebliche Brandgefahr

Aktives Battery-Balancing:

Diese Methode des Balancing ist etwas komplexer als beim Passiven Battery-Balancing, jedoch ist sie deutlich effizienter. Bei den aktiven Balancern wird ein Ladungstransfer von Zellen untereinander realisiert. Das bedeutet, dass die Energie der Zellen die bereits eine höheren Ladung aufweisen, auf die Akkumulatoren mit niedrigerer Ladung übertragen werden. Beim Aktiven Battery-Balancing werden sogenannte Ladereglungen benötigt. Ladereglungen sind im Prinzip speziell auf eine Anwendung optimierte Schaltregler, die pro Zelle arbeiten und aktiv die Energie übertragen. Dieser Vorgang kann bereits während des Ladezyklus erfolgen. Standardmäßig wird dieser Vorgang jedoch erst im Bereich des Ladeschlusses aktiv (gleich wie beim Passiven Battery-Balancing). Eine weiterentwickelte Form dieses Systems wird bidirektionale Balancer-System genannt. Hierbei ist es möglich, dass der Ladungsaustausch sowohl beim Entladen als auch beim Aufladen der Zellen stattfinden kann. Deswegen sind diese bidirektionale Balancer noch deutlich effizienter. Das Aktive Battery-Balancing wird heutzutage meistens bei größeren Leistungen angewandt, wie zum Beispiel im Bereich der Elektromobilität.

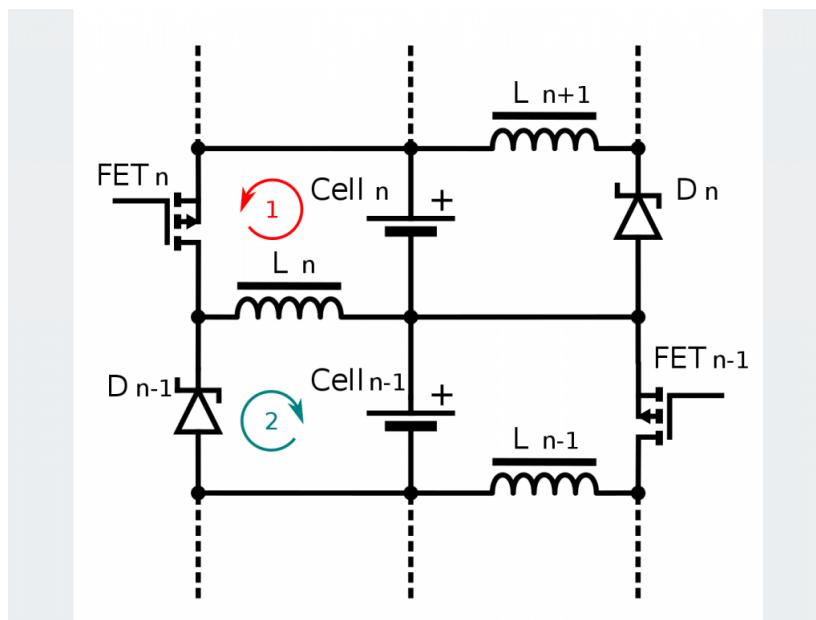


Abbildung V.13: Funktionsweise des Aktiven Battery-Balancing

In der obigen Abbildung kann man die Prinzipschaltung eines aktiven Balancers mit zwei Stufen sehen. Innerhalb von zwei Schaltvorgängen kann dabei die Energie aus der Akkuzelle Cell n über den FET n in die Spule L n übertragen werden (Schleife in rot, 1). Im zweiten Schaltvorgang (Schleife in blau, 2) wird die Energie in der Spule L n über Diode D n-1 in die Cell n-1 geladen und Cell n-1 aufgeladen.

Vorteile des Aktiven Battery-Balancing:

- deutlich höherer Wirkungsgrad als beim passiven Battery-Balancing
- übergeordnete Ladereglung mit intelligenter und lernfähiger Software
- Lebensdauer der Akkumulatoren kann durch die Methode der Ladungsumverteilung deutlich erhöht werden
- überschüssige Energie wird nur zu einem geringen Grad in Wärme umgewandelt
- geringeres Risiko für eine Entflammung

Nachteile des Aktiven Battery-Balancing:

- höherer Verschaltungsaufwand, dadurch erhöhte Initialkosten

Spannungsmessung:

Lithium Ionen haben die Eigenschaft, dass sie Überladungen (Überspannung) sowie auch Unterspannung nicht gut verkraften. Im schlimmsten Fall, kann das sogar zur vollständigen Zerstörung einer Zelle kommen. Deswegen hat das Batteriemanagementsystem die Aufgabe jedes Akkupack zu messen und bei gegebener Über- und Unterspannung sofort abzuschalten. Der Schutz vor Überspannung wird zum Beispiel dann eingeschalten, sollte es zu einer ungewollten Rückspeisung kommen. Der Unterspannungsschutz hingegen tritt ein, wenn der vorgegebene Unterspannungsparameter überschritten wird. Sollte dies der Fall sein wird der Akkumulator von der Last getrennt, sodass der Akku nicht weiter entladen oder auch überladen werden kann. Die Spannungsmessung ist außerdem dafür zuständig die Spannung der Akkupacks zu messen.

Strommessung:

Bei dem Daly Batteriemanagementsystem ist eine Strommesseinrichtung bereits integriert. Diese Strommesseinrichtung misst einerseits den Entladestrom und andererseits den Ladestrom. Sollte es wie beim Überspannungsschutz zu einer ungewollten Rückspeisung kommen, greift der Ladestromschutz ein. Sollte es dazu kommen, dass der Akkumulator zu viel Strom abgeben würde, wird der Entladeschutz aktiviert. Zudem wird die Strommesseinrichtung dazu benötigt, den Ladezustand des Akkumulator anzugeben.

Temperaturüberwachung:

Lithium Ionen Akkumulatoren neigen wie auch viele andere Akkus dazu, sich bei einer zu großen Stromentnahme stark zu erwärmen. Das kann zu innern sowie auch zu äußereren Schäden am Akkumulator führen. Deswegen ist es wichtig, die Temperatur der Akkupacks zu überwachen um Schäden vorzubeugen. Sollte der Akkumulator unter oder über einen gewissen Temperaturbereich gelangen, wird dieser von der Last getrennt um eine weitere Erwärmung und dadurch größere Schäden zu vermeiden.

3.2 Verschaltung des Batteriemanagementsystems

3.2.1 Anschließen der Akkupacks an das BMS

Die Hersteller des BMS mini empfehlen die Akkumulatoren in einem möglichst geringen Abstand zur Batterie zu installieren, um den Verdrahtungsprozess zu vereinfachen. Da es notwendig ist die Spannung jedes Akkupacks zu überprüfen muss auch jedes einzelne an das Batteriemanagementsystem angeschlossen werden. Um mit einer sicheren Installation zu starten muss am Anfang sichergestellt werden, dass der Minuspol des ersten Akkumulators mit dem Terminal (-) am BMS verbunden wird. Anschließend wird genau anders herum der Pluspol des Akkus mit dem Terminal (+) verbunden. Danach werden die einzelnen Akkupacks mit dem Batteriemanagementsystem verbunden.

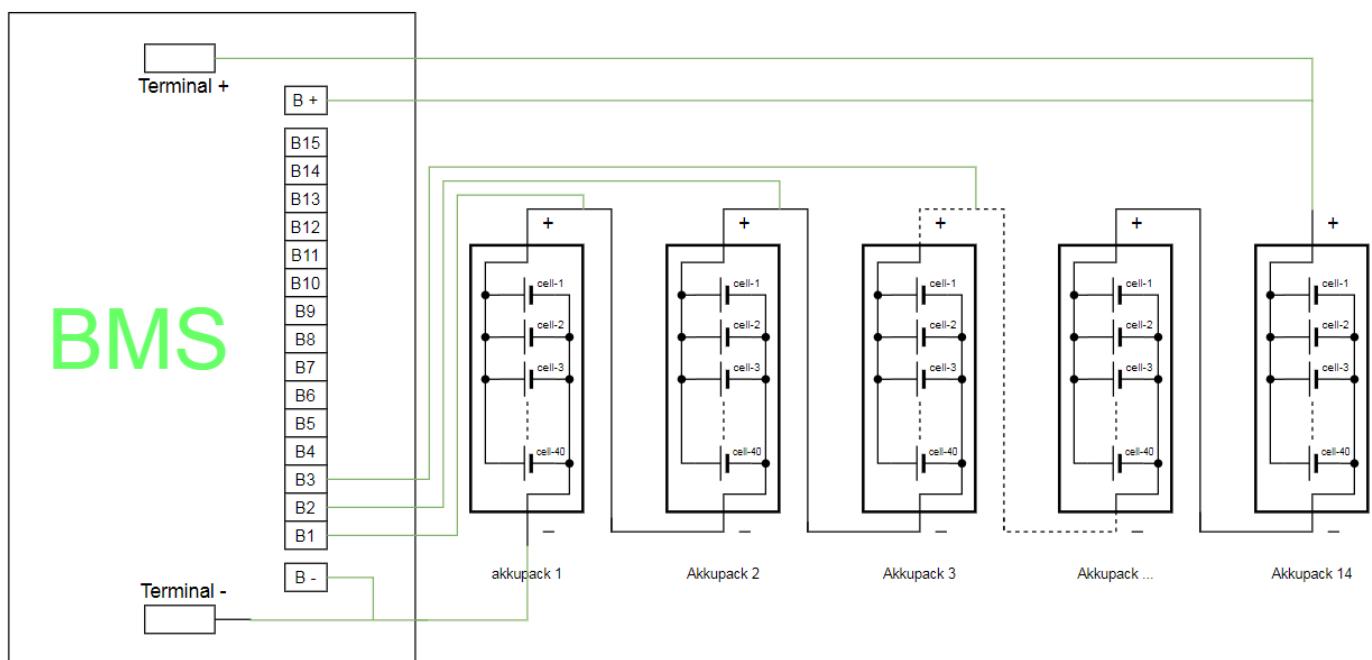


Abbildung V.14: Anschlussplan der Akkupacks an das BMS

3.2.2 Temperaturmessung mithilfe des BMS

Im nächsten Schritt werden Temperatursensoren gleichmäßig verteilt und an die Akkupacks angebracht. Es ist nicht notwendig an jedem einzelnen Akkupacks einen Temperatursensor anzubringen. Jedoch sollteman sich bewusst sein, dass mithilfe solcher Sensoren teilweise Fehler schon im vorhinein behoben werden können bevor es noch zu größeren Schäden im System kommt.

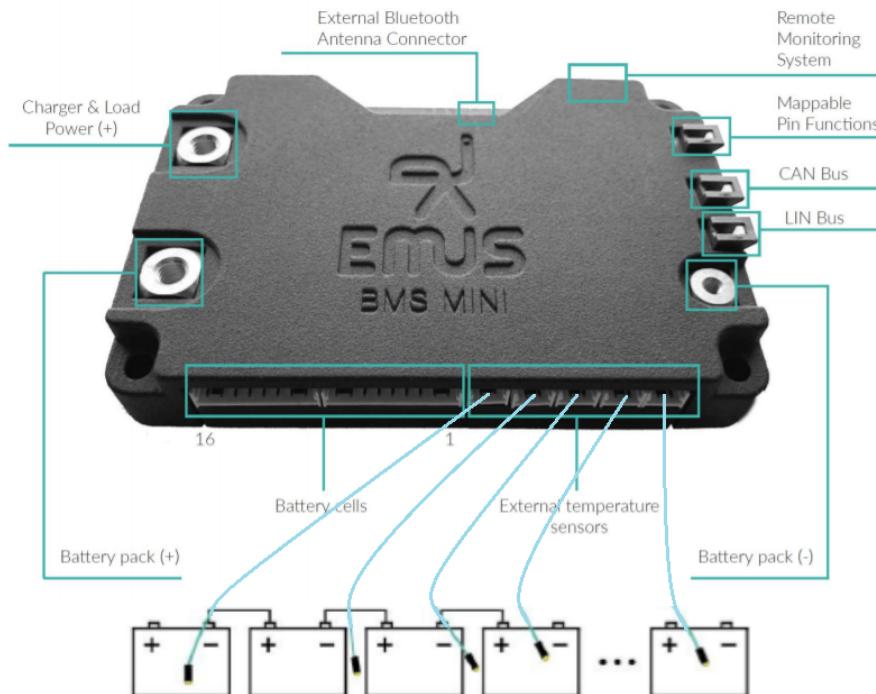


Abbildung V.15: Anschlussplan der Temperatursensoren

3.2.3 Anschlussplan der Last

Im letzten Schritt wird die Last an dem Batteriemanagementsystem angeschlossen. Die Last entspricht entweder dem Verbrauchen oder anderfalls dem Ladegerät. Um die Last an das BMS anzuschließen muss das Power (+) Terminal mit dem Pluspol der Last (Load/Motor (+) Terminal) verbunden werden. Der zweite Pol der Last (Load/Motor (-) Terminal) wird mit dem Battery (-) Terminal verbunden. Sehr wichtig ist dabei darauf zu achten, dass die Last nicht unmittelbar mit Strom versorgt werden muss. Dazu wird ein Leistungsschutzschalter zwischen Last und dem Power (+) Terminal dazwischengeschalten.

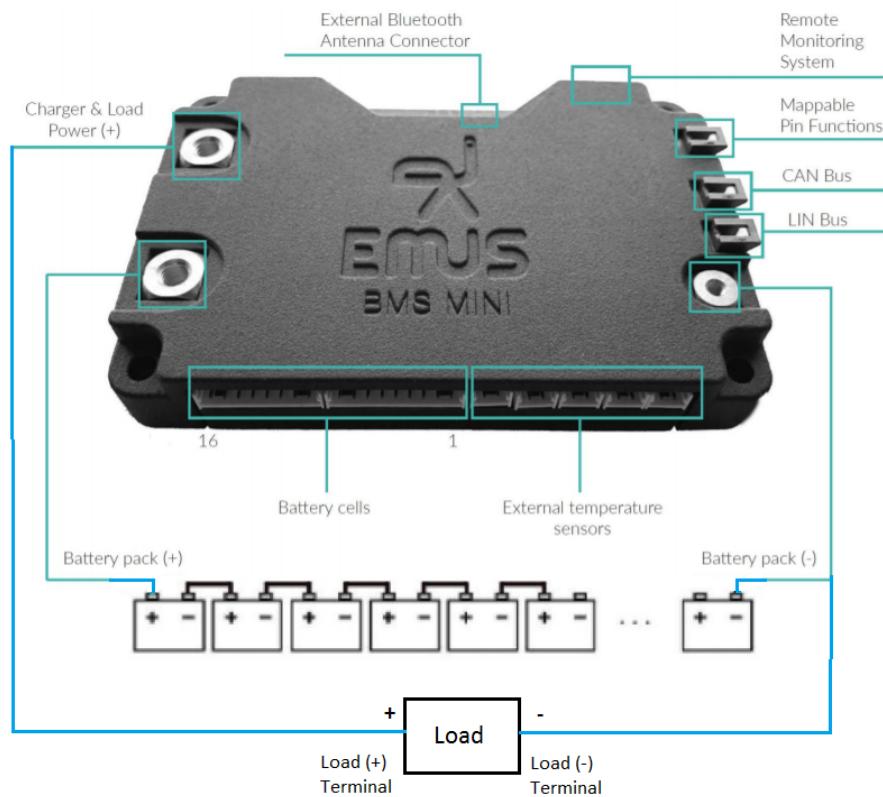


Abbildung V.16: Anschlussplan der Last an das BMS

3.2.4 Kommunikation mittels CAN-Bus

Der CAN-Bus ist aufgrund seiner Stärken und seines Kommunikationsmechanismus in vielen Anwendungsbereichen weit verbreitet. Wichtig ist, dass der CAN-Bus richtig eingerichtet wird, da man sonst seine Zuverlässigkeit stark gefährdet. Dies ist bereits bei den EMUS BMS-Komponenten welche mit einem CAN ausgestattet sind der Fall und weiters ist es sogar in der Norm ISO 11898-2 festgelegt. Meistens wird der CAN-Bus in Hochgeschwindigkeits Netzwerken verwendet. In der Norm ist eine Standard definierte Netzwerktopologie mit einer einzelnen Leistungstruktur abgebildet. Die Kernaussage dieser Norm ist, dass am Ende zwischen CAN-High und CAN-Low ein Leitungsabschlusswiderstand integriert sein muss. Wie bereits vorher erwähnt kommuniziert das Batteriemanagementsystem mit der Zentralsteuerung mittel CAN-Bus. In der folgenden Abbildung ist die Topologie eines CAN-Netzwerkes abgebildet.

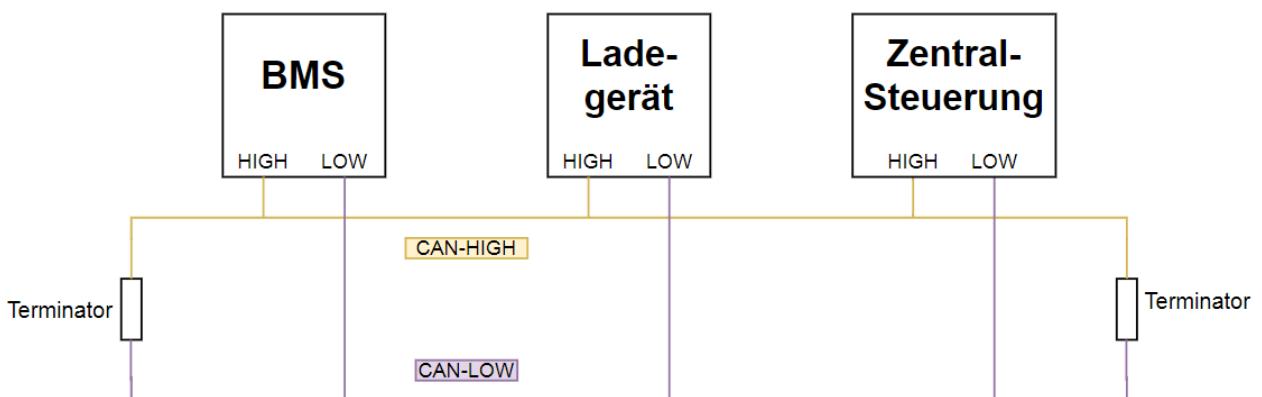


Abbildung V.17: Topologie eines High Speed CAN-Netzwerks

Wenn man Daten von dem Batteriemanagementsystem zur SPS sendet, kann es zu Übertragungsproblemen kommen. Um diese Übertragungsprobleme zu minimieren muss zwischen CAN High und CAN Low ein Leitungsabschlusswiderstand (Skizze: Terminator) eingebaut werden. Dieser Terminator wird jeweils an dem Batteriemanagementsystem und ebenfalls an der SPS angebracht, da diese zwei Komponenten ununterbrochen miteinander verbunden sind.

CAN-Bus Stecker an dem Batteriemanagementsystem:

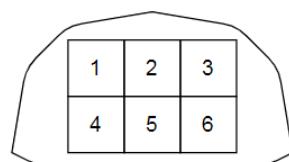


Abbildung V.18: Steckerbelegung des CAN-Buses an dem BMS

- Pin 1: Versorgung
- Pin 2: CAN Terminator (Leitungsabschlusswiderstand)
- Pin 3: CAN - HIGH
- Pin 4: Ground (Masse)
- Pin 5: CAN Terminator (Leitungsabschlusswiderstand)
- Pin 6: CAN - LOW

3.3 Applikation des BMS Mini

Die Hersteller, EMUS, des Batteriemanagementsystems haben eine eigene Anwendung die auf jedem Smartphone und Tablet verfügbar ist erstellt. Die Anwendung Namens EMUS EVGUI ist eine frei verfügbare App für Android- und iOS-Geräte, die speziell für die Überwachung des Batteriestatus in einem Elektrofahrzeug entwickelt worden ist. Das Smartphone kann einerseits über ein drahtloses BT-Protokoll mit dem BMS Mini verbunden werden. Dazu wird jedoch die EMUS G1 Smartphone-Konnektivität benötigt. Die zweite Möglichkeit besteht darin, das Smartphone über ein einfachs USB Kabel mit dem Batteriemanagementsystem zu verbinden. In der Hauptansicht der EMUS EVGUI App sind die wichtigsten Anzeigen abgebildet:

Hauptanzeige der EMUS EVGUI App:

- Temperatur und Ladezustand der Akkumulatoren
- Restspannung der Akkupacks
- Lade- Entladestrom
- Momentane Leistung des Elektromotors
- Momentaner Energieverbrauch des Sportmotorrads pro km
- Reichweite

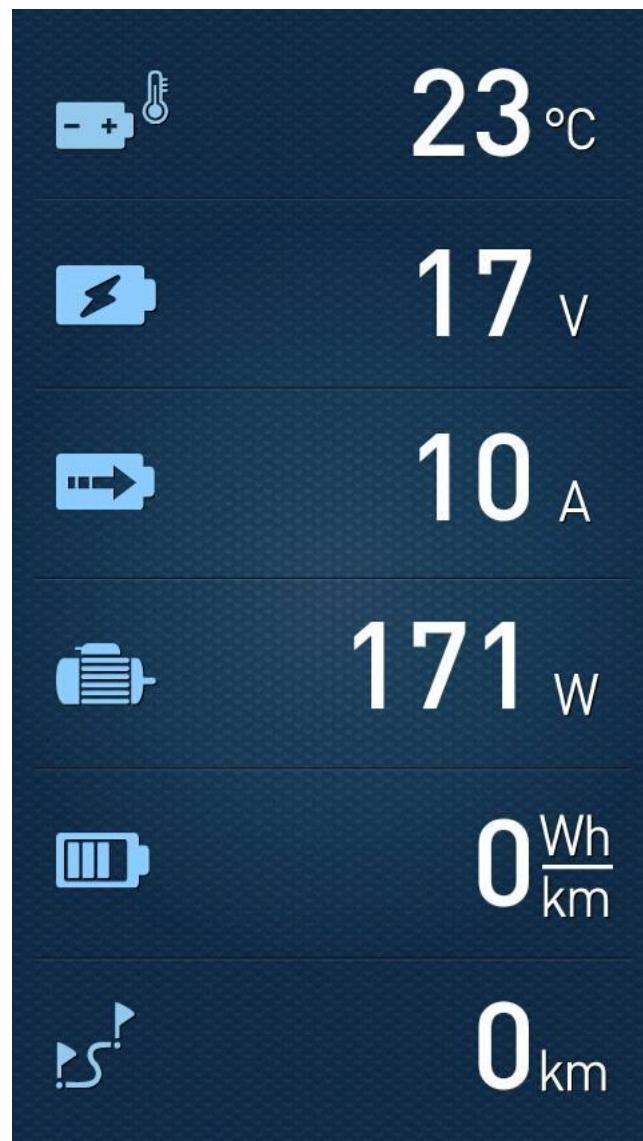


Abbildung V.19: Hauptansicht der EMUS EVGUI App

Sobald man in dem Hauptansichtsfenster einen beliebigen Unterpunkt anklickt, öffnet sich ein Unterfenster, wo man die Anzeige detaillierter erkennt.



Abbildung V.20: Detaillierte Ansicht der EMUS EVGUI App

3.3.1 Konfiguration der EMUS EVGUI App

Wie bereits vorher beschrieben, gibt es zwei verschiedene Ansichtsarten. In der Detaillierten Ansicht gibt es im Linken unteren Eck einen Button mit dem Namen Menü.

Klickt man diesen Button an, scheinen 4 weitere Unterpunkte auf.

- Battery Status
- Bms Status
- Event Log
- Settings



Abbildung V.21: Menü der EMUS EVGUI App

Die wichtigsten zwei Punkte sind hierbei der Battery Status und der Bms Status. Auf diese zwei Punkte wird mithilfe von Bildern in den folgenden Seiten etwas genauer eingegangen.

Battery Status:

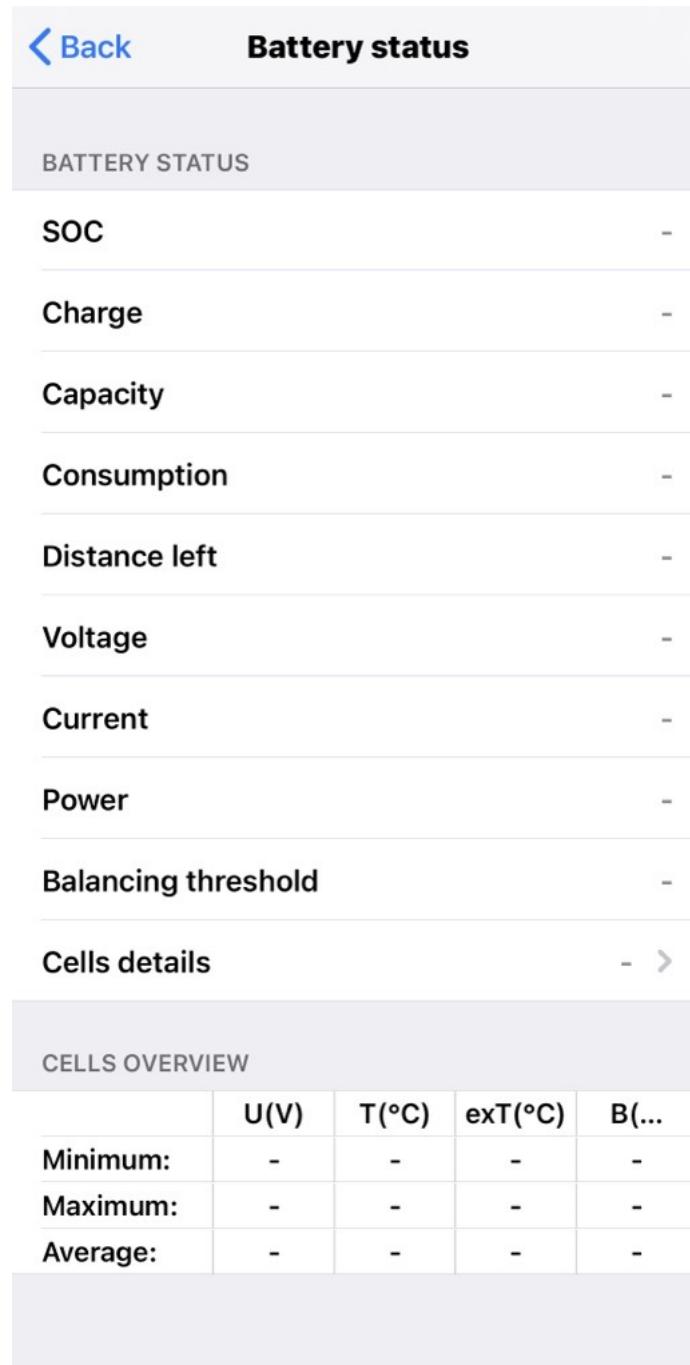


Abbildung V.22: Battery Status Anzeige der EMUS EVGUI App

Bms Status:

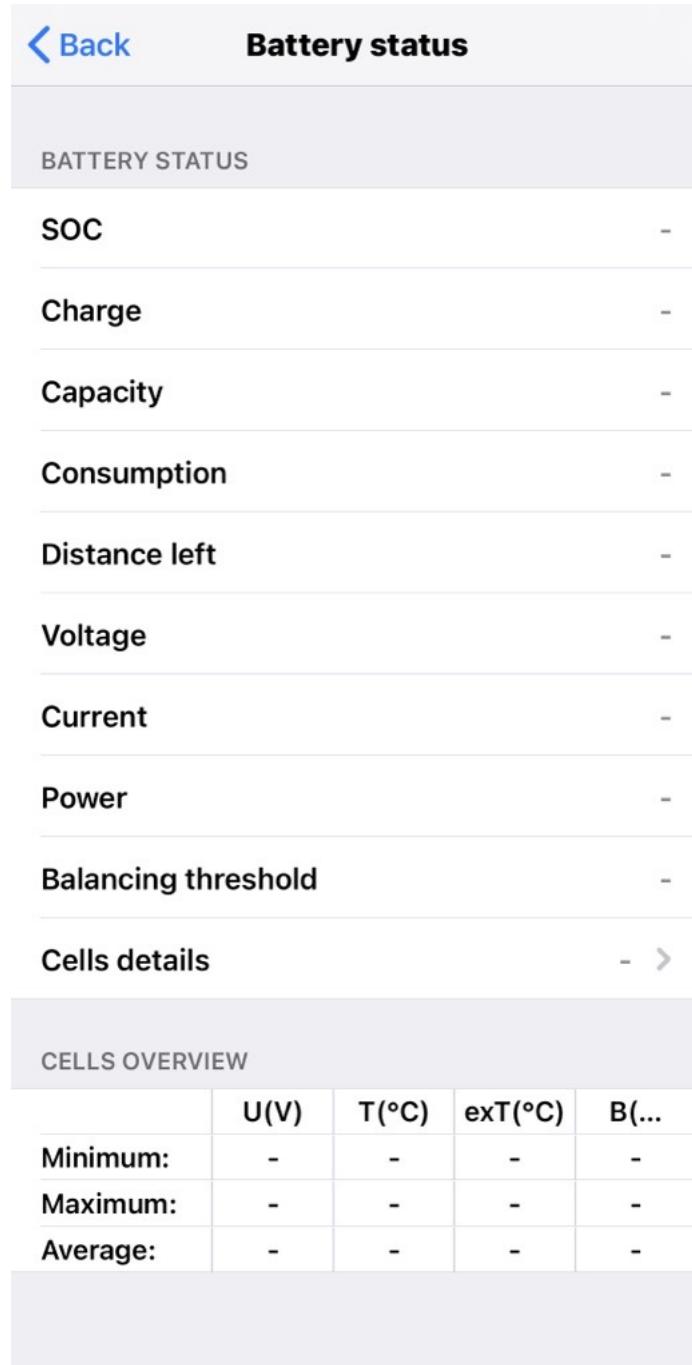


Abbildung V.23: Battery Status Anzeige der EMUS EVGUI App

In der Kategorie BMS Status kann man wiederum verschiedene Unterpunkte auswählen um die Anzeigen zu lassen.

- Battery Status
- Protection Status
- Power Reduction
- Pin Status

3.4 Akkumulatoren

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, Datenübergabe 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

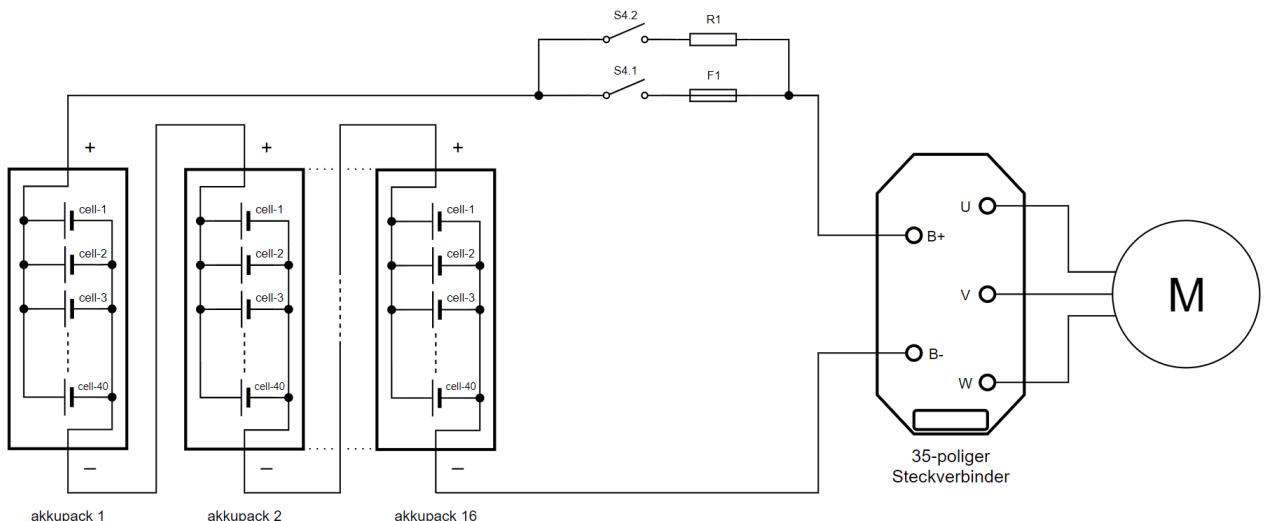


Abbildung VI.1: Grundaufbau des Laststromkreises

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 gestellten 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 Fehlauslösungen 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 geschalten 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. Das im endeffekt ausgewählte Bauteil stammt von der Firma „TE Connectivity / Raychem“ und hat die Bezeichnung „KILOVAC LEV200 A4ANA“. Bei diesem Hochleistungs-Relais ergibt sich bei einer Gleichspannung von 120V und einem Strom von 600A 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 Miliohm liegt, ist der Kurschlussstrom mindestens 10 mal so groß wie der Nennstrom der Sicherung, was bei der ausgewählten Schmelzsicherung „FWA-400B“ von der Firma „Bussmann / Eaton“ eine Ausschaltzeit von wenigen Milisekunden 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-Managemen-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 Modelnummer „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 Bremseingänge (Throttle and Brake Inputs)
- Positionsrückmeldung vom Encoder (Position-feedback Input)
- Prozessorschaltung und Spulenrücklauf (KSI and Coil Return)

- **Ausgänge (Outputs)**

- Analoge Ausgänge (Analog Outputs)
- Digitale und Pulsenvelopenmodulierbare 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, für diese Anwendung vorgefertigte 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.

In dieser Abbildung kann man den prinzipiellen Aufbau des Steuerstromkreises genauer betrachten. Die einzelnen Ein- und Ausgänge (Schalter und Induktivitäten) sind mit Ausnahme von Encoder, Throttle-Pot und CAN-Bus nur mit der allgemeinen Bezeichnung des Curtis Controllers versehen. Da der Curtis Controller ein umfassendes Einsatzgebiet abdeckt, werden nicht alle Funktionen bzw. Pins für die Anwendung als Motorrad benötigt, somit fällt die Verdrahtung dieser Pins weg. Die zugehörigen Eigenschaften und ausgewählten Funktionen der einzelnen Pins kann man auf dieser Abbildung nicht erkennen, diese sind aber in folgenden Punkten erklärt.

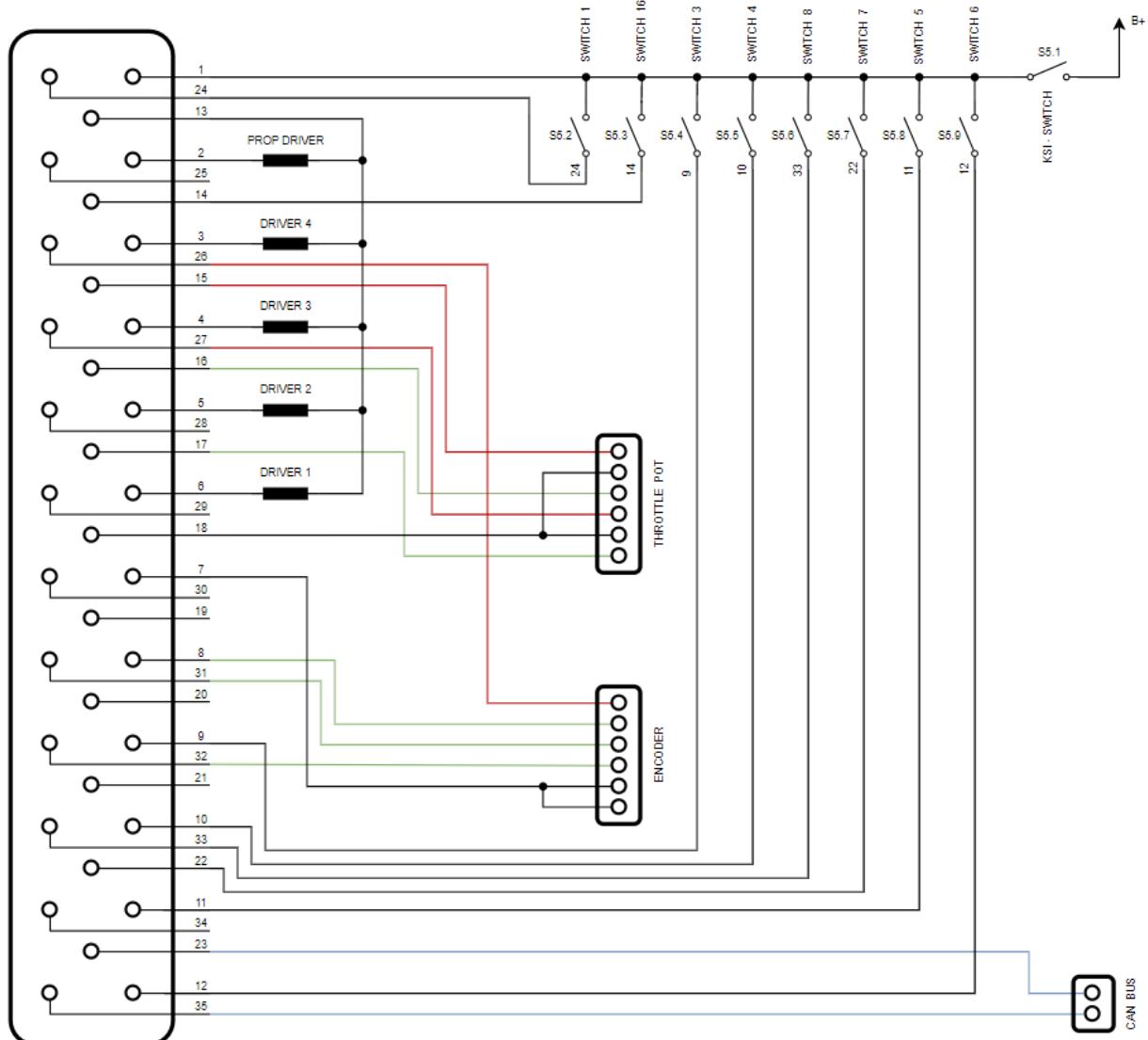
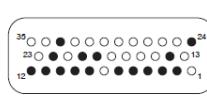


Abbildung VI.2: Grundaufbau des Steuerstromkreises

2.3.2 Digitale Eingänge (Digital Inputs)

Es gibt insgesamt 16 Pins, die als digitale Eingänge genutzt werden können, jedoch werden die letzten sieben Pins davon eigentlich für die Verwendung als Ausgänge konfiguriert. Der Switch 1 wird im Normalfall für die Funktion „Emergency Reverse“ verwendet, da die Realisierung dieser Funktion bei einem Motorrad aber eher unwichtig ist, wird der zugehörige Pin 24 vorerst nicht verwendet (wird eventuell bei späteren Verbesserungen hinzugefügt). Switch 2 wird als analoger Eingang verwendet und ist in diesem Punkt genauer erklärt. Switch 3 wird für die Betätigung von Interlock verwendet. Interlock wird vom Raspberry PI angesteuert und muss aktiviert sein, damit der Motorcontroller in den Fahrbetrieb wechseln kann. Der NOT-Aus befindet sich auf der Lenkstange und steuert den Switch 4 an, bei Betätigung wird jeglicher Betrieb sofort eingestellt. Der Schalter zur Auswahl des gewünschten Antriebsmodus befindet sich ebenfalls auf der Lenkstange und ist mit dem Switch 5 verbunden. Die Parameter „Forward“ und „Reverse“, welche die Auswahl der gewünschten Fahrtrichtung ermöglichen, werden normalerweise auf Switch 7 und 8 gelegt.

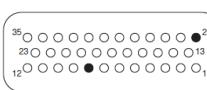


| DIGITAL INPUT SPECIFICATIONS | | | | | | |
|------------------------------|-----|---|------------------------------------|--------------------------|---------------------------|--|
| Name | Pin | Logic Thresholds | Input impedance* | Voltage range† | ESD Tolerance | |
| Switch 1 | 24 | Rising edge= 4.4V max Falling edge= 1.5V min | 48-80V models: 25.2 kΩ, 27.3 kΩ | -10V to (MaxV + 10 V) | ± 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 | | | -5V to (MaxV + 10 V) | | |
| Digital Out 6 | 19 | | | | | |
| Digital Out 7 | 20 | | | | | |
| 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. Analog 2 wird hierbei 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.

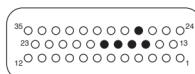


| ANALOG INPUT SPECIFICATIONS | | | | | |
|-----------------------------|-----|---------------------------|-------------------------------------|---------------------------|---------------------------|
| Signal Name | Pin | Operating Voltage | Input impedance* | Protected Voltage | ESD Tolerance |
| Analog 1 | 24 | 0 to 10V in 1024 steps | 48-80 V models: 23.8 kΩ, 28.1 kΩ | -10 V to (MaxV + 10 V) | ± 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 zwei unabhängige 3-Draht Potentiometer-Ausgänge verbaut, welche beide für den Gaseingang benutzt werden.



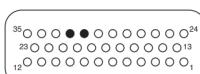
THROTTLE INPUT SPECIFICATIONS

| 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) | $\pm 8 \text{ kV}$ (direct strike) |
| Pot2 High | 27 | | | | | |
| Throttle Pot Wiper | 16 | 0 to 6.25 V | 100 k Ω 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.



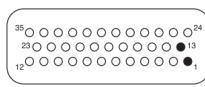
SIN/COS SENSOR INPUT SPECIFICATIONS

| Signal Name | Pin | Operating Voltage | Input Impedance | Max. Frequency | Protected Voltage | ESD Tolerance |
|---------------------|-----|-------------------|--|----------------|-----------------------|------------------------------------|
| Position Feedback A | 31 | 0 to 5 V | 150 k Ω for voltages \leq 5 V 75 k Ω for voltages $>$ 5 V | 500 Hz | -5 V to (MaxV + 10 V) | $\pm 8 \text{ kV}$ (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 jedoch aufrechterhalten werden, um einen Verpolungsschutz gewährleisten zu können.

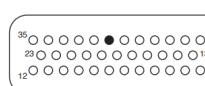


| KSI and COIL RETURN INPUT SPECIFICATIONS | | | | | |
|--|-----|---|-----------------------|------------------------------------|------------------------------------|
| Signal Name | Pin | Operating Voltage | Input Current | Protected Voltage | ESD Tolerance |
| KSI | 1 | Between under- and overvoltage 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 Datenausgabe über bestimmte Anzeigegeräte vorgesehen, wie zum Beispiel eine Anzeige für den aktuellen Ladestand des Akkumulators, vorgesehen. Da alle benötigten Fahrdaten mithilfe des Touchdisplays visualisiert werden, wird dieser Pin nicht verwendet.

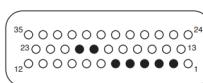


| ANALOG OUTPUT SPECIFICATIONS | | | | | |
|------------------------------|-----|----------------|----------------|-----------------------|------------------------------------|
| Signal Name | Pin | Output Voltage | Output Current | Protected Voltage | ESD Tolerance |
| Analog Out | 30 | 0 to 10 V | 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 sieben digitale Ausgänge, wovon jedoch nur die ersten fünf für eine Pulsweitenmodulation konfiguriert werden können. Diese Ausgänge sind für induktive Lasten, wie zum Beispiel den Hauptschütz oder eine elektromagnetische Bremse, vorgesehen. Rein ohm'sche Lasten können ebenfalls angesteuert werden, jedoch darf der zulässige Spitzenstrom nicht überschritten werden. Der Proportional-Driver kann bei richtiger Konfiguration auch für die Anzeige eines Tachometers oder ähnlichem hergenommen werden. Generell kann jeder Pin dieser Gruppe ebenfalls als digitaler Eingang benutzt werden.



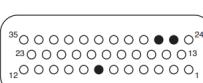
DIGITAL and PWM OUTPUT SPECIFICATIONS

| 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 | | 0 to 2A in 607 nominal steps | | 2A Max | | |
| Driver 4 | 3 | | 18 kHz | | | | |
| Prop Driver | 2 | On / Off | N/A | N/A | 1A Max | | |
| Digital Out 6 | 19 | | | | | | |
| 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. Die 5V-Spannungsversorgung wird in unserem Fall für den Encoder verwendet, die 12V-Versorgung wird aufgrund des vorhandenen Spannungswandlers nicht benötigt.



POWER SUPPLY OUTPUT SPECIFICATIONS

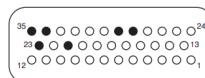
| Signal Name | Pin | Output Voltage | Output Current | Protected Voltage | ESD Tolerance |
|-------------|-----|----------------|--|-----------------------|------------------------|
| +12 V Out | 25 | 11.5 to 14.5 V | 100 mA max for +12 Out 100 mA max for +5 Out 200 mA max (combined total) | −1 V to (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 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 zwei Möglichkeiten zur Konfiguration des CAN-Busses, dies wird jedoch im Punkt Software genauer erklärt. Der CAN-Bus wird also über die Pins „CAN H“ und „CAN L“ realisiert, dieser wird mit dem Batterie-Management-System und der Zentralsteuerung verbunden.

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) | $\pm 8 \text{ kV}$ (direct strike) |
| CAN L | 35 | | | (no connection to external wiring) | |
| CAN Term H | 21 | | | | |
| CAN Term L | 34 | | | | |
| Serial TX | 28 | Curtis 840 Display, 1313 Handheld 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 drei 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

Im 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

Die folgenden Parametermenüs sind auf bestimmte Funktionen angepasst und optimiert worden. Muss eine Funktion angesteuert werden, so kann sie einen beliebigen Pin zugewiesen werden.

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 unerer 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 kleiner 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 eingeschalten und konfiguriert werden.

Pump Contactor

Dieses Menü dient zur Konfiguration einer Pumpe, für den Kühlkreislauf. Es kann eine erhöhte Versorgungsspannung im Anlaufbetrieb festgelegt werden.

EM Brake Control

Mit diesem Parametermenü kann eine zusätzlich verbaute, elektromagnetische Bremse angesteuert werden. Da in unserem Motorrad jedoch nur herkömmliche mechanische Bremsen verbaut sind, ist diese Funktion für unsere Anwendung nicht zu gebrauchen. Für die elektromagnetische Bremse gibt es jedoch eine große Menge an Konfigurationsmöglichkeiten. Für verschiedene Ereignisse können bestimmte Drehmoment- und Zeitwerte festgelegt werden. Ebenfalls können viele sicherheitsrelevante Einstellungen getätigt werden.

Emergency Reverse (EMR)

Diese Funktion ist für die Erstellung eines Notfall-Rückwärtsgangs gedacht. Wenn der Switch 1 angesteuert wird, beschleunigt das Motorrad für eine festgelegte Zeit und Geschwindigkeit in die Rückwärts-Richtung. Wenn sich das Motorrad währenddessen vorwärts bewegt, wird es zuerst abgebremst. Die Werte für die Verzögerung bzw. Beschleunigung können festgelegt werden, ebenso wie weitere Feineinstellungen.

Interlock Braking

Wenn die Funktion Interlock Braking aktiviert wurde, wird das Motorrad durch Rekuperation zum Stillstand gebracht, wenn der Eingang Interlock deaktiviert wurde. Wird Interlock Braking deaktiviert, so rollt das Fahrzeug im Leerlauf weiter. Die gewünschte Stärke der Verzögerung kann definiert werden, ebenso wie weiter sicherheitsrelevante Einstellungen.

Dual Drive

Diese Funktion dient dazu, ein Fahrzeug mit zwei Motoren betreiben zu können. Die zwei zugehörigen Motorcontroller interagieren über ein Master-Slave-System miteinander.

Vehicle

Über dieses Parametermenü können allgemeine Einstellungen, wie zum Beispiel die Einheit der Geschwindigkeit oder der Raddurchmesser festgelegt werden. Ebenfalls sind sehr viele unterschiedliche Parameter für eine genau Auswertung und Ausgabe aktueller Fahrdaten vorhanden.

Supervision

Diese Parameter sind für die Einstellung der Geschwindigkeits- und Strom- bzw. Frequenzüberwachung. Wenn die zu kontrollierenden Werte ein definiertes Maximum übersteigen, wird ein Fehler ausgelöst.

3.2 Drehmomentsteuerung (Torquecontrol)

Die Drehmomentsteuerung wird mithilfe von zwölf unterschiedlichen Parametern beschrieben. Generell können diese Parameter eher als Feineinstellungen angesehen werden, da der grundsätzliche Vorgang immer der gleiche bleibt. Mit diesen Parametern werden die maximale Geschwindigkeit, die Reaktionszeit und die Aggresivität 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 Regelschwingungen führen. Bei einem zu niedrigen Kp kann die maximale Geschwindigkeit den Parameter Max Speed überschreiten. |
| Ki Ki_TrqM | 5 – 100 % 50 – 1000 | Mit diesem Parameter kann die Integralregelung genauer beschrieben werden, welche die Drehzahlabgrenzung unterschiedlich stark beeinflusst, abhängig von der aktuellen Regelabweichung. Größere Werte ermöglichen eine schnellere Regelung, können jedoch zu Regelschwingungen führen. Bei zu niedrigen Werten kann es lange dauern, bis sich der Motor bei einer Überdrehzahl dem Parameter 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 Bergabfahren. |

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, kann es sich anfühlen, wie wenn das Fahrzeug für kurze Zeit weiterfährt. |
| 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 Fahrrichtungswechsel 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 Bremsstrom ist von 0 bis 100% des maximalen Rekuperationsstromes einstellbar. |
| Neutral Taper Speed Neutral_Taper_Speed_TrqM | 200 - 6000 U/min 200 - 6000 | Bei dieser Motordrehzahl wird der neutrale Bremsstrom rückgespeist, wenn der Gasdrehgriff losgelassen wird. Bei einem zu geringen Wert kann es zu Regelschwingungen 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 Rückhaltestärke angesehen werden. Bei einem zu geringen Wert kann es zu Regelschwingungen 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 Rückhaltestärke angesehen werden. Bei einem zu geringen Wert kann es zu Regelschwingungen 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 gemütlicherer 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. Die einzelnen Modi können beliebig konfiguriert werden und auch im Nachhinein mittels des 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 (ein 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 vor allem viel flexibler als 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 drei unterschiedliche Datenpakete mit jeweils einem einzigartigen Identifier und sieben folgenden Parametern erstellt. Ein Parameter enthält immer vier Hexadezimalzahlen, also insgesamt zwei 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 zwei Fehler nach dem Fehler-Identifier (FFFF) gesendet, danach werden die fünf weiteren freien Plätze des Fehler-Datenpakets mit dem Fehler-Identifier aufgefüllt. Nachdem das Fehler-Datenpaket gesendet wurde, werden die ersten sieben Fehler vom Datenspeicher gelöscht, liegt der Fehler jedoch weiterhin vor, kann dieser auch nicht gelöscht werden. Hier werden die Datenpakete mit den zugehörigen Parametern 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 | Switch 5 | 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 Übertragungsrate beträgt 0,1 Sekunden, da jedoch der integrierte Logic-Controller eine sehr viel kürzere applikationsabhängige Taktzeit 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 im Internet auch sehr wenig hilfreiche Informationen zu finden waren, wurde keine alternative Realisierung mehr versucht. 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 wird, werden die Parameter für den ECO-Antriebsmodus an den Drehmomentergler weitergegeben. Bei der Auswahl des Sport-Antriebsmodus werden die Parameter für den Sport-Antriebsmodus an den Regler weitergegeben. Der Wechsel des Antriebsmodus bedeutet jedoch eine Veränderung kritischer Parameter, weshalb der KSI-Pin aus- und eingeschaltet werden muss, um die Änderung der Parameter wirksam zu machen. Ein Ausschalten des KSI-Pins führt nach 0,1 Sekunden zum sofortigen Einleiten des Bremsvorgangs, bis die Geschwindigkeit Null ist. Bei richtiger Konfiguration kann der KSI-Pin in dieser Zeit aus- und eingeschalten werden, um einen Wechsel des Antriebsmodus während des Fahrbetriebs wirksam zu machen. Aus sicherheitstechnischen Gründen kann der KSI-Schaltvorgang jedoch nur erfolgen, wenn der Gas-Eingang Null ist.

Wie im folgenden Programmausschnitt 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. Vor allem 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 ;15%
    Accel_Rate_TrqM = 2000 ;2s
    Accel_Release_Rate_TrqM = 1000 ;1s
    Brake_Rate_TrqM = 2000 ;2s
    Brake_Release_Rate_TrqM = 1000 ;1s
    Neutral_Braking_TrqM = 4915 ;15%
    Neutral_Taper_Speed_TrqM = 500 ;500rpm
    Forward_Full_Restraint_Speed_TrqM = 800 ;800rpm
    Back_Full_Restraint_Speed_TrqM = 800 ;800rpm
}
else if(Switch_5 = 1) ;Sport-Antriebsmodus
{
    Max_Speed_TrqM = 8000 ;8000rpm
    Kp_TrqM = 3277 ;40%
    Ki_TrqM = 400 ;40%
    Kd_TrqM = 819 ;10%
    Accel_Rate_TrqM = 1000 ;1s
    Accel_Release_Rate_TrqM = 400 ;0.4s
    Brake_Rate_TrqM = 1000 ;1s
    Brake_Release_Rate_TrqM = 400 ;0.4s
    Neutral_Braking_TrqM = 3276 ;10%
    Neutral_Taper_Speed_TrqM = 800 ;800rpm
    Forward_Full_Restraint_Speed_TrqM = 500 ;500rpm
    Back_Full_Restraint_Speed_TrqM = 500 ;500rpm
}
```

Abbildung VI.12: ECO/Sport-Select Programmierung

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 (beide Energierichtungen) 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.

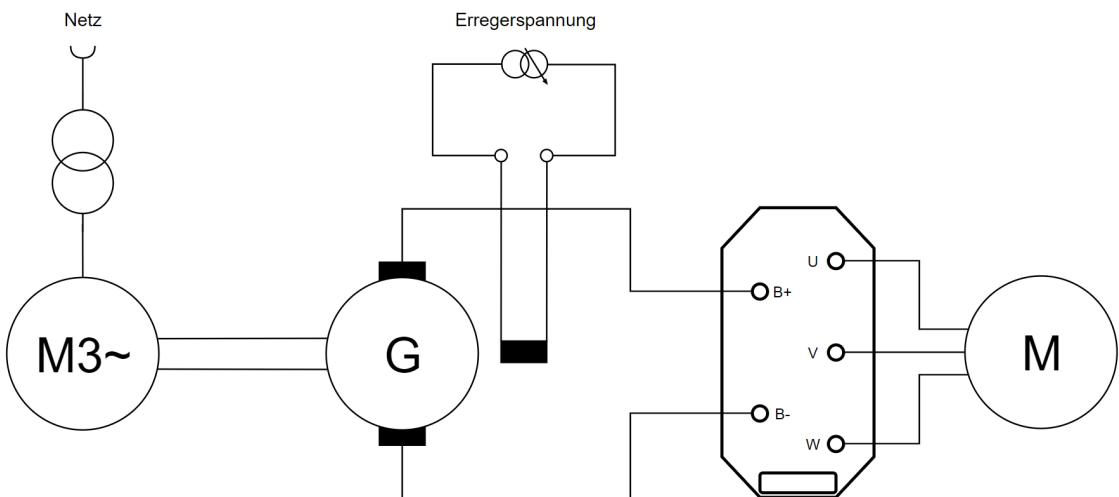


Abbildung VI.13: Leonardumformer Versuchsaufbau

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 Spannungspiegels 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.

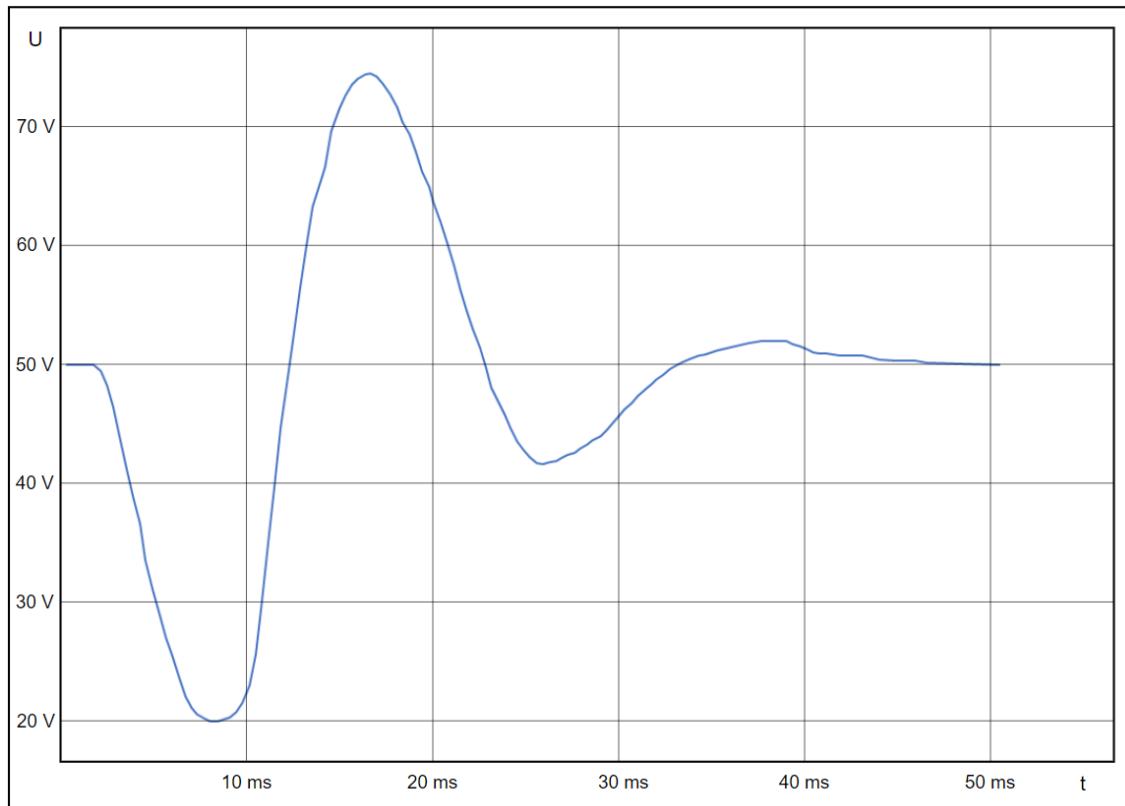


Abbildung VI.14: Leonardumformer Spannungsüberhöhung

4.2 Bleiakku-Versuchsaufbau

Grundidee:

Der Leonard-Veruchsaufbau 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 Bleiakkumulatoren 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 drei von vier 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 Bleiakkumulatoren hat vorübergehend ganz gut funktioniert. Ein Problem stellten vorerst aber die großen Einschaltströme dar, welche bei der Schließung des Stromkreises zu Ladestromstößen führten. Um Beschädigungen an den Kondensatoren zu verhindern, konnte dieses Problem jedoch durch Vorladen der Kondensatoren mithilfe eines 48V Netzgerätes (durch Verwendung der Strombegrenzung) behoben werden.

Erste Inbetriebnahme:

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

Abbildung VI.15: Bleiakku

Kapitel VII

Human-Computer Interaction System

1 Übersicht

Das Human-Computer Interaction System ist, wie der Name schon sagt, die Komponente, welche als Schnittstelle zwischen dem Nutzer und dem gesamten elektrischen System dient. Durch es sollte die fehlerfreie Nutzung der Funktionen des Motorrades gewährleistet sein. Ebenso sollte es wichtige Fahrdaten und andere Informationen speichern und dem User anzeigen können. Wichtig ist das System, trotz der großen Komplexität, so intuitiv und nutzerfreundlich wie möglich zu gestalten.

1.1 Grundfunktionen des Systems

Die geplanten Funktionen des HCIS¹ lassen sich grob in vier Grundfunktionen einteilen.

- **Steuerung der Peripherie**

Die Schalter und Buttons am Lenker, welche zuvor über den Kabelbaum die Leuchten, Blinker und die Hupe gesteuert haben, werden nun über die General-purpose input/output (GPIO) des Raspberry Pi Mikrocomputers gesteuert.

- **Graphische Benutzeroberfläche**

Dient der Anzeige wichtiger Fahr- und Ladedaten, welche entweder in Echtzeit oder über die Datenbankschnittstelle abgerufen und graphisch angezeigt werden können.

- **Kommunikation mit den Steuereinheiten des Motorrades**

Über CAN-Bus werden Daten von dem Batterie Management Systems (BMS) und der Curtis Motorsteuerung empfangen und an die Benutzeroberfläche zur Anzeige und an die Datenbankschnittstelle zur Langzeitsicherung der Fahrdaten weiter gegeben.

- **Speichern der relevanten Fahrdaten über die Datenbankschnittstelle**

Die über den CAN-Bus empfangenen Daten werden sofort an die Datenbankschnittstelle (Handler) weitergegeben um die Daten für Datenauswertung und Testberichte zu speichern. Ebenso bezieht das Diagnosesystem der Benutzeroberfläche die Daten über diese Schnittstelle.

¹ Abkürzung: Human-Computer Interaction System

1.2 Steuereinheit

Als Basis zur Auswahl der Steuereinheit wurden die zuvor erläuterten Grundfunktionen herangezogen genommen. Die Ausgewählte Steuereinheit sollte diese erfüllen können und ebenso Potential zur Erweiterung der Funktionen bieten. Genauso wichtig war das eine große Flexibilität und Individualität erreicht werden kann, um nicht in der Umsetzung unserer Ideen eingeschränkt zu sein. Zur Auswahl standen verschiedene Speicherprogrammierbare Steuerungen und Mikrocomputer, doch letzten Endes überzeugte der Mikrocomputer Raspberry Pi.

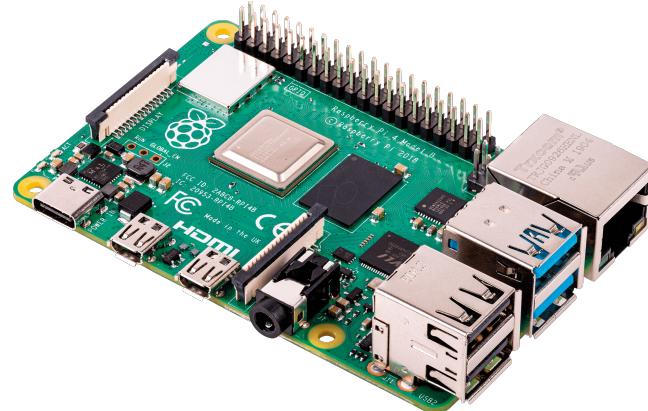


Abbildung VII.1: Raspberry Pi - Steuereinheit des HCIS

1.3 Grundaufbau des Systems

In der Abbildung ?? wird der Grundaufbau des Systems und die Datenverbindungen der folgenden Komponenten veranschaulicht.

- Raspberry Pi - Die Steuereinheit des Systems.
Kommuniziert über CAN-Bus mit den anderen Steuerkomponenten des Motorrades.
- User Input - Die vorhandenen Schalter am Lenker des Motorrads werden direkt mit den Eingängen des Raspberry Pis verbunden.
- Peripherie - Die Grundkomponenten des Motorrades wie Scheinwerfer oder Hupe. Diese werden über Relais, welche an die Ausgänge des Raspberry Pis angeschlossen sind, gesteuert.
- Dashboard - Der Bildschirm zur Anzeige der verarbeiteten Informationen. Dieser wird über HDMI und USB mit dem Raspberry Pi verbunden.

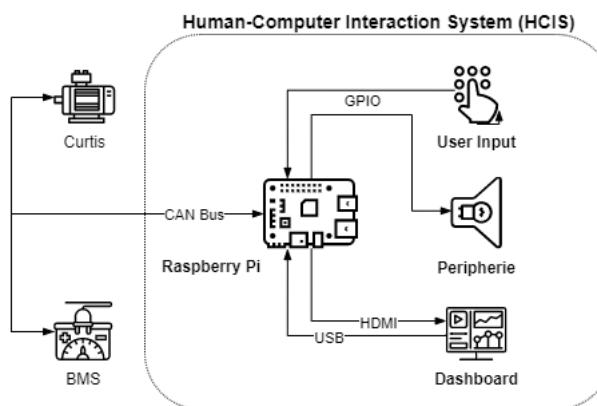


Abbildung VII.2: Grundaufbau des Human-Computer Interaction Systems

Nicht in der Abbildung dargestellt ist die Versorgung der einzelnen Komponenten, welche in dem folgenden Abschnitt noch genauer erläutert wird.

2 Spannungsversorgung

2.1 Aufbau des Versorgungssystems

Das Versorgungssystem des Motorrades besteht aus zwei Spannungsebenen: Einer 12V Ebene zur Versorgung der Peripherie des Motorrades und einer 5V Ebene, welche nur den Raspberry Pi und seine Komponenten beinhaltet. Diese Ebenen werden durch DC-DC Wandler erzeugt, welche direkt an den Akku des Motorrades angeschlossen werden.

Wichtig hierbei ist, dass alle ausgewählten Spannungswandler über einen Kurzschluss- und Überstrom-Schutz verfügen. Dies macht es uns möglich diese Versorgungssysteme, solange die Drähte auch nach dem maximalen Strom der Spannungswandler dimensioniert wurden, ohne jegliche Leistungs- und Überstrom-Schutzorgane aufzubauen. Die Spannungswandler schalten bei jeglichen Fehlern ab und verbrennen die überschüssige Leistung über einen eingebauten Widerstand. Sobald der Fehler behoben wurde, schalten sich die Spannungswandler automatisch wieder ein.

2.1.1 12V Versorgungssystem

Um den Spannungswandler dimensionieren zu können mussten vorher alle Bauteile, welche über die 12V versorgt werden sollten, zusammengefasst werden, um die mindestens benötigte Leistung des Spannungswandlers zu errechnen.

| Bauteilbezeichnung | Spannung | Leistung |
|------------------------|------------|-------------|
| Tagfahrlicht | 12V | 10W |
| Abblendlicht | 12V | 10W |
| Aufblendlicht | 12V | 20W |
| Hupe | 12V | 10W |
| Rücklicht | 12V | 21W |
| Kennzeichenbeleuchtung | 12V | 5W |
| Blinker links | 12V | 2 x 10W |
| Blinker rechts | 12V | 2 x 10W |
| Bildschirm | 12V | 12W |
| Gesamt | 12V | 128W |

Tabelle VII.1: Berechnung der Leistung des 12V-Systems

Der Spannungswandler wurde nun nach der größt möglichen Leistung, welche auftritt wenn alle Bauteile gleichzeitig auf Höchstleistung betrieben werden, ausgelegt. Diese maximale Leistung beträgt, wie in der Tabelle ?? zu sehen, 128 Watt. Um noch Ausbaumöglichkeiten zu gewährleisten und uns nicht dem Leistungslimit des Wandlers zu nähern, haben wir uns für einen 48V-12V, 300 Watt DC-DC Wandler von Mean Well² entschieden.

2.1.2 5V Versorgungssystem

Die Leistung des Raspberry Pis ist mit einem Maximum von 6.2 Watt sehr klein und daher ist die Wahl des Spannungswandlers in diesem Fall nicht wirklich davon abhängig. Auch die Komponenten, welche angeschlossen werden, haben grundsätzlich keine erwähnenswerte Wirkleistung und müssen daher nicht genau berechnet werden. Nun entschied nur mehr das Preis-Leistungs-Verhältnis sowie die Ausfallsicherheit des Spannungswandlers die Wahl. Daher haben wir uns für einen 48V-5V, 30 Watt DC-DC Wandler von Meanwell³ entschieden.

2.1.3 Abschalten der Spannungswandler

Das Abschalten der Spannungswandler ist nicht notwendig, da diese - wie schon in Abschnitt ?? erklärt - bei einem anliegenden Fehler automatisch abschalten. Ebenso wird beim Abschalten des Motorrades über die BMS jegliches andere Bauteil von der Spannungsversorgung getrennt. Was die Spannungswandler vom Entladen des Akkus abhält.

²Datenblatt: siehe Anhang ??

³Datenblatt: siehe Anhang ??

3 Steuerung der Peripherie

Die Grundfunktionen wie Beleuchtung, Hupe und Blinker werden hier als Peripherie bezeichnet. Diese sollten so einfach wie möglich und vom Lenker aus zu bedienen sein. Ebenso müssen sie verlässlich gesteuert werden können. Daher haben wir uns entschieden diese Funktionen ebenso über den Raspberry Pi zu steuern, da dieser bei einem Fehler der Motorsteuerung über den eingebauten Puffer gespeist werden kann und daher diese wichtigen Funktionen bis zu einem sicheren Stillstand weiter betrieben und gesteuert werden können.

Dennoch ist in der Plan in Zukunft die Motorsteuerung, welche ebenso in der Lage wäre die Ausgänge abhängig von den Eingängen zu schalten, diese Aufgabe übernehmen zu lassen, solange die Ausfallsicherheit ebenso gegeben wäre. Der Vorteil dieser Methode ist die Schaffung einer Zentralen Steuereinheit, welche alle Steueraufgaben in einem Bauteil vereinen kann.

3.1 Hardware

3.1.1 Input

Man kann einen GPIO Pin entweder als Eingang oder als Ausgang betreiben. Als Eingang kann er die Zustände High und Low einnehmen. Zum Beispiel von einem Schalter oder Taster. In der Regel beschaltet man die GPIOs des Raspberry Pis mit Widerständen, um Eingänge auf einen definierten Pegel zu setzen oder um den Strom zu begrenzen. Standardmäßig werden 10k Widerstände benutzt. Ob Pullup oder Pulldown ist grundsätzlich gleichgültig. Wir benutzen für das Einlesen der Eingänge 10k Pulldown Widerstände, um nicht immer eine Spannung an den Eingängen des Raspberry Pis anliegen zu haben.

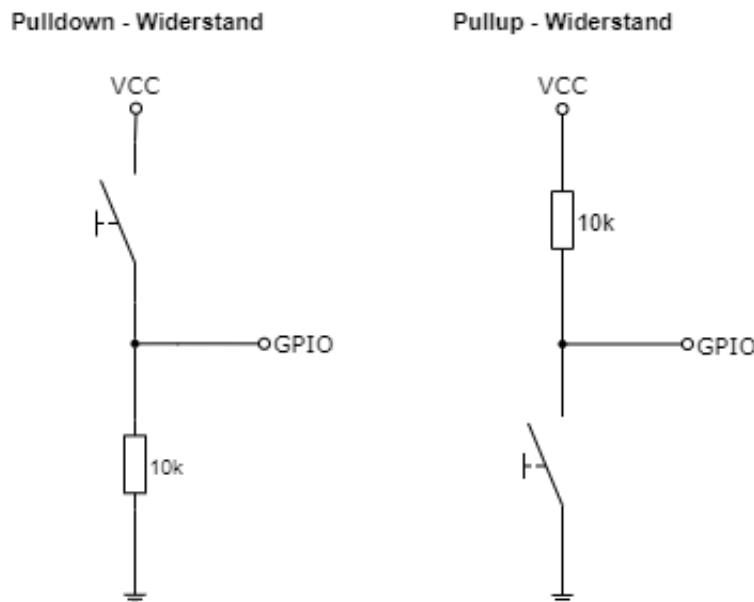


Abbildung VII.3: Anschlussplan Eingänge

Pullup Widerstand

Bei dem Nutzen eines Pullup Widerstands wird der GPIO Pin mit einem Widerstand auf die Spannung von VCC gezogen. Der Grundzustand des Eingangs ist dann High. Mit einem Schalter oder Taster wird der Eingang dann gegen Ground gezogen. Das heißt er hat solange der Schalter geschlossen ist, liegt das Massepotential am Eingang an.

Pulldown Widerstand

Bei dem Nutzen eines Pulldown Widerstands wird der GPIO Pin mit einem Widerstand auf die Spannung von Ground gezogen. Der Grundzustand des Eingangs ist dann Low. Mit einem Schalter oder Taster wird der Eingang dann gegen VCC gezogen. Das heißt er hat solange der Schalter geschlossen ist, liegt das Versorgungspotential am Eingang an.

3.1.2 Output

Hierbei werden die GPIOs als Ausgang verwendet. Sie sind verbunden mit den Eingängen eines 4 Channel Relais Moduls, welches über die 5V direkt von dem Raspberry Pi gespeist wird. Hiermit ist es nun möglich die 12V der Peripherie zu schalten und

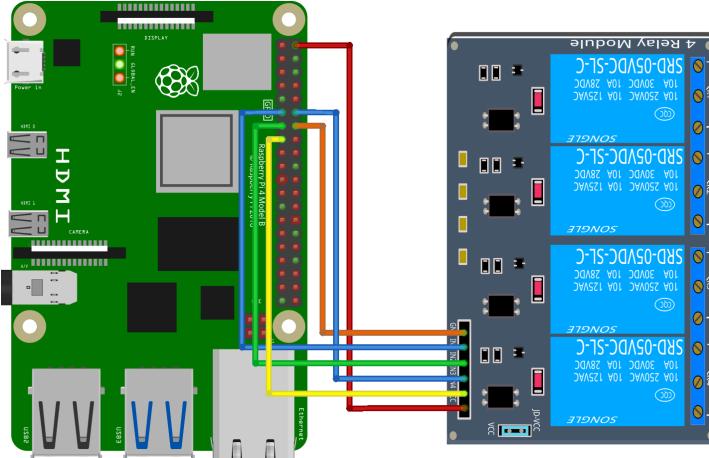


Abbildung VII.4: Anschlussplan Relais

3.2 Software

Wichtig bei der Programmierung war in diesem Fall die dauerhafte Verfügbarkeit der Grundfunktionen sowie die einfache Integrierbarkeit von alten und neuen Bauteilen. Dies wurde erreicht durch die Anwendung verschiedener Bibliotheken.

Die Wichtigsten in dieser Anwendung waren:

3.2.1 gpiozero

Eine Bibliothek, welche das einfache und schnelle Integrieren neuer Ein- oder Ausgänge ermöglicht. Dadurch können schnell und einfach Änderungen an dem Steuerverhalten der Peripherie gemacht werden. Hierzu kann die Klasse Button und DigitalOutputDevice verwendet werden. Dieser können Parameter wie die gewünschte Debounce Zeit und verwendete Pull-Widerstände übergeben werden. Es werden nur drei Zeilen Code benötigt um einen Aus- oder Eingang zu definieren und anzusteuern ⁴

3.2.2 threading

Eine Bibliothek, welche es ermöglicht, einen eigenen Thread ⁵ für das Programm zu öffnen, wodurch die Anwendung ohne Einflüsse oder Unterbrechungen anderer Programme weiter arbeiten kann. Der folgende Programmcode zeigt einen Ausschnitt der Klasse zum Steuern der GPIOs.

```
def start(self):
    self.thread=Thread(target=self.runner)
    self.thread.daemon=True
    self.thread.start()
```

Code Listing VII.1: Code zum Starten eines Threads

In diesem Beispiel wird ein Demon Thread erzeugt und gestartet. Das bedeutet dieser Thread wird beim schließen des Programms automatisch mit geschlossen und muss dadurch nicht mehr überwacht werden. Das Target ist die Funktion, welche unabhängig ausgeführt werden soll.

⁴siehe: Anhang

⁵gleichzeitig laufende Aufgabe

4 Benutzeroberfläche

Die Benutzeroberfläche stellt die Verbindung zwischen dem Nutzer und dem Motorrad dar. Sie sollte während der Fahrt die Instrumententafel des Motorrades ersetzen und dem Nutzer die wichtigsten Fahrinformationen anzeigen. Sobald das Motorrad zum Stillstand gekommen ist, wird es möglich Einstellungen zu ändern und die aufgezeichneten Fahrdaten anzeigen zu lassen. Ebenso können der Akkuladestatus und Informationen über Fehler im System entnommen werden.

4.1 Hardware

Zur Anzeige und Bedienung wird ein 11.6 Zoll kapazitives Touch LCD Display verwendet. Es besitzt eine Full HD Auflösung (1920x1080), was für eine professionelle Darstellung essentiell ist. Ebenso hat es ein schützendes ABS Gehäuse, welches trotz fehlender IP Zertifizierung das Abdichten ermöglicht. Die Versorgungsspannung beträgt 12V, was ident zu den anderen Komponenten am Motorrad ist und daher die Versorgung sehr vereinfacht, es kann also über den gleichen Spannungswandler versorgt werden.



Abbildung VII.5: Paneel Maße

Die Auflösung und die Größe des Paneels wirkt sich stark auf das Design der Benutzeroberfläche aus. Es muss die Größe der Icons und der anderen Designelemente so angepasst werden, dass sie einerseits gut ersichtlich und andererseits einfach über Berührung zu bedienen sind.

4.1.1 Befestigung

Besser: In das Gehäuse des Paneels sind M4 Verschraubungen in einem Raster von 75mm x 75mm integriert und kann daher einfach an Wänden oder Platten verschraubt werden. Um den Bildschirm nun in einer ähnlichen Position wie die Instrumententafel zu befestigen wurde eine 100mm x 210mm x 1.5mm Aluminium Platte - wie in der Abbildung zu sehen - gebogen und mit Löchern versehen. Um diese Halterung nun an dem Motorrad zu befestigen werden die Verschraubungen der alten Instrumententafel verwendet.



Abbildung VII.6: Befestigung des Displays

4.2 Software

Bevor die Software für die Benutzeroberfläche verfasst wurde, mussten das Design, die Funktionen sowie die angezeigten Informationen geplant werden, um einen reibungslosen Arbeitsablauf beim Entwickeln des Frontends zu gewährleisten. Design Elemente wurden zuvor in Adobe Illustrator vorgefertigt. In den folgenden Seiten wird das Ergebnis dieses Prozesses erläutert.

4.2.1 Aufbau

Die nachfolgende Abbildung zeigt den grundsätzlichen Programmaufbau der Benutzeroberfläche. Die einzelnen Fenster werden als Tabelle mit ihren angezeigten Informationen dargestellt. Dies ist wichtig da jede dieser Informationen vom Backend an das Frontend gesendet werden müssen. Ebenso sind in den letzten Zeilen der Tabellen die QML-Elemente zur Navigation zwischen den einzelnen Fenstern niedergeschrieben. Diese müssen auch schon in der frühen Phase der Entwicklung der Benutzeroberfläche definiert werden.

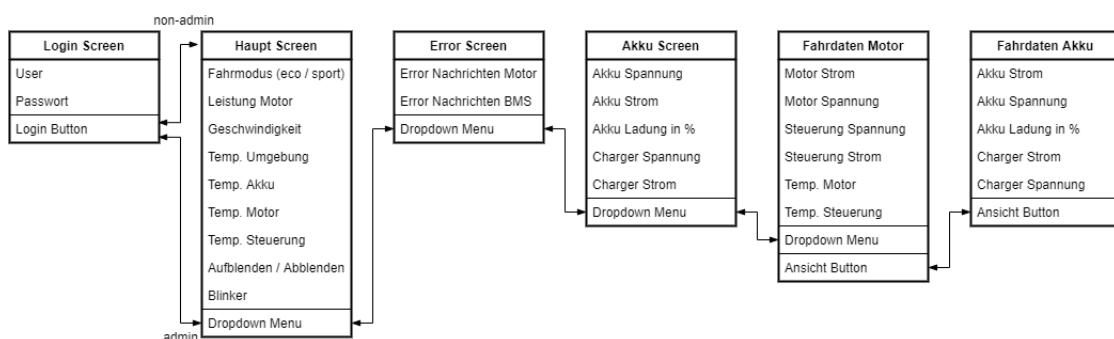


Abbildung VII.7: Aufbau der Graphischen Benutzeroberfläche

4.2.2 Nutzer / Berechtigungen

4.3 Komponenten

Komponenten sind wiederverwendbare, gekapselte QML-Elemente mit genau definierten Schnittstellen. Komponenten werden häufig durch Komponenten-Dateien definiert, das heißt durch QML-Dateien. Wichtig ist dabei die Definition von Schnittstellen sowie Properties und Signals.

Properties

Einer Property eines Objektes kann ein statischer Wert zugewiesen werden, der konstant bleibt, bis ihm explizit ein neuer Wert zugewiesen wird. Um QML und seine integrierte Unterstützung für dynamisches Objektverhalten optimal zu nutzen, verwenden die meisten QML-Objekte jedoch Propertiesbindings.

Dies sind eine Kernfunktion von QML, mit der Beziehungen zwischen verschiedenen Objekteigenschaften festgelegt werden können. Wenn sich die Abhängigkeiten einer Property im Wert ändern, wird die Eigenschaft automatisch gemäß der angegebenen Beziehung aktualisiert. Hinter den Kulissen überwacht die QML-Engine die Abhängigkeiten der Eigenschaft. Wenn eine Änderung erkannt wird, wertet die QML-Engine den Bindungsausdruck erneut aus und wendet das neue Ergebnis auf die Eigenschaft an.

Java-Script-Funktionen

Programmlogik kann auch in Java-Script-Funktionen definiert werden. Diese können in QML-Dokumenten definiert und von Signalhandlern, Eigenschaftsbindungen oder Funktionen in anderen QML-Objekten aufgerufen werden. Solche Methoden werden häufig als Inline-Java-Script-Funktionen bezeichnet, da ihre Implementierung im QML-Dokument statt in einer externen Java-Script-Datei enthalten ist.

4.3.1 Navigationsmenü

Das Navigations-Menü ist ein Dropdown-Menü, welches zur Navigation zwischen den verschiedenen Fenstern benutzt wird. Sobald man sich eingeloggt hat wird das Menü angezeigt und die einzelnen UnterMenüs können aufgerufen werden. Das Menü wird abhängig von den Berechtigungen des Benutzers angepasst.



Abbildung VII.8: GUI Komponente - Navigation Menü

Buttons

Die Navigation wird über das QML-Element *Mousearea*, welche direkt über den Icons der einzelnen Navigationselemente platziert wurde, gesteuert. Nun kann mit dem Befehl *onClicked* eine Funktion aufgerufen werden, welche das gewünschte Fenster sichtbar macht, sowie das Navigationsmenü wieder nach oben fahren lässt.

In dieser Funktion wird ebenso die Berechtigung des Nutzers über eine Globale Variable, welche beim Anmelden durch ein Signal gesetzt wird, abgefragt. Falls die Berechtigung die ausgewählte Funktion nicht zulässt wird ein Informationstext ausgegeben und das Menü wiederum geschlossen.

Abmelden

Wird der Abmeldebutton gedrückt, werden die Anmeldeinformationen zurückgesetzt und dem Nutzer wird wieder das Anmeldefenster angezeigt, wo er sich nun mit anderen Anmelde-Informationen einloggen kann.

4.3.2 Balken Anzeige

Die Komponente Balken Anzeige wird in der Benutzeroberfläche zur Visualisierung verschiedener Daten verwendet. Mit ihr können diese übersichtlicher dargestellt werden. Diese Komponente wird in mehreren QML-Dateien verwendet, daher sind Properties zur Anpassung notwendig. Die wichtigsten davon sind:

- Wert - Der aktuelle Wert, welcher am Balken angezeigt werden sollte.
- Anfangswinkel - Der Winkel an dem der Balken entspringt.
- maximaler Wert - Der maximal zu erreichende Wert. Dieser bestimmt die Länge des Hintergrundbalkens
- Hintergrundfarbe - Farbe des Hintergrundbalkens (in der Abbildung grau)
- Balkenfarbe - Farbe des Anzeigebalkens (in der Abbildung blau)

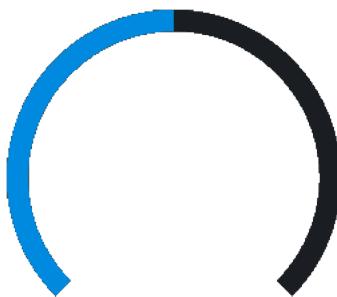


Abbildung VII.9: GUI Komponente - Balken Anzeige

Über ein *Signal* kann nun über das Backend der Wert des Balkens verändert werden und in Echtzeit angezeigt werden.

4.3.3 Modus Anzeige

Diese Komponente befindet sich auf der Instrumententafel. Der Modus kann über einen Button am Lenker, welcher mit der Curtis Steuerung verbunden ist, geändert werden. Sie dient zum Anzeigen der derzeitig gewählten Fahrmodi und wird über ein *Signal* aus dem Backend gesteuert, welches mit der Listener Klasse verbunden ist.



Abbildung VII.10: GUI Komponente - Modus Anzeige

Die Modus Anzeige ist eine einfache Komponente. Sie ist ein Item QML-Typ, dadurch wird das Nutzen von *States* möglich. Durch diese können verschiedene Eigenschaften gespeichert und über einen kurzen Befehl wiederhergestellt werden.

In diesem Fall wird der Punkt ausgefüllt und die Farbe des Textes geändert.

4.3.4 Graph

Die Graph Komponente befindet sich auf dem Diagnose Fenster und dient zum Anzeigen der in der Datenbank gespeicherten Fahrdaten. Sie verfügt über einen Ladebalken, welcher nach dem Auswählen der anzuseigenden Daten den Fortschritt des Auslesens der Datenbank anzeigt. Dieses Auslesen läuft über eine Funktion der Fetcher Klasse.

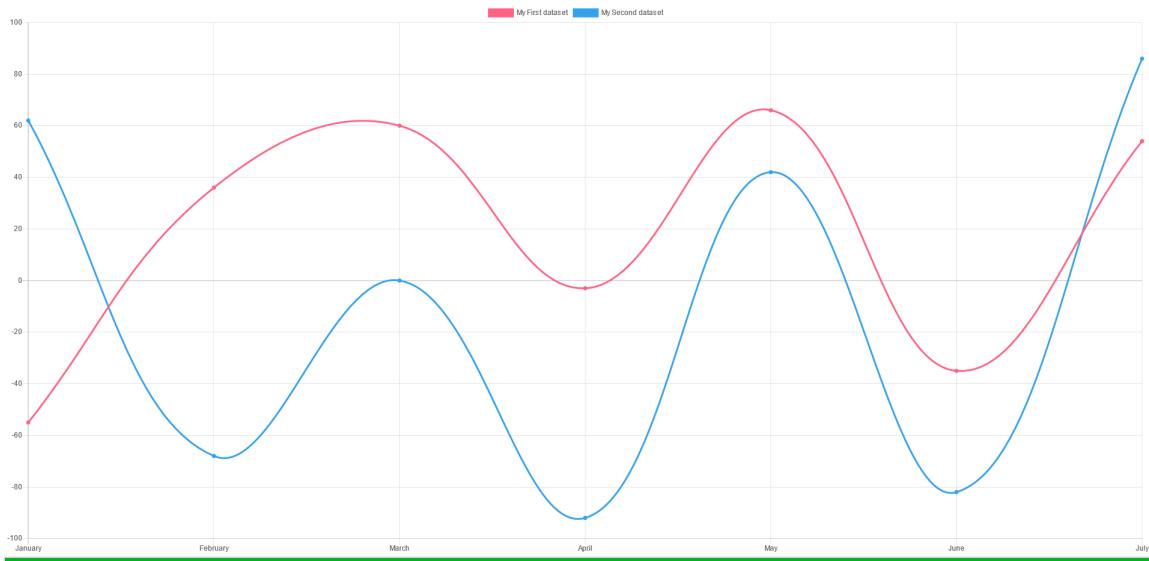


Abbildung VII.11: GUI Komponente - Graph

Realisiert wurde diese Komponente über öffentliche Bibliothek *Charts.js* (Referenz), welche durch die Java Script Unterstützung von *QT*, mit der Installation eines Adapters mit dem QML Programm kompatibel ist. Dadurch wird nun das Zeichnen von verschiedenen Graphen ermöglicht.

4.3.5 Weitere Komponenten

Wie schon bei der Fahr Modi Komponente, wurden weitere Objekte, welche zwischen zwei Zuständen hin und her gestalten werden müssen oder eine bestimmte Handlung ausführen sollten, über eine eigene QML Komponente verwirklicht. Diese ermöglicht nun wiederum das wiederholte verwenden dieser Komponente, sowie das Ansteuern über *States* und *Signale*. Diese Komponenten sind:

Umschaltkomponenten

Dies sind Komponenten, welche über ein *Signal* angesteuert werden und dann mithilfe von *States* ihr Aussehen verändern.

- Blinker Rechts
- Blinker Links
- Tagfahrlicht
- Fernlicht

Touch Komponenten

Dies sind Komponenten, welche eine *Mousearea* mit einer Graphik verbindet. Wird diese Komponente nun mit einem Mausklick ausgewählt, kann eine Funktion ausgeführt oder ein *Signal* ausgesendet werden.

- Abmeldebutton
- Navigationsmenübuttons
- Menü-Öffnen-Button

4.4 Programm Fenster

4.4.1 Login

Das Login Fenster dient zur Autorisierung des Benutzers. Über die User Kombobox kann der gewünschte Nutzer mit der dazugehörigen Berechtigung ausgewählt werden (siehe Abschnitt). Das Fenster dient ebenso zur Darstellung der Logos unserer Sponsoren



Abbildung VII.12: GUI Fenster - Login Menü

Um sich einzuloggen muss nur mehr das Passwort im *Textfeld* darunter eingegeben werden. Nach dem Drücken des Login Pfeiles (Neben dem Passwort Textfeld) werden die Login Daten an das Backend versendet. Diese vergleicht die Daten über die Datenbankschnittstelle⁶ und loggt, insofern das richtige Passwort gegeben ist, den Benutzer ein. Wird jedoch das Passwort falsch eingegeben, wird eine rote Fehlermeldung angezeigt.

4.4.2 Fahrdaten

Dieses Fenster dient als Ersatz für die Instrumententafel des Motorrades. Es ist daher das einzige während der Fahrt ersichtliche Fenster. Es Zeigt alle wichtigen Fahrdaten wie Leistung, Geschwindigkeit und Akkuladestand, sowie den Aktuellen Fahrmodus an. Diese Anzeige kann jedem Nutzer, unabhängig der Berechtigung, angezeigt werden.

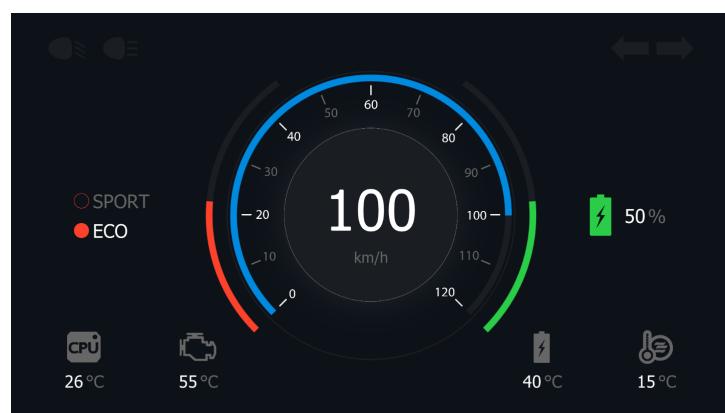


Abbildung VII.13: GUI Fenster - Fahrdaten

Der Status der Blinker und der Beleuchtung wird ebenso wie die Temperaturen der verschiedenen Komponenten des Motorrades angezeigt. Derzeit ist diese Ansicht starr und kann noch nicht geändert werden. Doch es ist geplant in Zukunft weitere Designs, welche in den Einstellungen geändert werden können, zu implementieren.

⁶siehe Abschnitt

4.4.3 Akku- und Ladedaten

Dieses Fenster dient Ähnlich wie das der Fahrdaten zur Darstellung wichtiger Daten. Es können alle wichtigen Daten bezüglich Akku und BMS auf einem Blick abgelesen werden.

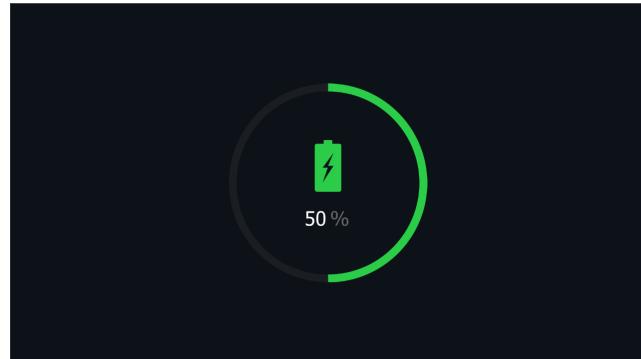


Abbildung VII.14: GUI Fenster - Akkudaten

Dieses Fenster wird Standardmäßig während dem Laden des Fahrzeuges angezeigt. Es benötigt also keine bestimmte Berechtigung und kann von jedem Nutzer über das Navigations-Menü angezeigt werden.

4.4.4 Fahrdaten Diagnose

Hier können die Fahrdaten, welche während der Fahrt dauerhaft von der Motorsteuerung versendet und vom Raspberry Pi verarbeitet und in einer Datenbank gespeichert werden, in Graphen angezeigt werden. Hierzu wird die *Graph Komponente*⁷ verwendet.

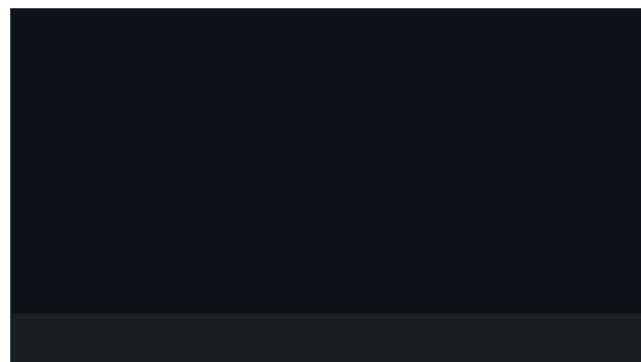


Abbildung VII.15: GUI Fenster - Fahrdaten Diagnose

Diese wird, um während der Fahrt die volle Prozessorleistung zu gewährleisten, erst auf Knopfdruck geladen. In der Menüleiste am unteren Ende des Fensters können verschiedene Vorlagen ausgewählt werden, welche über fixe Datensätze verfügen. Das bedeutet es werden erst beim Auswählen des anzuseigenden Datensatzes die Daten der letzten Stunde ausgelesen und in den Graphen geladen.

⁷siehe Abschnitt ??

4.4.5 Fehler

Sobald ein Fehlerdatenpaket über den CAN-Bus versendet wird, gibt der Listener Klasse die Fehlercodes an die Bridge Klasse weiter, um sie in diesem Fenster anzuzeigen. In einer *Listview* werden nun die Aktiven Fehler angezeigt. Solange Fehler anliegen werden diese angezeigt und erst sobald die zuvor angezeigten Fehler nicht mehr anliegen werden diese aus der Liste gelöscht.

| FEHLER NR. | NAME | BESCHREIBUNG |
|------------|------|--------------|
| | | |

Abbildung VII.16: GUI Fenster - Fehler Liste

Der Name und die Beschreibung der Fehler, wird über eine Fehlertabelle⁸ in der Datenbank ausgelesen. Diese werden während dem Testen des Motorrades gesammelt und häufig auftretende Fehler werden in diese Tabelle eingetragen.

4.4.6 Nutzer und Berechtigungen

Um sicherzustellen das das Nutzen der Benutzeroberfläche nicht für jeden uneingeschränkt möglich ist wurde ein Anmeldesystem mit drei verschiedenen Benutzern, welche jeweils verschiedene Berechtigungen besitzen, umgesetzt.

ADMIN - Passwort: 53AC2

Dieser Benutzer verfügt über uneingeschränkte Rechte und kann auf jede verfügbare Funktion sowie Funktionen, welche noch in Entwicklung sind zugreifen.

USER - Passwort: 5AHET

Dieser Benutzer verfügt über wenig eingeschränkte Rechte. Er kann auf jede fertig entwickelte Funktion zugreifen kann jedoch keine Änderungen an der Benutzeroberfläche vornehmen und hat ebenso keinen Zugriff auf experimentelle Funktionen.

GUEST - Passwort: 00000

Dieser Benutzer verfügt nur über sehr eingeschränkte Rechte. Er wird zum Präsentieren der Maschine benutzt und lässt den unerfahrenen Nutzer nur auf die Fahrdaten und Akku- und Ladedaten zugreifen. Ebenso sollte in Zukunft die Leistung des Motorrades beim einloggen dieses Benutzers stark eingeschränkt werden, um Unfälle zu verhindern.

⁸siehe Abschnitt

4.5 Realisierung der Benutzeroberfächer

4.5.1 QML

QML⁹ ist eine deklarative Sprache, mit der Benutzeroberflächen anhand ihrer visuellen Komponenten und ihrer Interaktion und Beziehung zueinander beschrieben werden können. Es ist eine gut lesbare Sprache, die entwickelt wurde, um die dynamische Verbindung von Komponenten zu ermöglichen und die einfache Wiederverwendung und Anpassung von Komponenten innerhalb einer Benutzeroberfläche erlaubt. Es bietet Syntax mit Unterstützung für Java-Script-Ausdrücke in Kombination mit dynamischen Eigenschaftsverbindungen.

4.5.2 Qt-Quick

Das Qt-Quick-Modul ist die Standardbibliothek zum schreiben von QML-Anwendungen. Während das QML-Modul die Engine und die Sprachinfrastruktur bereitstellt, bietet das Qt Quick-Modul alle grundlegenden Typen, die zum Erstellen von Benutzeroberflächen mit QML erforderlich sind. Es bietet eine visuelle Zeichenfläche und Typen zum Erstellen und Animieren visueller Komponenten, zum Empfangen von Benutzereingaben, zum Erstellen von Datenmodellen und Ansichten sowie zum verzögerten Objektinstanziieren. Es können problemlos flüssige, animierte Benutzeroberflächen in QML erstellt werden. Diese Benutzeroberflächen können mit beliebigen Backend Bibliotheken verbunden werden.

4.5.3 Slots und Signals

Slots und Signals werden in QML zur ereignisgesteuerten Kommunikation zwischen Frontend und Backend verwendet. In der folgenden Illustration wird diese anhand eines einfachen Beispiels erklärt.

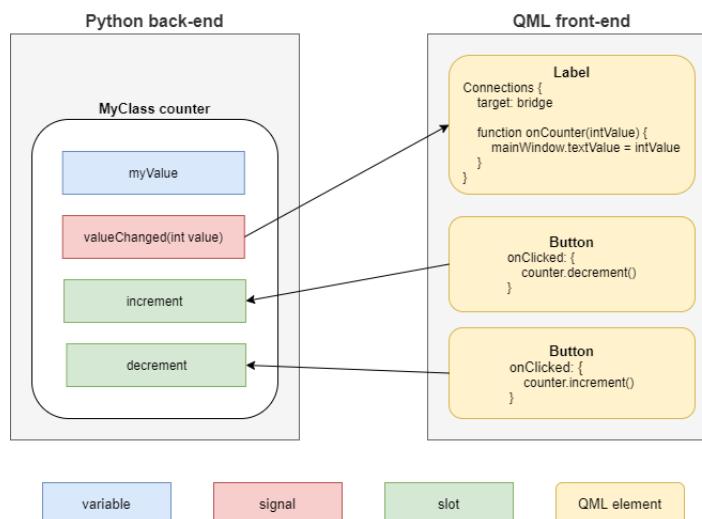


Abbildung VII.17: Slots und Signals Konzept

Signale

Diese können als Mitteilungen angesehen werden, welche über das Aufrufen der `signal.emit()` Funktion vom Backend an das Frontend gesendet wird. Im Frontend wird wiederum eine eigens definierte Funktion benötigt um dem Wert einem Property eines QML Elements zuzuweisen.

Slots

Slots sind Call-Back Funktionen, welche im Backend definiert werden und sind über die Bridge Klasse mit dem Frontend verknüpft. Dadurch können diese Funktionen im Frontend aufgerufen und mit Signalen verbunden werden. Sie stellen daher die wichtigste Verbindung zwischen dem Programm und der Benutzeroberfläche dar.

⁹Qt Modeling Language

4.5.4 Bridge

Die Bridge Klasse wird für die Kommunikation zwischen den einzelnen Modulen des Backends mit denen der graphischen Benutzeroberfläche.

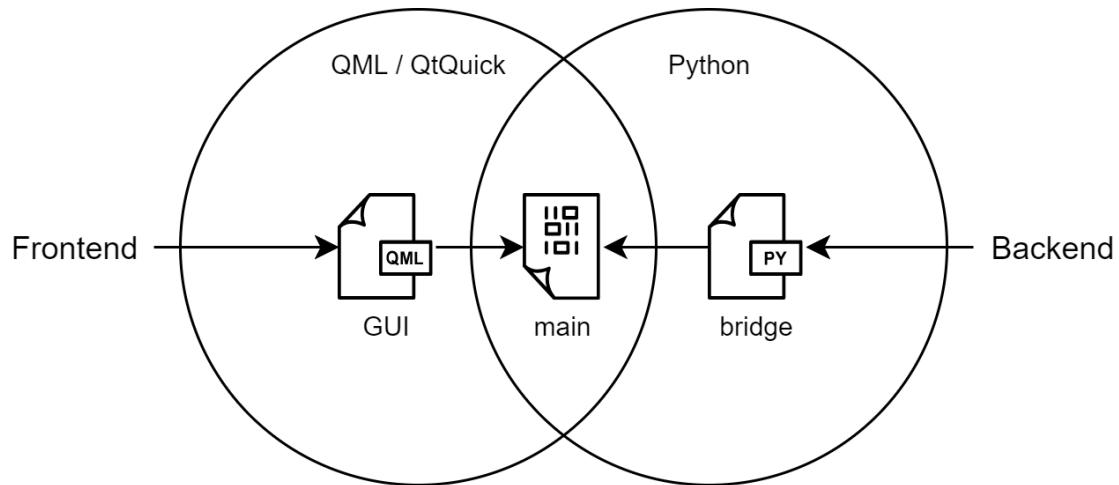


Abbildung VII.18: Verbindung Frontend zu Backend

5 Kommunikation

Um Daten zwischen den mehreren Steuereinheiten des Motorrades zu versenden, muss eine Echtzeit-Kommunikation über ein Bussystem gewährleistet werden. Die Entscheidung ist auf das Controller Area Network Bussystem (CAN-Bus) gefallen. Ausschlaggebend für diese Entscheidung war der Curtis Motorcontroller, dieser verfügt über eine serielle Schnittstelle (RS-232) sowie ein CAN-System. Für unserer Anwendung bietet das CAN-System eine größere Ausbaufähigkeit sowie größere Übertragungsraten, weshalb wir uns letztendlich auch dafür entschieden haben.

5.1 Hardware

5.1.1 CAN-Modul

Da der Raspberry Pi selbst nicht über ein CAN-System verfügt, erfolgt der Anschluss an die Busleitung über ein externes CAN-Modul, welches über das Serial Peripheral Interface (SPI) mit dem Raspberry Pi kommuniziert, welches wie folgt angeschlossen werden muss:

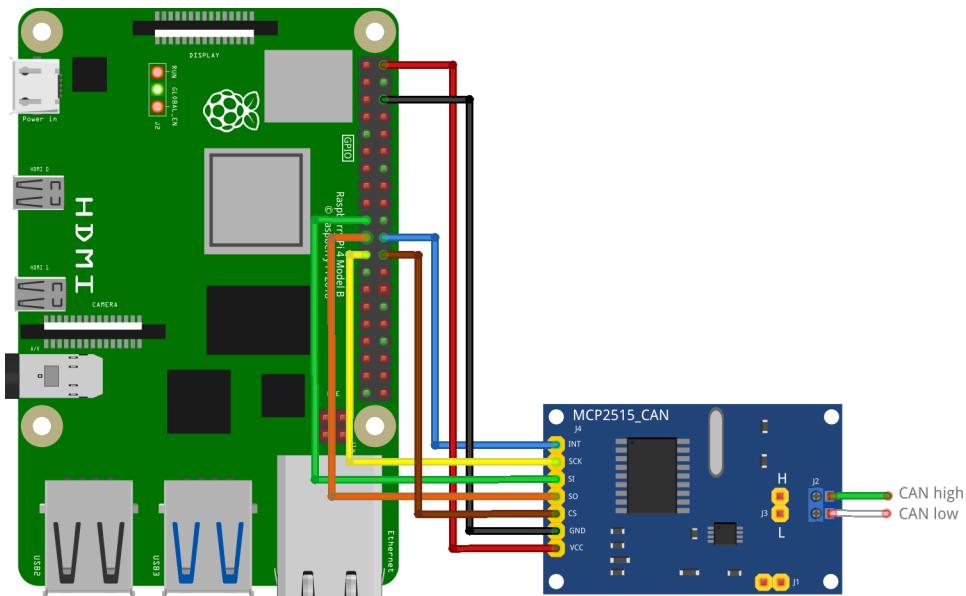


Abbildung VII.19: Anschlussplan CAN-Modul

Die Kommunikation wird über zwei Komponenten ermöglicht. Einen MCP2562 Transceiver, welcher für die Verarbeitung der Nachrichten zuständig ist und ein MCP2515 CAN Interface, welches die Daten zwischenspeichert und sich um das Versenden der Nachrichten kümmert. Gemeinsam mit dem Mikrocomputer ergibt dies nun einen CAN Node, welcher fähig ist Nachrichten zu versenden und zu empfangen.

5.1.2 Netzwerkstruktur

Ein CAN-Netzwerk wird standardmäßig als Bus- oder Sternkopplung aufgebaut. Wir haben uns bewusst für die Bustopologie entschieden, da Sternkopplungen nur in bestimmten Anwendungen Gebrauch finden und noch dazu markante Nachteile besitzt.

Es müsste zum Beispiel eine zentrale Steuereinheit den Nachrichtenverkehr steuern, ebenso gibt uns die niedrige Anzahl an Teilnehmern im Netzwerk nicht einmal die Möglichkeit ein anderes System zu verwenden. Erst wenn wir in Zukunft das CAN-Netzwerk um Sensoren und Aktoren erweitern würden, müsste weitere Zeit in die Planung des Netzwerks investiert werden.

5.2 Listener

Die Listener Klasse ist dafür zuständig den Datenverkehr am Bus zu überwachen und geordnet an die Datenbankschnittstelle¹⁰ sowie die Schnittstelle zum Frontend (Bridge) weiterzugeben.

5.2.1 Konfigurieren der Schnittstelle

Code Listing VII.2: Konfigurieren des CAN Adapters

5.2.2 Empfangen der Daten

¹⁰siehe Abschnitt

6 Fahrdatenspeicher

Das Motorrad sollte seine Fahrdaten abspeichern und darstellen können, um eine Diagnose des gesamten Aufbaus zu gewährleisten. Dafür wird eine Datenbank verwendet, nämlich die weit verbreitete Software MySQL verwendet.

6.1 Datenbankstruktur

6.1.1 Benutzer System

id ist nicht signiert und ist der Primärschlüssel mit Auto-Inkrement.

| users | | |
|-----------------|-----------------|-----------------------|
| Attribut | Datentyp | Beschreibung |
| id | int | Identifikationsnummer |
| username | varchar(50) | Name des Benutzers |
| password | varchar(255) | Eingegebenes Passwort |

Tabelle VII.2: Datenbankstruktur der Benutzer Tabelle

6.1.2 Motor Daten

Datenpacket 1

| data1 | | |
|------------------|-----------------|----------------------------------|
| Attribut | Datentyp | Beschreibung |
| id | int | Identifikationsnummer |
| date_time | datetime | Datum der Erstellung |
| vehicle_speed | int | Geschwindigkeit des Motorrades |
| current_rms | int | Ausgangsstrom der Motorsteuerung |
| controller_temp | int | Temperatur des Kontrollers |
| motor_temp | int | Temperatur des Motors |
| motor_torque | int | Drehmoment am Motor |
| modulation_depth | int | Modulationsgrad des Kontrollers |

Tabelle VII.3: Datenbankstruktur der Datenpaket 1 Tabelle

id ist nicht signiert und ist der Primärschlüssel mit Auto-Inkrement. step id ist ein Zeilerattribut, das für die Reihenfolge der Schritte verwendet wird, wie sie in der grafischen Oberfläche angezeigt werden. Der kaskadierte Fremdschlüssel tutorial_id wird für die Zuordnung zu dem jeweiligen Tutorial verwendet. F für die

Datenpacket 2

| data2 | | |
|------------------|----------|-------------------------------------|
| Attribut | Datentyp | Beschreibung |
| id | int | Identifikationsnummer |
| id_data_1 | int | Fremdschlüssel von Datenpaket 1 |
| date_time | datetime | Datum der Erstellung |
| vehicle_speed | int | Geschwindigkeit des Motorrades |
| capacitor_volts | int | Eingangsspannung der Motorsteuerung |
| bdi_percentage | int | Ladestand des Akkus |
| interlock | int | Muss aktiv sein um zu fahren |
| throttle_command | int | Stellung des Gasgriffes |
| brake_command | int | Stellung der Motorbremse (software) |
| driving_mode | int | Aktueller Fahrmodus |

Tabelle VII.4: Datenbankstruktur der Datenpaket 2 Tabelle

Datenpacket 3

| data3 | | |
|---------------------------|----------|--|
| Attribut | Datentyp | Beschreibung |
| id | int | Identifikationsnummer |
| id_data_2 | int | Fremdschlüssel von Datenpaket 2 |
| date_time | datetime | Datum der Erstellung |
| vehicle_speed | int | Geschwindigkeit des Motorrades |
| vehicle_acceleration | int | Eingangsspannung der Motorsteuerung |
| vehicle_odometer | int | Vom Motorrad zurückgelegte Strecke |
| time_to_capture_speed | int | Zeit bis zur eingestellten Geschwindigkeit |
| time_to_capture_distance | int | Zeit bis zur eingestellten Distanz |
| braking_distance_captured | int | Zeit von Bremsbeginn bis zu Stillstand |
| distance_since_stop | int | Zurückgelegte Distanz seit dem Stillstand |

Tabelle VII.5: Datenbankstruktur der Datenpaket 3 Tabelle

Datenpacket 4 - Fehler

| data4 | | |
|-----------|----------|----------------------------------|
| Attribut | Datentyp | Beschreibung |
| id | int | Identifikationsnummer |
| id_data_3 | int | Fremdschlüssel von Datenpacket 3 |
| date_time | datetime | Datum der Erstellung |
| error_1 | int | Fehlercode 1 |
| error_2 | int | Fehlercode 2 |
| error_3 | int | Fehlercode 3 |
| error_4 | int | Fehlercode 4 |
| error_5 | int | Fehlercode 5 |
| error_6 | int | Fehlercode 6 |
| error_7 | int | Fehlercode 7 |

Tabelle VII.6: Datenbankstruktur der Fehler-Datenpaket Tabelle

6.1.3 Fehler Tabelle

Diese Tabelle ist ebenso in der Datenbank gespeichert. Sie beinhaltet die Fehlercodes der Motorsteuerung mit weiteren Informationen wie Name und Beschreibung. Sie muss per Hand angelegt werden und sollte während dem Testen der Maschine mit dokumentiert, um sie dann in das Fehler Fenster der Benutzeroberfläche zu implementieren.

6.1.4 Akku Daten

Da die Kommunikation der BMS noch nicht umgesetzt wurde, werden von Ihr keine Daten auf den CAN-Bus gelegt und daher muss auch keine Tabelle dafür erstellt werden. Somit werden alle Daten über Akku und Ladestand über die Motorsteuerung empfangen.

6.2 Handler

Die Handler Klasse hat die Aufgabe eine Verbindung zwischen der Datenbank und dem Programm herzustellen. Dazu verwendet sie die MySQL-Connector Bibliothek. Mit dieser können SQL Skripten direkt in die Python Klasse integriert werden ohne dass externe SQL Skript Dateien geöffnet werden müssen.

Dieser bekommt in Echtzeit eine Liste der aktuell Empfangenen Daten der Listener Klasse ¹¹ und schreibt diese in die dafür vorgesehenen Tabelle der Datenbank. Hierfür wird ein eigener Thread ¹² geöffnet, um diese Aufgabe unabhängig von dem Restlichen Programm ausführen zu können.

Ebenso verfügt er über Funktionen, welche über das Diagnose Fenster ¹³ angewählt werden können und Daten aus der Datenbank auslesen, um sie in einem Graph anzeigen zu lassen.

6.2.1 Konfigurieren der Schnittstelle

Um auf eine Datenbank zu zugreifen wird muss ein *connect* Objekt, mit den Anmeldedaten der lokalen Datenbank als Parameter, erstellt werden. Mit diesem Objekt kann nun auf Subklassen zugegriffen werden und Daten können aus- und eingelesen werden.

```
# Database credentials
dbhost = "hostname"
dbuser = "username"
dbpass = "password"
dbname = "databasename"

# Connection to the database
```

¹¹siehe Abschnitt

¹²siehe Abschnitt

¹³siehe Abschnitt

```
con = mysql.connector.connect(host=dbhost, user=dbuser, password=dbpass,  
                               database=dbname)
```

Code Listing VII.3: Konfiguration der Datenbankschnittstelle

6.2.2 Cursor klasse

Die Cursor Klasse instanziiert Objekte, die Operationen wie SQL-Anweisungen ausführen können. Cursor interagieren mit dem Server mithilfe eines Connection Objekts. Sie können

```
# Creating cursor for database queries
cursor = con.cursor()
```

Code Listing VII.4: Erstellen eines Cusorobjekts

Ein paar der Wichtigsten Befehle sind:

- *cursor.execute()*
Diese Methode führt die angegebene Abfrage aus. Die in den Tupel- oder Wörterbuchparametern gefundenen Parameter sind an die Variablen in der Operation gebunden. Geben Sie Variablen mit dem Parameterstil von % s oder % (Name) an.
- *cursor.fetchall()*
Diese Methode ruft alle Zeilen einer Abfrage ab und gibt eine Liste von Tupeln¹⁴ zurück. Wenn keine Zeilen mehr verfügbar sind, wird eine leere Liste zurückgegeben.
- *cursor.close()*
Diese Methode wird verwendet wenn man einem Cursor nicht mehr benötigt. Diese Methode schließt den Cursor, setzt alle Ergebnisse zurück und stellt sicher, dass das Cursorobjekt keinen Verweis auf sein ursprüngliches Verbindungsobjekt hat.

6.2.3 SELECT Befehl

Der SELECT Befehl wird zum Abrufen von Daten einer Tabelle verwendet und besitzt mehrere Parameter.

```
# Querying the data from the database
sql = "SELECT * FROM users WHERE username=%s AND password=%s"
cursor.execute(sql, [(username), (password)])
results = cursor.fetchall()
```

Code Listing VII.5: SELECT Befehl über MySQL Connector

Der Befehl kann in zwei Bereiche unterteilt werden. In der ersten Zeile werden die Attribute, die von der Tabelle ausgegeben werden sollen, definiert. Die anzuzeigenden Ergebnisse werden durch den WHERE Befehl gefiltert werden.

Nützlich ist auch der Befehl JOIN durch den Tabellen anhand der Fremdschlüssel verbunden werden.

6.2.4 INSERT Befehl

Der INSERT Befehl wird zum Schreiben von Daten in eine Tabelle verwendet.

```
# Inserting data into the database
sql = "INSERT INTO `users`(`id`, `username`, `password`) VALUES(1, %s, %s);"
cursor.execute(sql, [(username), (password)])
```

Code Listing VII.6: INSERT Befehl über MySQL Connector

Dieser Befehl kann in zwei Teile unterteilt werden. In der ersten Zeile wird die Zieltabelle mit den Attributen angegeben. In der zweiten Zeile folgen die Werte, die in der Datenbank erfasst werden sollen. Hierbei ist die Reihenfolge der Attribute zu beachten. Das Attribut id wird standardmäßig von dem Datenbanksystem vergeben, es ist daher möglich das Attribut im Befehl zu vernachlässigen.

Als Wert wird ebenso die Funktion *NOW()* unterstützt, wodurch intern der aktuelle Zeitstempel abgespeichert wird. Dadurch kümmert sich das Datenbanksystem um die korrekten Werte für das date_time Attribut¹⁵.

¹⁴ein Datensatz (eine Zeile) einer Datenbank

¹⁵siehe Abschnitt

Kapitel VIII

Endergebnis

Anhang A

Arbeitsnachweis

1 Zeitplan

2 Kosten

Anhang B

Programmcode

Anhang C

CAD-Zeichnungen

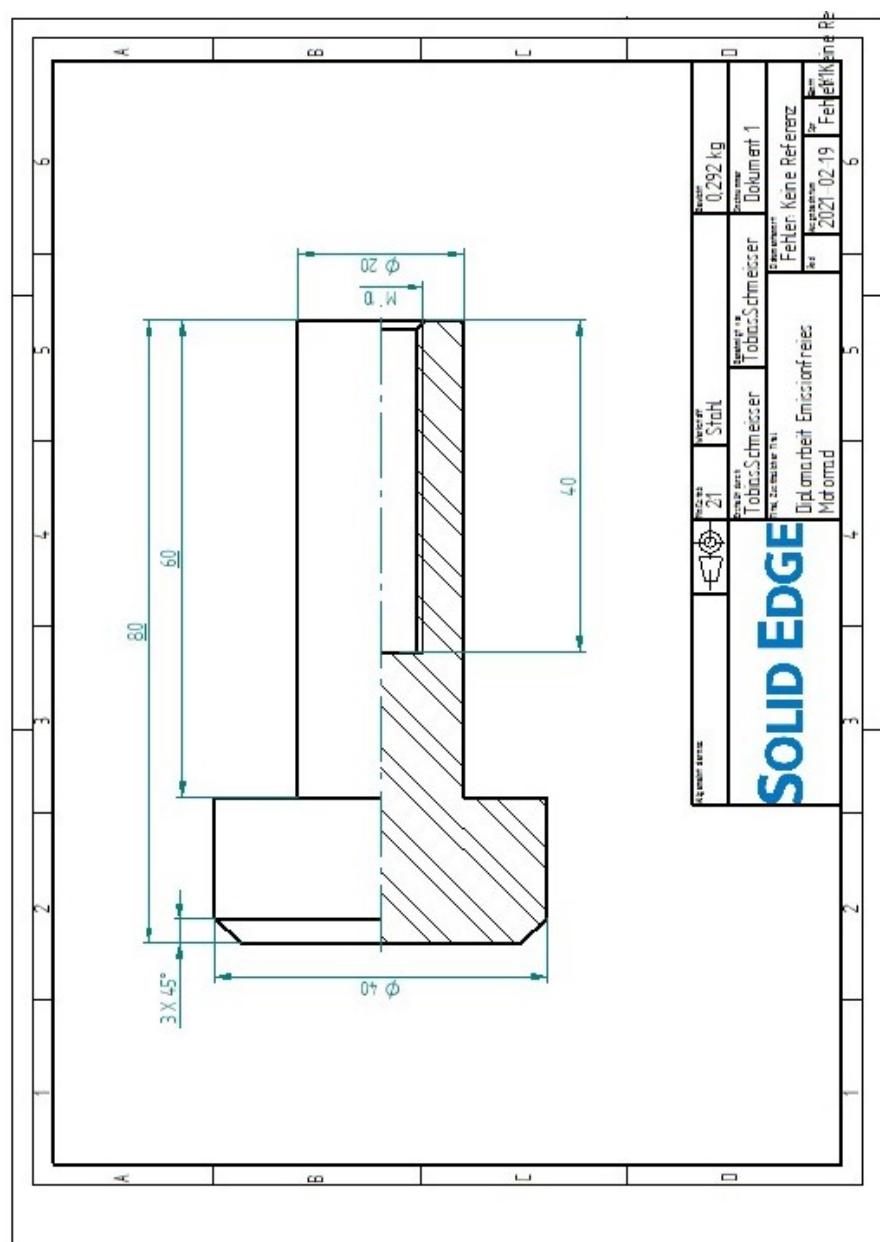


Abbildung C.1: Wellenersatz

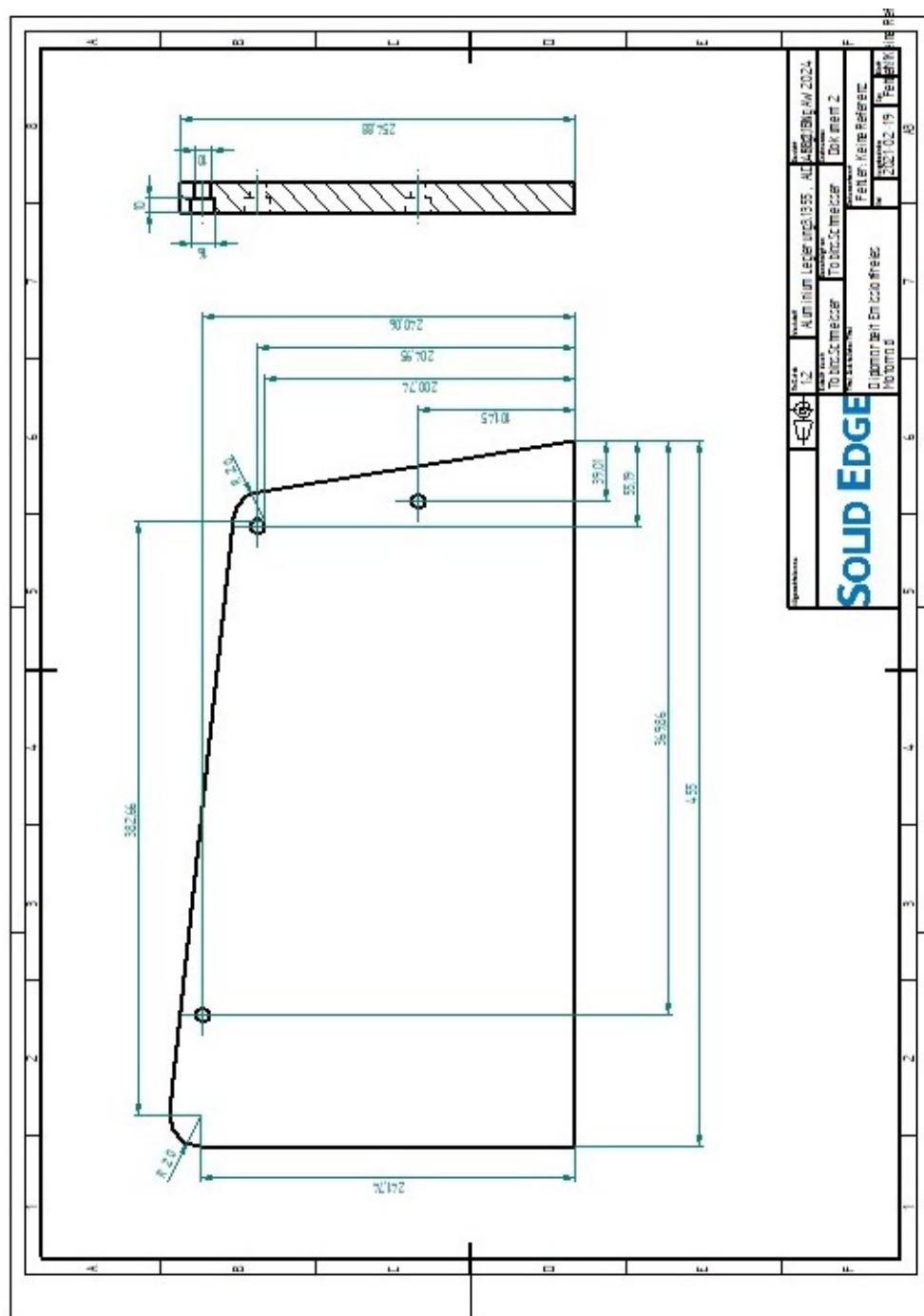


Abbildung C.2: Seitenplatte Rechts

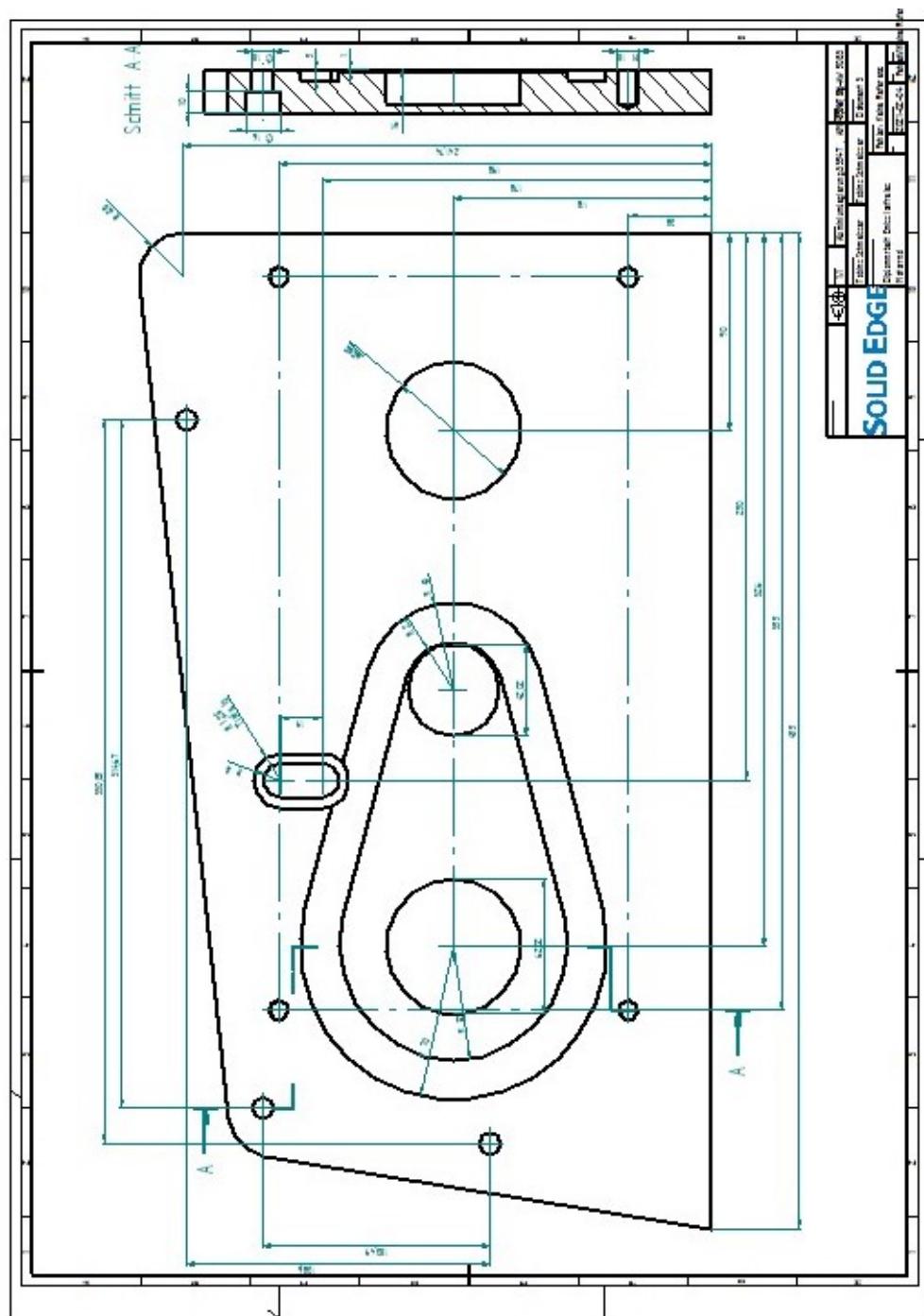


Abbildung C.3: Seitenplatte Links

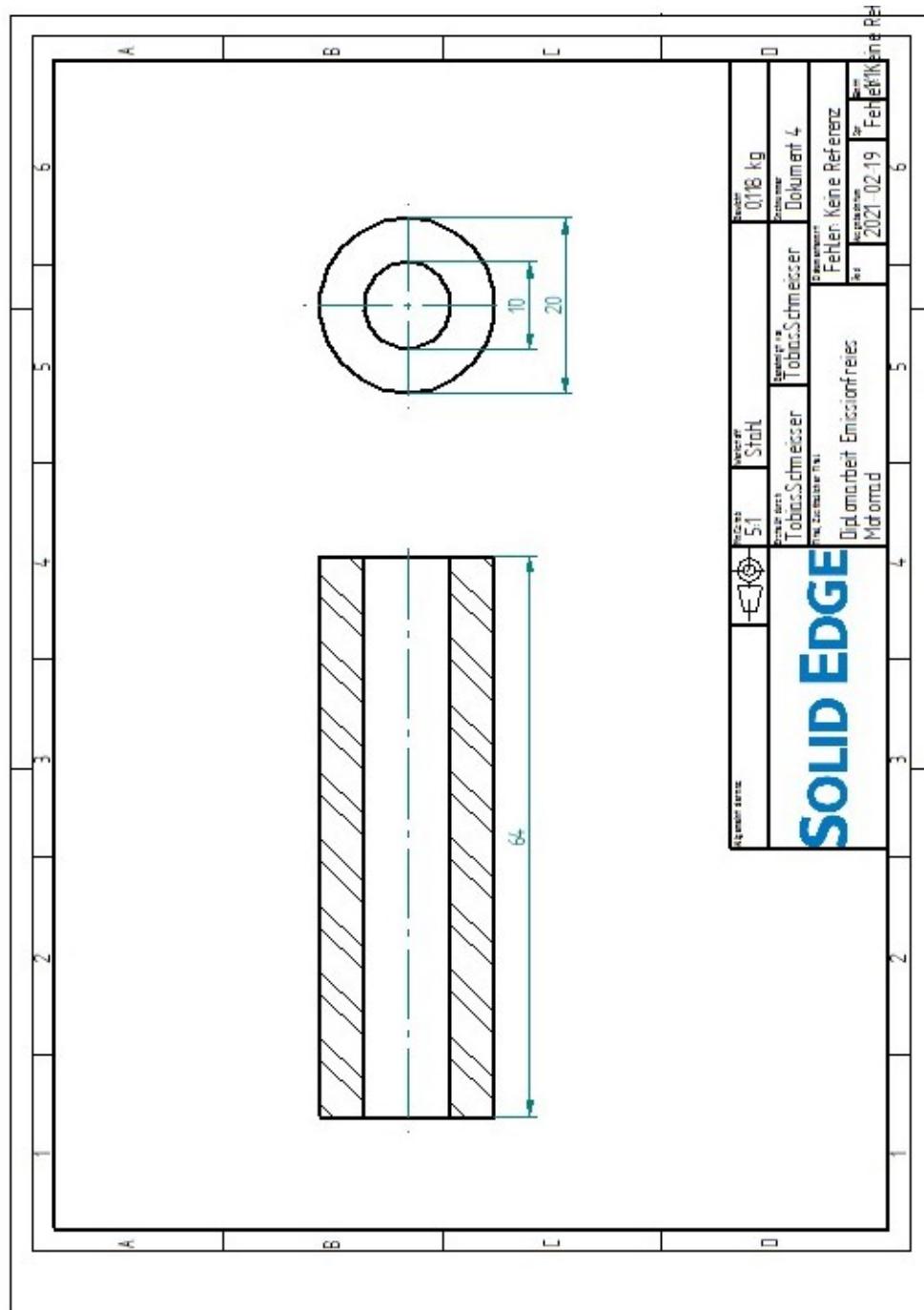


Abbildung C.4: Abstandhalter

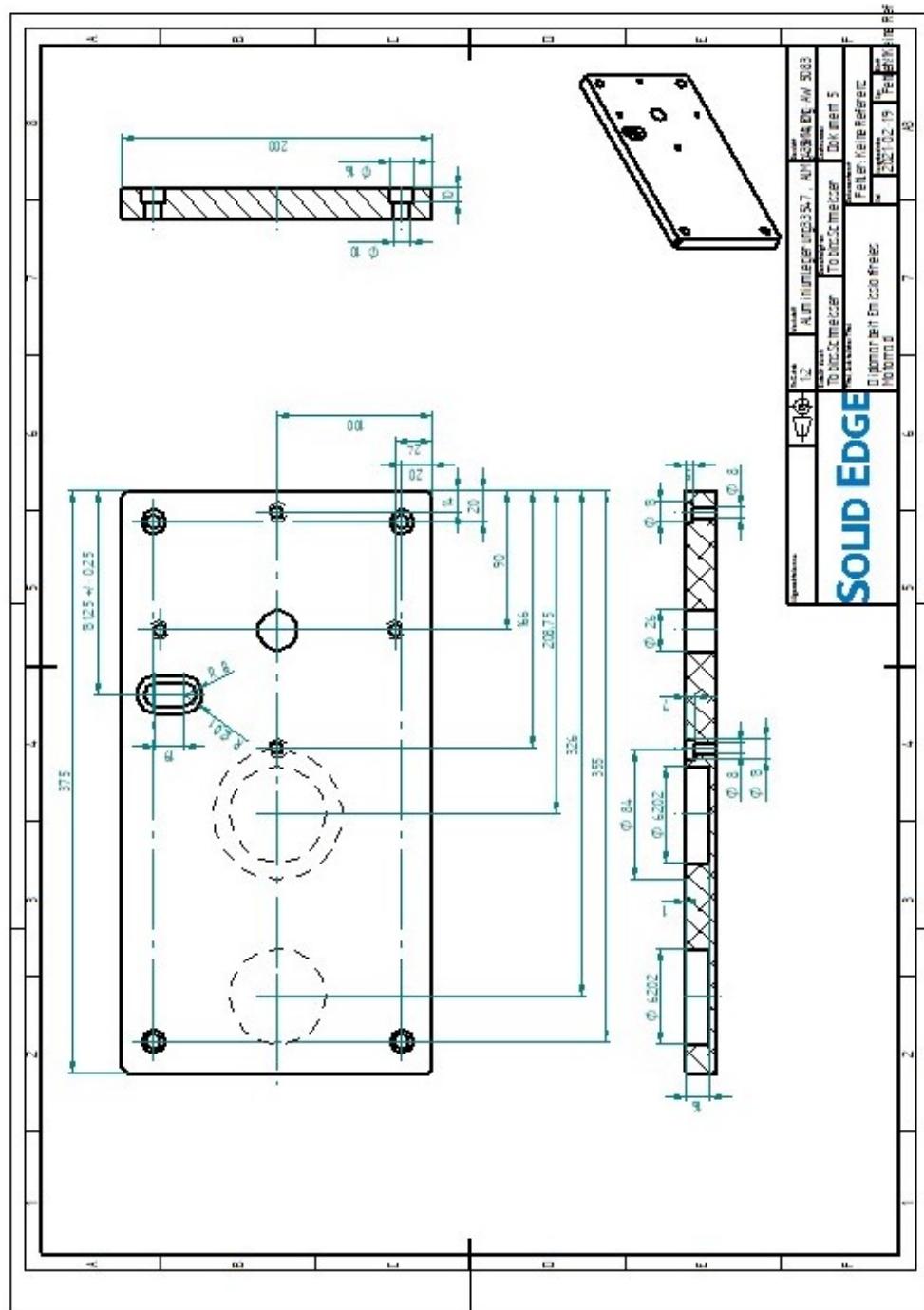


Abbildung C.5: Aufbau/Zusatzplatte

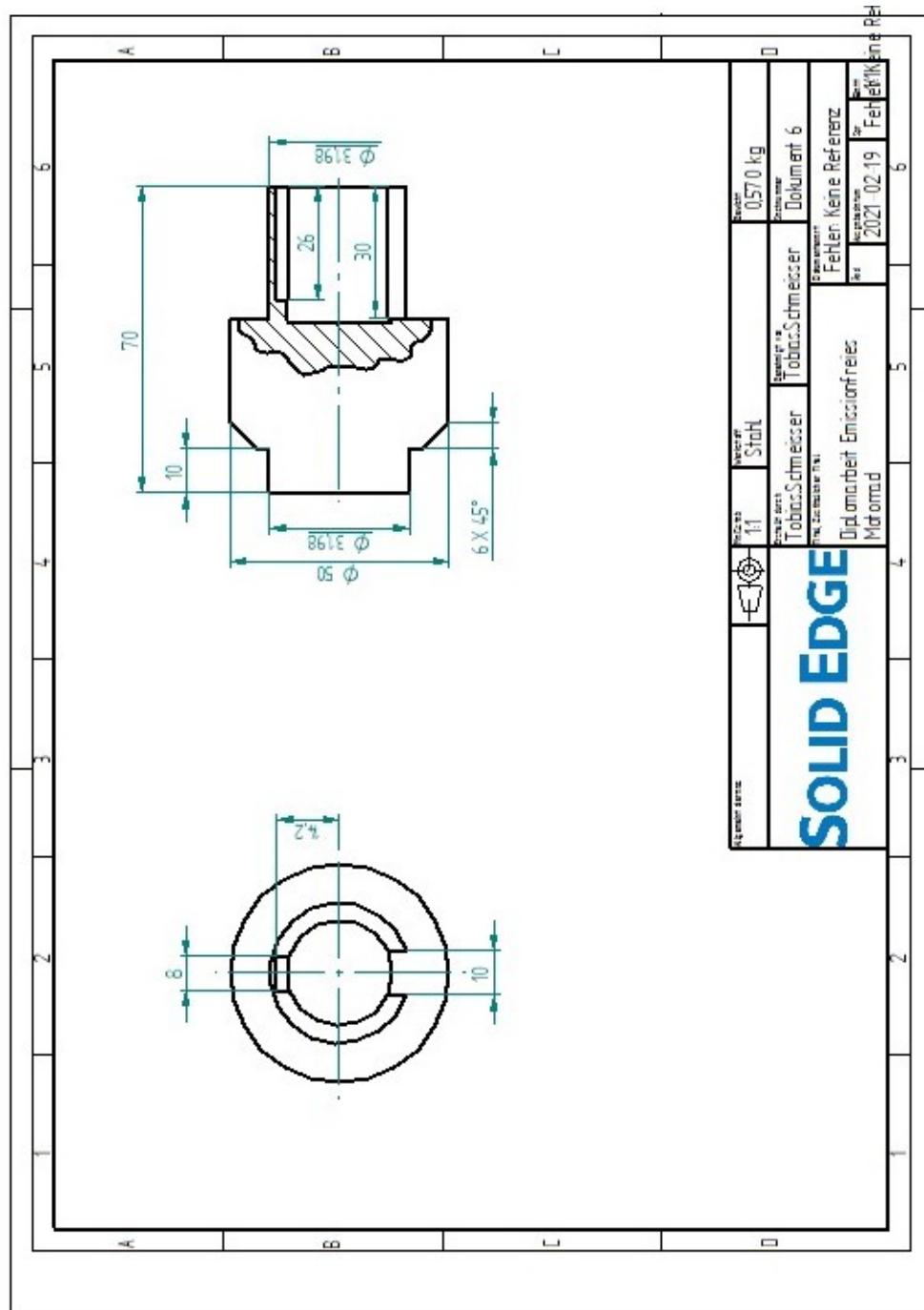


Abbildung C.6: Achse 1/Antriebsachsen

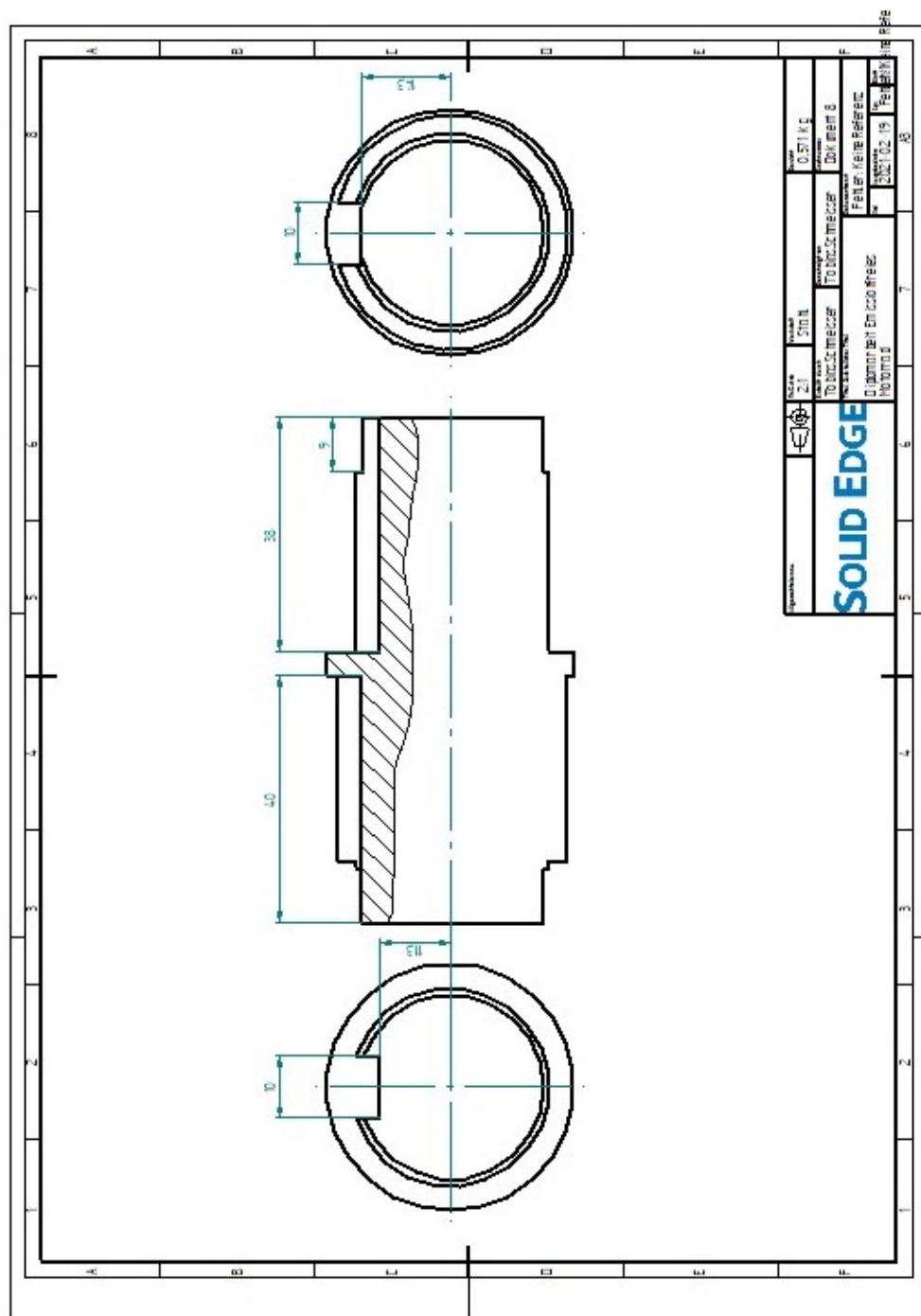


Abbildung C.7: Achse 3

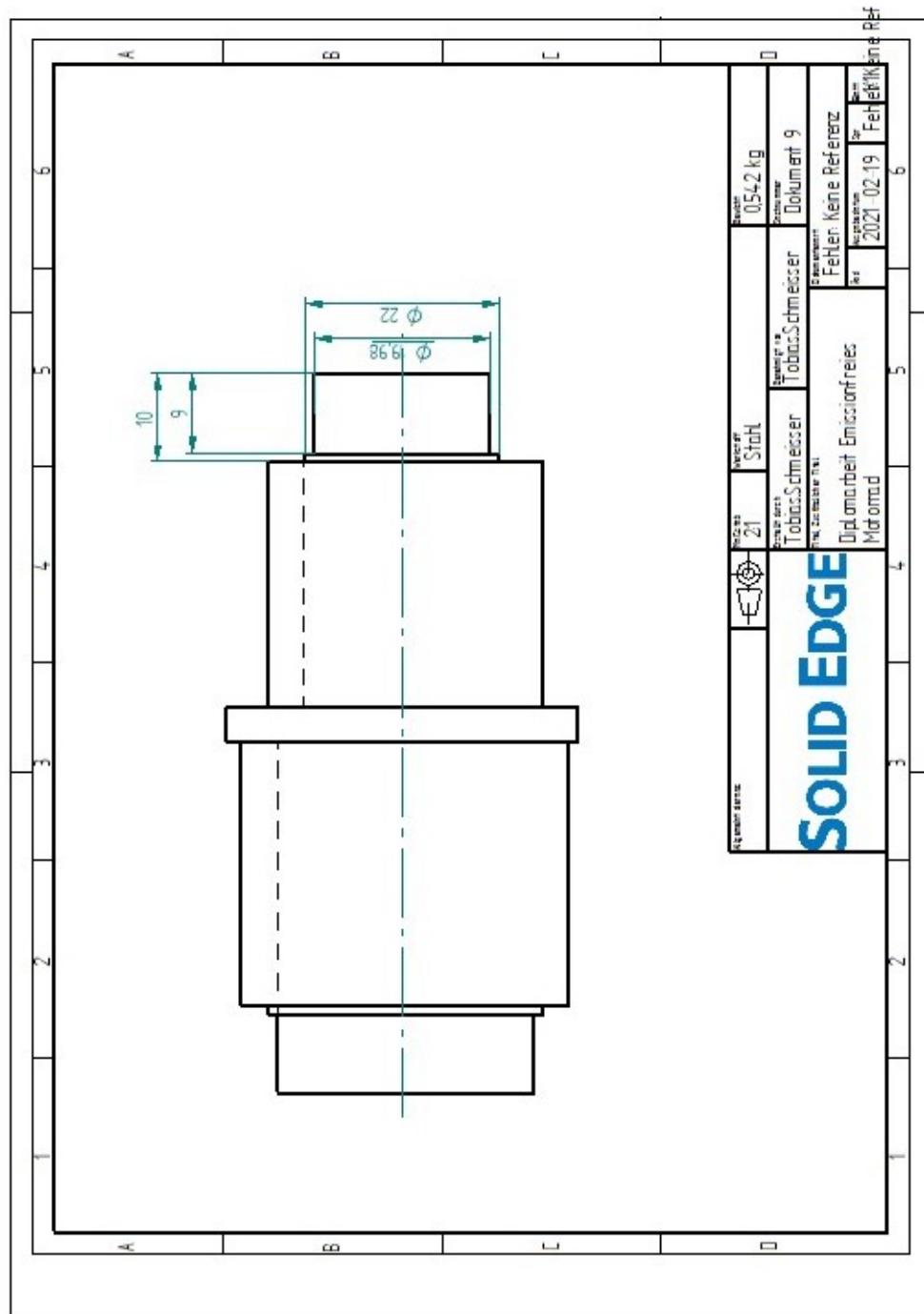


Abbildung C.8: Achse 2

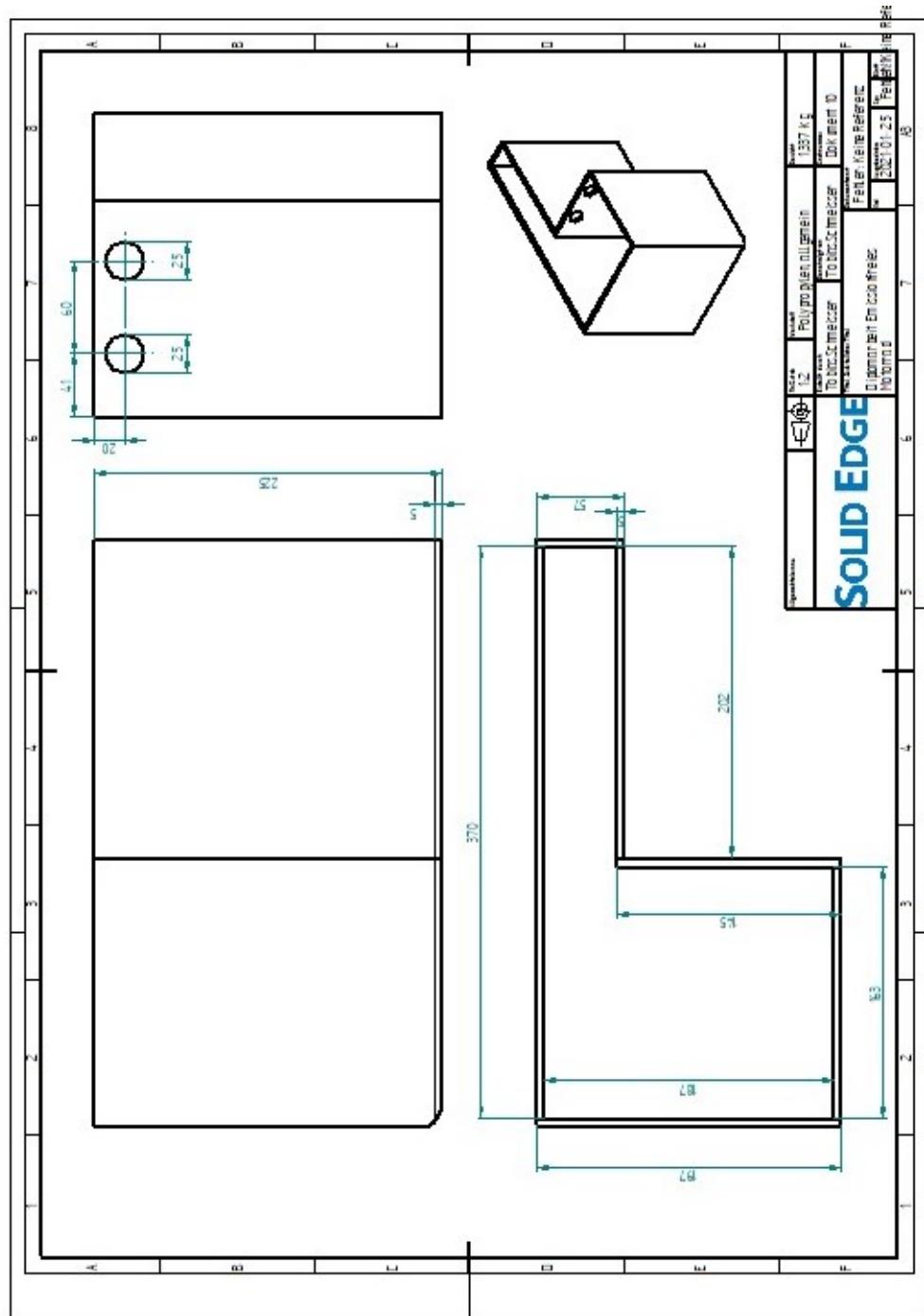


Abbildung C.9: Akkubox Motorblock

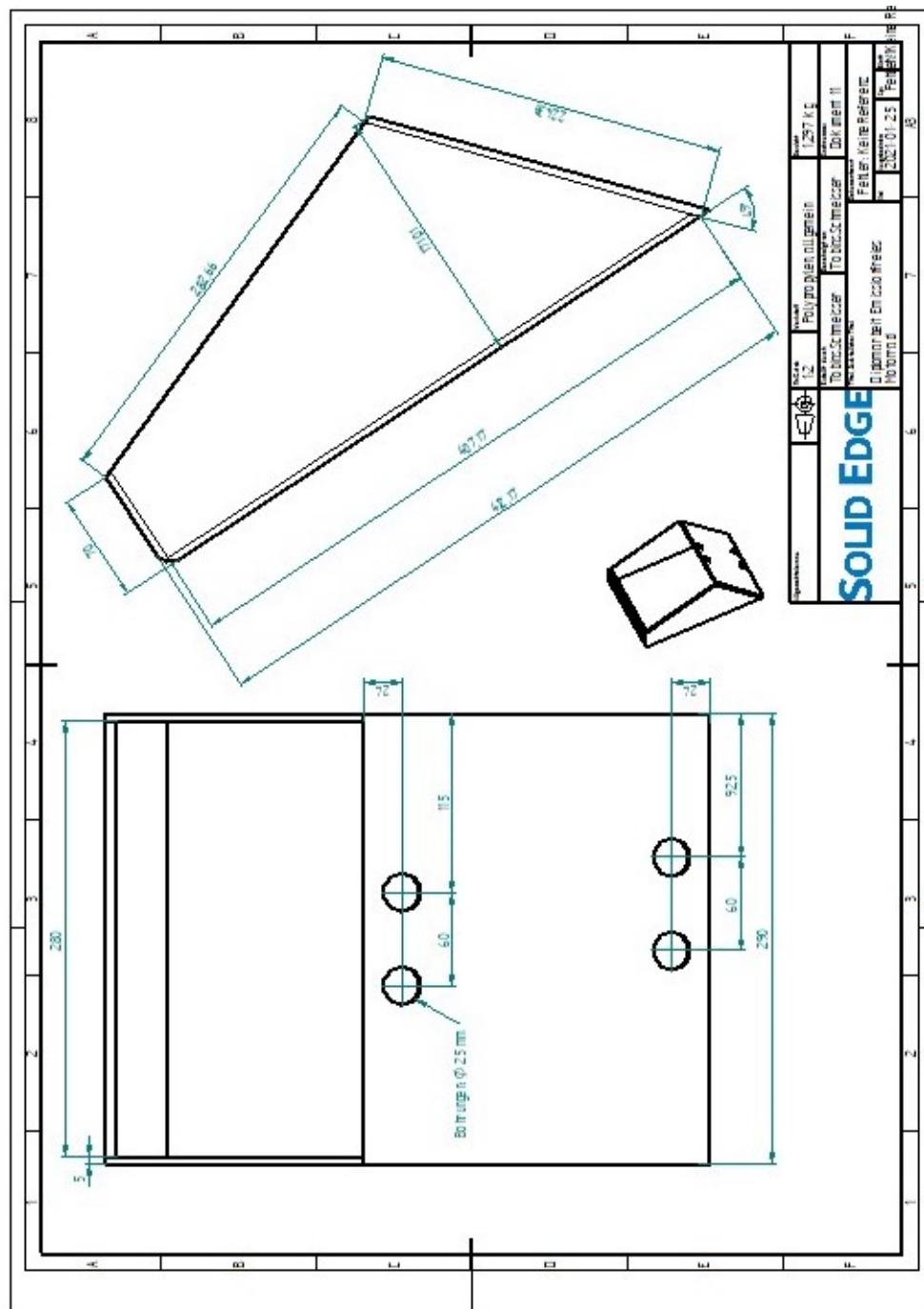


Abbildung C.10: Akkubox Vorderseite

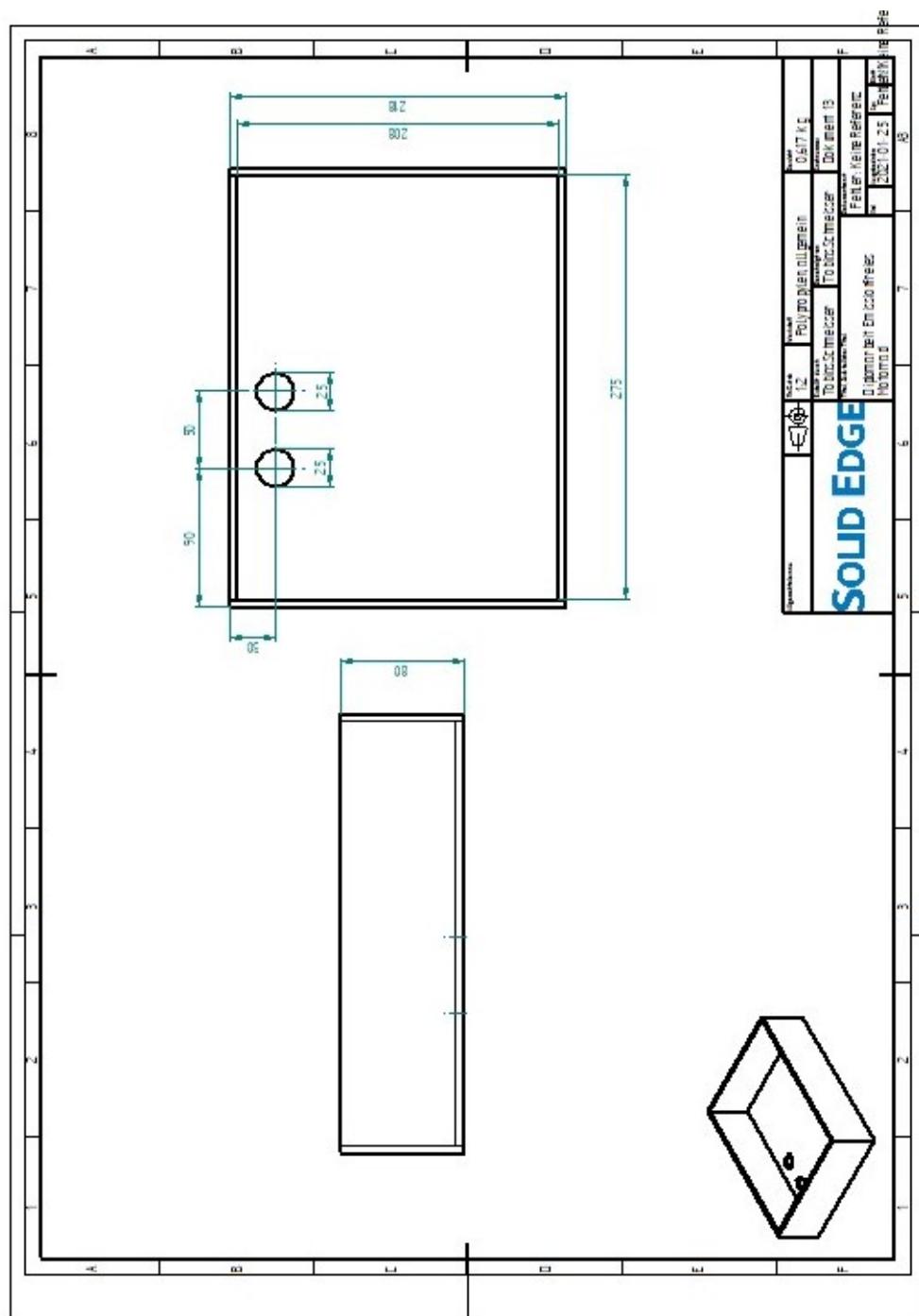


Abbildung C.11: Akkubox Mitte

Anhang D

Solid Edge Simulationen

Simulationsbericht_S Seitenplatte_Links_ALU 5754

Unternehmen

Autor

Tobias.Schmeisser

Datum

Donnerstag, 18. Februar 2021

Verwendete Software

Solid Edge (219.00.00.091 x64)

Femap (11.3.1)

Verwendeter Solver

NX Nastran (11.0)

Inhaltsverzeichnis

1. [Einführung](#)
 2. [Modellinformationen](#)
 3. [Analyseeigenschaften](#)
 4. [Berechnete Geometrie](#)
 5. [Materialeigenschaften](#)
 6. [Überschreibungseigenschaften](#)
 7. [Lasten](#)
 8. [Randbedingungen](#)
 9. [Vernetzungsinformationen](#)
 10. [Ergebnisse](#)
 11. [Optimierungen](#)
 12. [Schluss](#)
 13. [Haftungsausschluss](#)
-

1. Einführung

2. Modellinformationen

| | |
|----------|---|
| Dokument | C:\Users\Tobias.Schmeisser\Desktop\Später Löschn\Projekt\Bauteile\Seitenplatte_L\Seitenplatte_Links.par |
|----------|---|

3. Berechnungseigenschaften

| Berechnungseigenschaft | Wert |
|------------------------------------|------------------------|
| Berechnungsname | Statische Berechnung 1 |
| Berechnungstyp | Linear statisch |
| Vernetzungstyp | Tetraeder |
| Iterativer Solver | Ein |
| NX Nastran-Geometrieprüfung | Ein |
| NX Nastran-Befehlszeile | |
| NX Nastran-Berechnungsoptionen | |
| Von NX Nastran generierte Optionen | |
| NX Nastran-Standardoptionen | |
| Option-Nur Flächenergebnisse | Ein |

4. Berechnete Geometrie

4.1 Körper

| Name | Material | Masse | Volumen | Gewicht |
|------------------------|---|----------|-----------------------|--------------|
| Seitenplatte_Links.par | Aluminiumlegierung:3.3535 , AlMg3, EN-AW 5754 | 5,106 kg | 1,919 dm ³ | 50036,229 mN |

5. Materialeigenschaften

5.1 Aluminiumlegierung:3.3535 , AlMg3, EN-AW 5754

| Eigenschaft | Wert |
|--------------------------|--------------------------|
| Dichte | 2,660 kg/dm ³ |
| Wärme- Ausdehnungskoeff. | 0,0000 /c |
| Wärmeleitfähigkeit | 0,204 kW/m-C |
| Spezifische Wärme | 940,000 J/kg-C |
| Elastizitätsmodul | 70000,000 MegaPa |
| Poissonscher Beiwert | 0,390 |
| Streckgrenze | 250,000 MegaPa |
| Zugfestigkeit | 290,000 MegaPa |

Bruchdehnung % 0,000

6. Überschreibungseigenschaften

7. Lasten

| Nam e | Lastenty p | Lastenwer t | Lastverteilun g | Lastenrichtun g | Lastenrichtungsoptio n |
|------------|---------------|---|--------------------|--------------------|---------------------------|
| Kraft 1 | Kraft | Fx: 2e+06 mN, Fy: 0 mN, Fz: 4e+06 mN Fx: -2e+06 | Pro Entität | | Komponenten |
| Kraft 2 | Kraft | mN, Fy: 0 mN, Fz: - 4e+06 mN Fx: -2e+06 | Pro Entität | | Komponenten |
| Kraft 3 | Kraft | mN, Fy: 0 mN, Fz: - 4e+06 mN | Pro Entität | | Komponenten |

8. Randbedingungen

| Name | Randbedingungstyp | Freiheitsgrade |
|-----------|-------------------|-----------------------------|
| Fixiert 1 | Fixiert | Freie Freiheitsgrade: Keine |

9. Vernetzungsinformationen

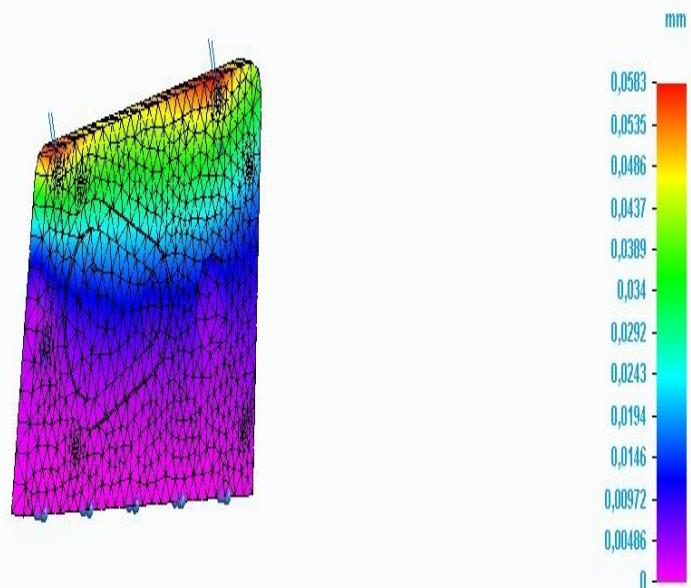
| Vernetzungstyp | Tetraeder |
|----------------------------------|-----------|
| Gesamtzahl der vernetzten Körper | 1 |
| Gesamtzahl der Elemente | 6.645 |
| Gesamtzahl der Knoten | 11.781 |
| Subjektive Netzgröße (1-10) | 1 |

10. Ergebnisse

10.1 Verschiebungsergebnisse

| Ergebniskomponente: Gesamtverschiebung | | | | | |
|--|-----------|------------|-----------|-------------|--|
| Ausmaß | Wert | x | y | z | |
| Mindestwert | 0 mm | 11,583 mm | -0,000 mm | -231,679 mm | |
| Höchstwert | 0,0583 mm | -57,198 mm | -0,000 mm | 22,140 mm | |

Seitenplatte_Links.par, Statische Berechnung 1, Aluminiumlegierung 3.3535, AlMg3, EN-AW 5754
Verschiebung - Knoten
Kontur: Resultierende Verschiebung
Verformung: Gesamtverschiebung
Datum: Donnerstag, 18. Februar 2021 18:56

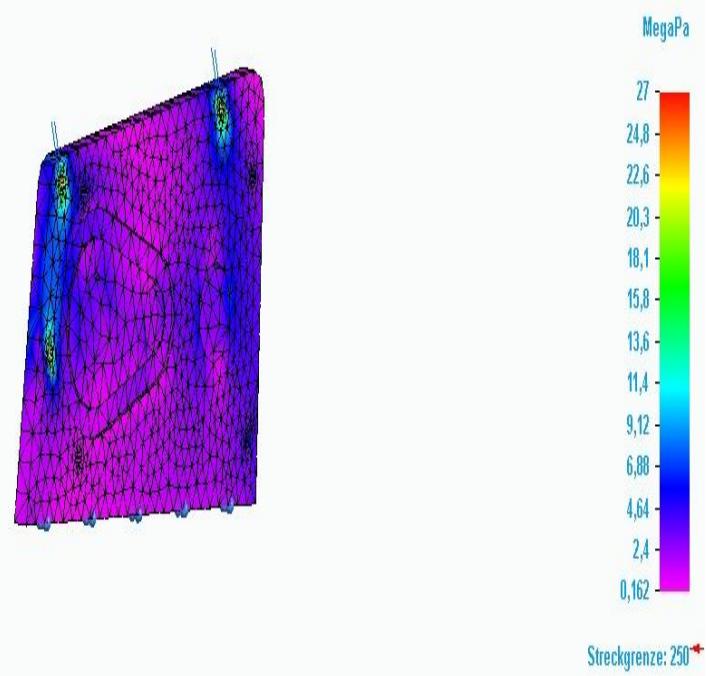


Gesamtverschiebung

10.2 Spannungsergebnisse

| Ergebniskomponente: Von Mises | | | | | |
|-------------------------------|--------------|-------------|-----------|------------|--|
| Ausmaß | Wert | x | y | z | |
| Mindestwert | 0,162 MegaPa | -145,584 mm | -0,000 mm | 24,940 mm | |
| Höchstwert | 27 MegaPa | 252,593 mm | -0,000 mm | -26,734 mm | |

Seitenplatte Links.par, Statische Berechnung 1, Aluminiumlegierung:3.3535 , AlMg3, EN-AW 5754
Spannung - Elemente
Kontur: Von Mises
Verformung: Gesamtverschiebung
Datum: Donnerstag, 18. Februar 2021 18:56

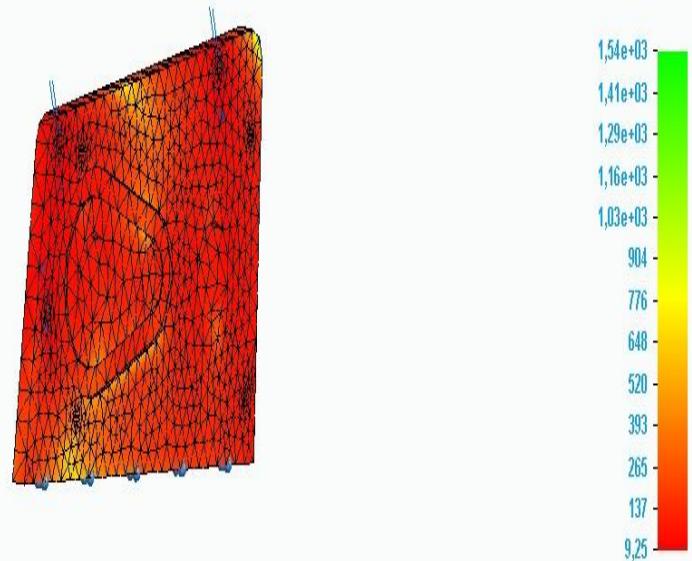


Von Mises

10.3 Sicherheitsfaktorergebnisse

| Ergebniskomponente: Sicherheitsfaktor | | | | | |
|---------------------------------------|----------|-------------|-----------|------------|--|
| Ausmaß | Wert | x | y | z | |
| Mindestwert | 9,25 | 252,593 mm | -0,000 mm | -26,734 mm | |
| Höchstwert | 1,54e+03 | -145,584 mm | -0,000 mm | 24,940 mm | |

Seitenplatte Links.par, Statische Berechnung 1, Aluminiumlegierung:3.3535 , AlMg3, EN-AW 5754
Spannung - Elemente
Kontur: Sicherheitsfaktor
Verformung: Gesamtverschiebung
Datum: Donnerstag, 18. Februar 2021 10:56



Sicherheitsfaktor

11. Optimierungen

12. Schluss

13. Haftungsausschluss

Wichtige Informationen

Dieser Auszug sollte nicht als einziges Mittel zur Bewertung einer Entwurfsidee hinsichtlich ihrer Eignung für einen bestimmten Satz von Umgebungsbedingungen verwendet werden. Siemens folgt dem Bestreben, immer ausreichend Hilfen und Benutzerführungen für Produkte zur Verfügung zu stellen. Diese ersetzen jedoch nicht ein gutes Beurteilungs- und Einschätzungsvermögen bei der Konstruktion, das in der Verantwortung unserer Anwender liegt. Ein qualitativer Ansatz bei der Konstruktion sollte sicherstellen, dass die Ergebnisse dieser Bewertung zusammen mit der praktischen Erfahrung von Konstrukteuren und Analytikern sowie experimentellen Testdaten in Betracht gezogen wird. Die in diesem Auszug enthaltenen Ergebnisse werden als verlässlich betrachtet, sollten jedoch nicht als Garantie jeglicher Art für die Tauglichkeit eines Zwecks ausgelegt werden.

Simulationsbericht_Seitenplatte_Rechts

Unternehmen

Autor

Tobias.Schmeisser

Datum

Mittwoch, 20. Januar 2021

Verwendete Software

Solid Edge (219.00.00.091 x64)

Femap (11.3.1)

Verwendeter Solver

NX Nastran (11.0)

Inhaltsverzeichnis

1. [Einführung](#)
 2. [Modellinformationen](#)
 3. [Analyseeigenschaften](#)
 4. [Berechnete Geometrie](#)
 5. [Materialeigenschaften](#)
 6. [Überschreibungseigenschaften](#)
 7. [Lasten](#)
 8. [Randbedingungen](#)
 9. [Vernetzungsinformationen](#)
 10. [Ergebnisse](#)
 11. [Optimierungen](#)
 12. [Schluss](#)
 13. [Haftungsausschluss](#)
-

1. Einführung

2. Modellinformationen

| | |
|----------|--|
| Dokument | C:\Users\Tobias.Schmeisser\Desktop\Später löschn\Projekt\Bauteile\Seitenplatte_R\Seitenplatte_Rechts.par |
|----------|--|

3. Berechnungseigenschaften

| Berechnungseigenschaft | Wert |
|------------------------------------|------------------------|
| Berechnungsname | Statische Berechnung 1 |
| Berechnungstyp | Linear statisch |
| Vernetzungstyp | Tetraeder |
| Iterativer Solver | Ein |
| NX Nastran-Geometrieprüfung | Nur Warnung |
| NX Nastran-Befehlszeile | |
| NX Nastran-Berechnungsoptionen | |
| Von NX Nastran generierte Optionen | |
| NX Nastran-Standardoptionen | |
| Option-Nur Flächenergebnisse | Ein |

4. Berechnete Geometrie

4.1 Körper

| Name | Material | Masse | Volumen | Gewicht |
|-------------------------|-------------------------------|-----------|-----------------------|---------------|
| Seitenplatte_Rechts.par | Stahllegierung:1.7005 , 45Cr2 | 16,331 kg | 2,094 dm ³ | 160048,125 mN |

5. Materialeigenschaften

5.1 Stahllegierung:1.7005 , 45Cr2

| Eigenschaft | Wert |
|-------------------------|--------------------------|
| Dichte | 7,800 kg/dm ³ |
| Wärme- Ausdehnungskoef. | 0,0000 /c |
| Wärmeleitfähigkeit | 0,014 kW/m-C |
| Spezifische Wärme | 440,000 J/kg-C |
| Elastizitätsmodul | 190000,000 MegaPa |
| Poissonscher Beiwert | 0,280 |
| Streckgrenze | 540,000 MegaPa |
| Zugfestigkeit | 780,000 MegaPa |

Bruchdehnung % 0,000

6. Überschreibungseigenschaften

7. Lasten

| Nam e | Lastenty p | Lastenwer t | Lastverteilun g | Lastenrichtun g | Lastenrichtungsoptio n |
|------------|---------------|---|--------------------|--------------------|---------------------------|
| Kraft 2 | Kraft | Fx: -2e+06 mN, Fy: 0 mN, Fz: - 4e+06 mN Fx: 2e+06 | Insgesamt | | Komponenten |
| Kraft 3 | Kraft | mN, Fy: - 1e+03 mN, Fz: 4e+06 mN | Pro Entität | | Komponenten |

8. Randbedingungen

| Name | Randbedingungstyp | Freiheitsgrade |
|-----------|-------------------|-----------------------------|
| Fixiert 4 | Fixiert | Freie Freiheitsgrade: Keine |

9. Vernetzungsinformationen

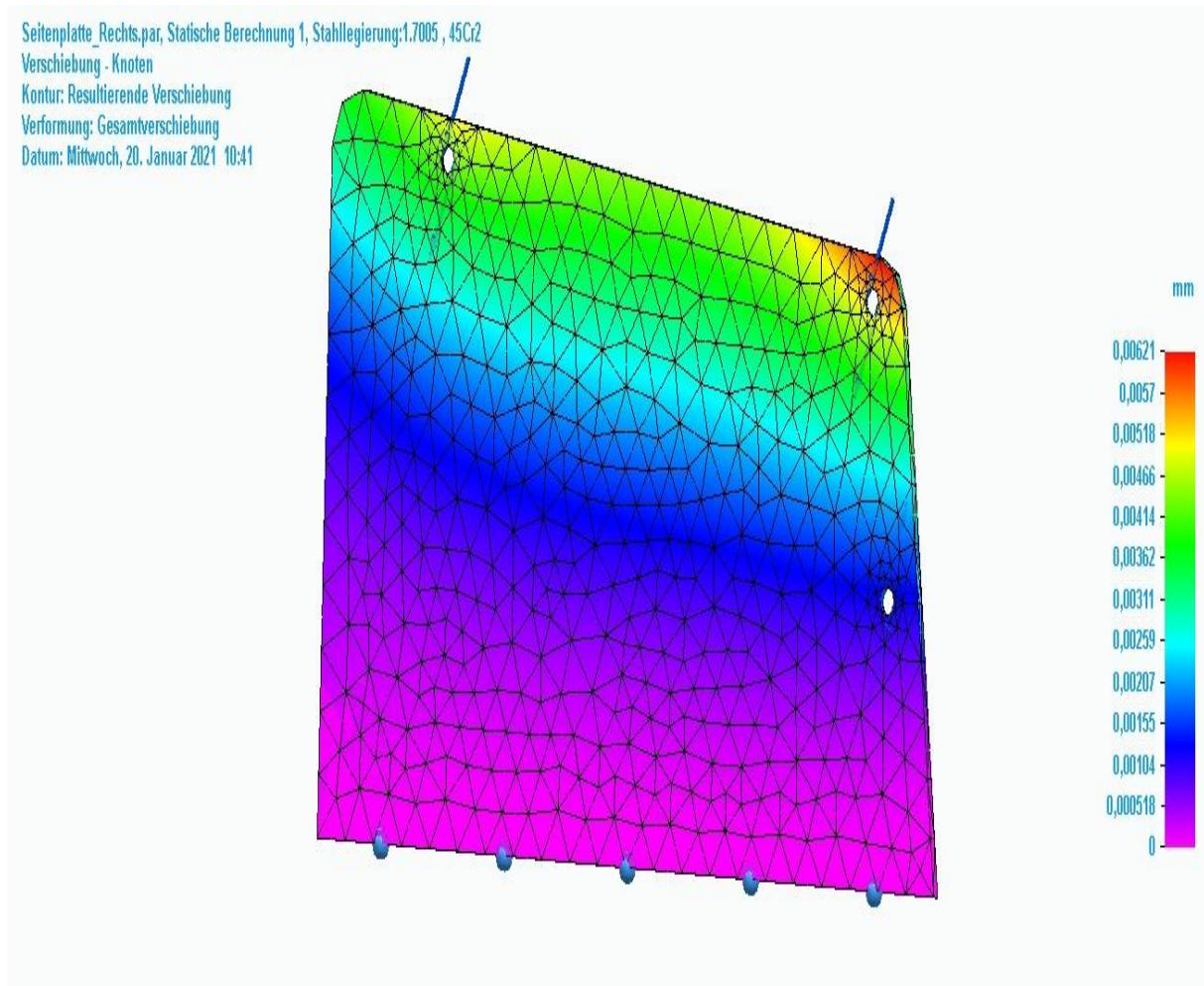
| Vernetzungstyp | Tetraeder |
|----------------------------------|-----------|
| Gesamtzahl der vernetzten Körper | 1 |
| Gesamtzahl der Elemente | 15.836 |
| Gesamtzahl der Knoten | 27.527 |
| Subjektive Netzgröße (1-10) | 1 |

10. Ergebnisse

10.1 Verschiebungsergebnisse

Ergebniskomponente: Gesamtverschiebung

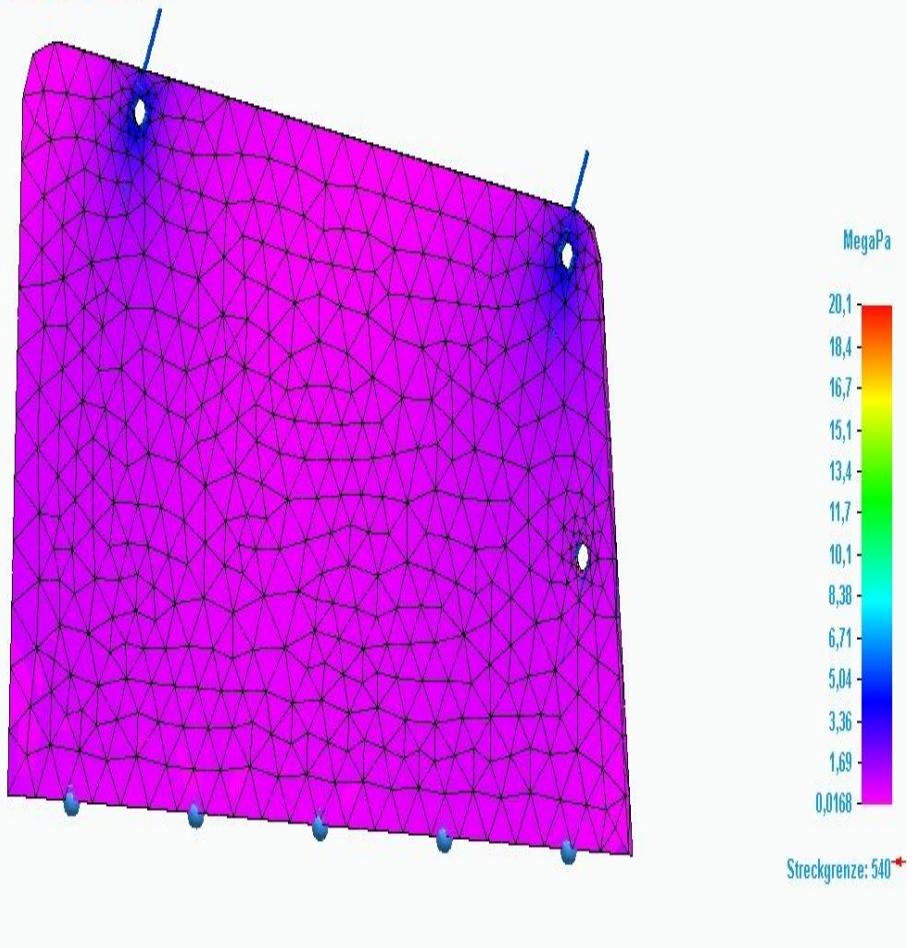
| Ausmaß | Wert | x | y | z |
|--------------------|------------|------------|------------|-------------|
| Mindestwert | 0 mm | -75,140 mm | 0,000 mm | -101,201 mm |
| Höchstwert | 0,00621 mm | 184,882 mm | -20,000 mm | 119,429 mm |



10.2 Spannungsergebnisse

| Ergebniskomponente: Von Mises | | | | |
|-------------------------------|---------------|-------------|------------|-----------|
| Ausmaß | Wert | x | y | z |
| Mindestwert | 0,0168 MegaPa | -219,913 mm | 0,000 mm | 74,612 mm |
| Höchstwert | 20,1 MegaPa | 192,541 mm | -10,000 mm | 3,780 mm |

Seitenplatte Rechts.par, Statische Berechnung 1, Stahllegierung:1.7005 , 45Cr2
Spannung - Elemente
Kontur: Von Mises
Verformung: Gesamtverschiebung
Datum: Mittwoch, 20. Januar 2021 10:41

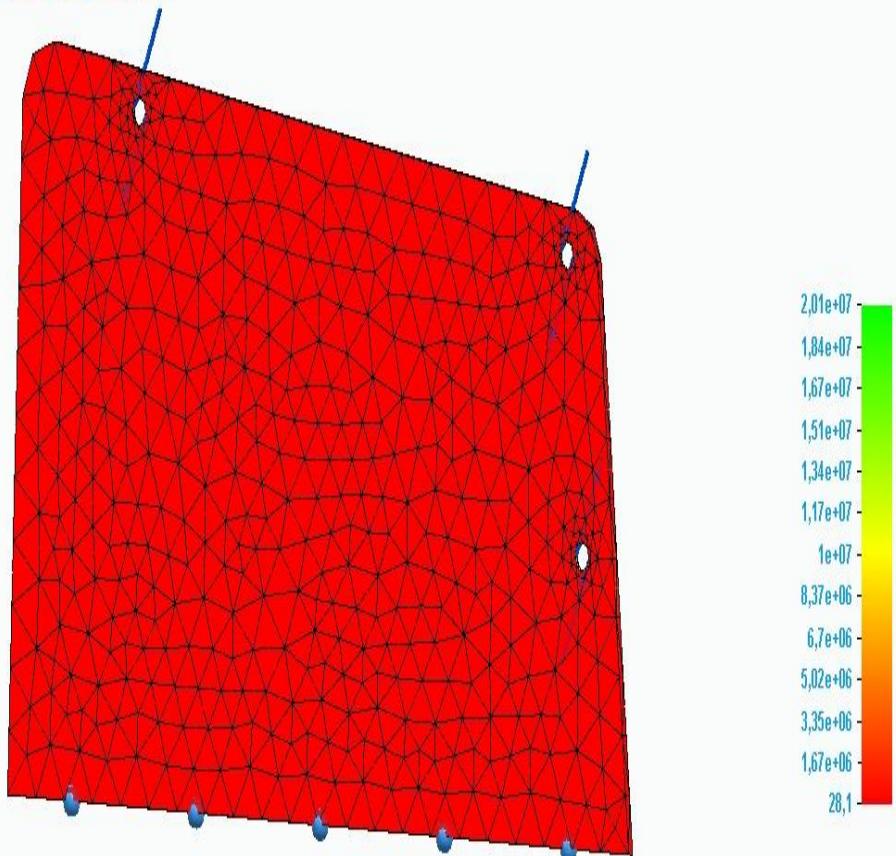


Von Mises

10.3 Sicherheitsfaktorergebnisse

| Ergebniskomponente: Sicherheitsfaktor | | | | | |
|---------------------------------------|----------|------------|------------|----------|--|
| Ausmaß | Wert | x | y | z | |
| Mindestwert | 28,1 | 191,076 mm | -20,000 mm | 0,244 mm | |
| Höchstwert | 2,01e+07 | 192,541 mm | -10,000 mm | 3,780 mm | |

Seitenplatte Rechts.par, Statische Berechnung 1, Stahllegierung:1.7005 , 45Cr2
Spannung - Elemente
Kontur: Sicherheitsfaktor
Verformung: Gesamtverschiebung
Datum: Mittwoch, 20. Januar 2021 10:41



Sicherheitsfaktor

11. Optimierungen

12. Schluss

13. Haftungsausschluss

Wichtige Informationen

Dieser Auszug sollte nicht als einziges Mittel zur Bewertung einer Entwurfsidee hinsichtlich ihrer Eignung für einen bestimmten Satz von Umgebungsbedingungen verwendet werden. Siemens folgt dem Bestreben, immer ausreichend Hilfen und Benutzerführungen für Produkte zur Verfügung zu stellen. Diese ersetzen jedoch nicht ein gutes Beurteilungs- und Einschätzungsvermögen bei der Konstruktion, das in der Verantwortung unserer Anwender liegt. Ein qualitativer Ansatz bei der Konstruktion sollte sicherstellen, dass die Ergebnisse dieser Bewertung zusammen mit der praktischen Erfahrung von Konstrukteuren und Analytikern sowie experimentellen Testdaten in Betracht gezogen wird. Die in diesem Auszug enthaltenen Ergebnisse werden als verlässlich betrachtet, sollten jedoch nicht als Garantie jeglicher Art für die Tauglichkeit eines Zwecks ausgelegt werden.

Anhang E

Schaltpläne

Anhang F

Datenblätter

0.1 Mean Well RSD-30H-5



30W Reliable Railway DC-DC Converter

RSD-30 series

■ Features

- Compliance to EN50155 and EN45545-2 railway standard
- Ultra compact and 1U low profile(25mm)
- 4:1 wide input range
- No minimum load required
- Protections: Short circuit / Overload / Over voltage / Input reverse polarity
- 4000VDC I/O isolation (reinforced isolation)
- Half encapsulated , cooling by free air convection
- -40~+70°C wide working temperature
- Built-in constant current limiting circuit
- LED indicator for power on
- 3 years warranty

■ Applications

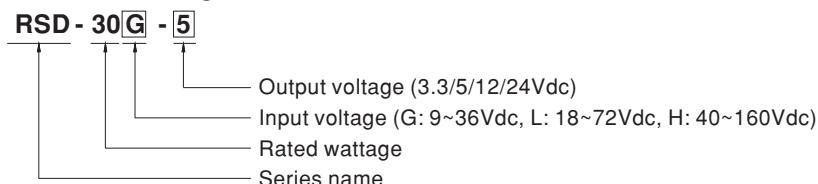
- Bus,tram,metro or railway system
- Wireless network
- Telecom or datacom system
- Highly vibrating, highly dusty, extremely low or high temperature harsh environment

■ Description

RSD-30 is a 30W enclosed type DC-DC reliable railway converter. This series is compliant with EN50155/IEC60571 railway standard, constituting three types of models with 4:1 wide but different input ranges 9~36V/18~72V/40~160V, suitable for railway and all kinds of transportation systems exploiting the frequently used standard input voltages such as 12V, 24V, 36V, 48V, 72V, 96V and 110V. Various output voltages, 3.3V, 5V, 12V and 24V are available for selection.

This series has the capability of working under -40~+70°C, low ripple and noise, supreme EMC characteristics, 4KVDC I/P-OP, low enclosure profile 25mm and an interior with semi-potted silicone. It does not only well fits the in-car systems or the facilities by rails for railway, trams and buses but also can be used in the harsh environment with high vibration, high dust, extremely low or high temperature, etc.

■ Model Encoding



File Name:RSD-30-SPEC 2017-02-22



30W Reliable Railway DC-DC Converter

RSD-30 series**SPECIFICATION**

| MODEL | RSD-30G-3.3 | RSD-30G-5 | RSD-30G-12 | RSD-30G-24 | RSD-30L-3.3 | RSD-30L-5 | RSD-30L-12 | RSD-30L-24 | | | | | | | | |
|----------------------------|--|---|-----------------|---|--------------|------------|------------|--------------|--------------|--|--|--|--|--|--|--|
| OUTPUT | DC VOLTAGE | 3.3V | 5V | 12V | 24V | 3.3V | 5V | 12V | 24V | | | | | | | |
| | RATED CURRENT | 6A | 6A | 2.5A | 1.25A | 6A | 6A | 2.5A | 1.25A | | | | | | | |
| | CURRENT RANGE | 0 ~ 6A | 0 ~ 6A | 0 ~ 2.5A | 0 ~ 1.25A | 0 ~ 6A | 0 ~ 6A | 0 ~ 2.5A | 0 ~ 1.25A | | | | | | | |
| | RATED POWER | 19.8W | 30W | 30W | 30W | 19.8W | 30W | 30W | 30W | | | | | | | |
| | RIPPLE & NOISE (max.) Note.2 | 70mVp-p | 70mVp-p | 60mVp-p | 50mVp-p | 70mVp-p | 70mVp-p | 60mVp-p | 50mVp-p | | | | | | | |
| | VOLTAGE TOLERANCE Note.3 | ±2.0% | ±2.0% | ±2.0% | ±2.0% | ±2.0% | ±2.0% | ±2.0% | ±2.0% | | | | | | | |
| | LINE REGULATION | ±0.5% | ±0.5% | ±0.3% | ±0.2% | ±0.5% | ±0.5% | ±0.3% | ±0.2% | | | | | | | |
| | LOAD REGULATION | ±0.5% | ±0.5% | ±0.3% | ±0.2% | ±0.5% | ±0.5% | ±0.3% | ±0.2% | | | | | | | |
| | SETUP, RISE TIME | 120ms, 85ms at full load | | | | | | | | | | | | | | |
| HOLD UP TIME (Typ.) | | G type comply with S1 level(3ms) @full load, S2 level(10ms) @80% load; L type comply with S2 level(10ms) @full load | | | | | | | | | | | | | | |
| INPUT | VOLTAGE RANGE CONTINUOUS | 9 ~ 36VDC | | | | 18 ~ 72VDC | | | | | | | | | | |
| | EFFICIENCY (Typ.) | 84% | 85% | 86.5% | 89% | 84% | 86% | 90% | 91% | | | | | | | |
| | DC CURRENT (Typ.) | 1.1A/24V | | | | 0.52A/48V | 0.8A/48V | | | | | | | | | |
| | INRUSH CURRENT (Typ.) | 20A/24VDC | | | | 20A/48VDC | | | | | | | | | | |
| PROTECTION | OVERLOAD | 105 ~ 135% rated output power | | | | | | | | | | | | | | |
| | | Protection type : Constant current limiting, recovers automatically after fault condition is removed | | | | | | | | | | | | | | |
| | OVER VOLTAGE | 3.8 ~ 4.5V | 5.75 ~ 7V | 13.8 ~ 16.2V | 27.6 ~ 32.4V | 3.8 ~ 4.5V | 5.75 ~ 7V | 13.8 ~ 16.2V | 27.6 ~ 32.4V | | | | | | | |
| ENVIRONMENT | WORKING TEMP. | -40 ~ +55°C (no derating) ; +70°C @ 60% load by free air convection ; +70°C (no derating with external base plate) | | | | | | | | | | | | | | |
| | WORKING HUMIDITY | 5 ~ 95% RH non-condensing | | | | | | | | | | | | | | |
| | STORAGE TEMP., HUMIDITY | -40 ~ +85°C, 10 ~ 95% RH non-condensing | | | | | | | | | | | | | | |
| | TEMP. COEFFICIENT | ±0.03%/°C (0 ~ 50°C) | | | | | | | | | | | | | | |
| | VIBRATION | 10 ~ 500Hz, 5G 10min./1cycle, 60min. each along X, Y, Z axes ; Mounting : compliance to IEC61373 | | | | | | | | | | | | | | |
| SAFETY & EMC (Note 4) | SAFETY STANDARDS | Meet IEC60950-1 (LVD) | | | | | | | | | | | | | | |
| | WITHSTAND VOLTAGE | I/P-O/P:4KVDC I/P-FG:2.5KVDC O/P-FG:2.5KVDC | | | | | | | | | | | | | | |
| | ISOLATION RESISTANCE | I/P-O/P, I/P-FG, O/P-FG:100M Ohms / 500VDC / 25°C / 70% RH | | | | | | | | | | | | | | |
| | EMC EMISSION | Parameter | Standard | Test Level / Note | | | | | | | | | | | | |
| | | Conducted | EN55032 | Class A | | | | | | | | | | | | |
| | | Radiated | EN55032 | Class B | | | | | | | | | | | | |
| | | Harmonic Current | EN6100-3-2 | Class A | | | | | | | | | | | | |
| | EMC IMMUNITY | Voltage Flicker | EN6100-3-3 | ----- | | | | | | | | | | | | |
| | | Parameter | Standard | Test Level / Note | | | | | | | | | | | | |
| | | ESD | EN61000-4-2 | Level 3, ±8KV air ; Level 3, ±6KV contact | | | | | | | | | | | | |
| | | Radiated Field | EN61000-4-3 | Level X | | | | | | | | | | | | |
| | | EFT / Burst | EN61000-4-4 | Level 3, 2KV at power | | | | | | | | | | | | |
| | | Surge | EN61000-4-5 | Level 3, 1KV Line-Line, Level 3, 2KV Line-Earth | | | | | | | | | | | | |
| OTHERS | RAILWAY STANDARD | Compliance to EN45545-2 for fire protection ; Meet EN50155 / IEC60571 including IEC61373 for shock & vibration, EN50121-3-2 for EMC | | | | | | | | | | | | | | |
| | MTBF | 396.9K hrs min. MIL-HDBK-217F (25°C) | | | | | | | | | | | | | | |
| NOTE | DIMENSION | 113*60*25mm (L*W*H) | | | | | | | | | | | | | | |
| | PACKING | 0.25Kg; 56pcs/15Kg/0.83CUFT | | | | | | | | | | | | | | |
| | 1. All parameters NOT specially mentioned are measured at 24.48VDC input, rated load and 25°C of ambient temperature. 2. Ripple & noise are measured at 20MHz of bandwidth by using a 12" twisted pair-wire terminated with a 0.1uf & 47uf parallel capacitor. 3. Tolerance : includes set up tolerance, line regulation and load regulation. 4. The power supply is considered a component which will be installed into a final equipment. All the EMC tests are been executed by mounting the unit on a 360mm*360mm metal plate with 1mm of thickness. The final equipment must be re-confirmed that it still meets EMC directives. For guidance on how to perform these EMC tests, please refer to "EMI testing of component power supplies." (as available on http://www.meanwell.com) 5. Strongly recommended that external output capacitance should not exceed 5000uF. | | | | | | | | | | | | | | | |



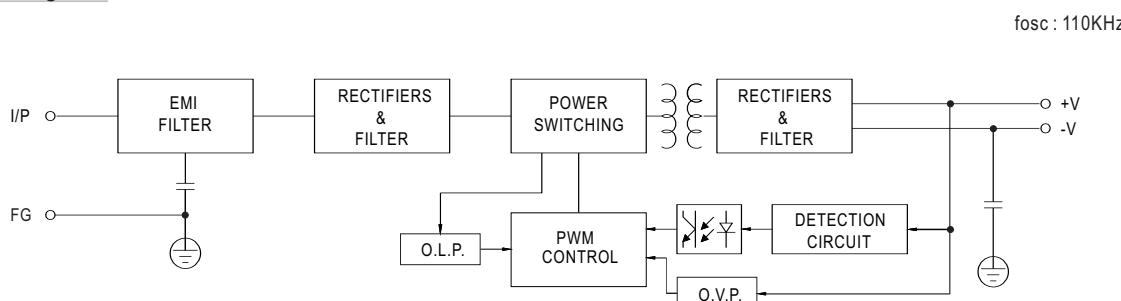
30W Reliable Railway DC-DC Converter

RSD-30 series**SPECIFICATION**

| MODEL | RSD-30H-3.3 | RSD-30H-5 | RSD-30H-12 | RSD-30H-24 |
|-----------------------|--|---|-------------|---|
| OUTPUT | DC VOLTAGE | 3.3V | 5V | 12V |
| | RATED CURRENT | 6A | 6A | 2.5A |
| | CURRENT RANGE | 0 ~ 6A | 0 ~ 6A | 0 ~ 2.5A |
| | RATED POWER | 19.8W | 30W | 30W |
| | RIPPLE & NOISE (max.) Note.2 | 70mVp-p | 70mVp-p | 60mVp-p |
| | VOLTAGE TOLERANCE Note.3 | ±2.0% | ±2.0% | ±2.0% |
| | LINE REGULATION | ±0.5% | ±0.5% | ±0.3% |
| | LOAD REGULATION | ±0.5% | ±0.5% | ±0.3% |
| | SETUP, RISE TIME | 120ms, 85ms at full load | | |
| | HOLD UP TIME (Typ.) | H-type comply with S2 level(10ms) @ full load | | |
| INPUT | VOLTAGE RANGE CONTINUOUS | 40 ~ 160VDC | | |
| | EFFICIENCY (Typ.) | 87% | 89% | 89% |
| | DC CURRENT (Typ.) | 0.23A/110V | 0.35A/110V | |
| | INRUSH CURRENT (Typ.) | 20A/110VDC | | |
| PROTECTION | OVERLOAD | 105 ~ 135% rated output power Protection type : Constant current limiting, recovers automatically after fault condition is removed | | |
| | | 3.8 ~ 4.5V | 5.75 ~ 7V | 13.8 ~ 16.2V |
| ENVIRONMENT | OVER VOLTAGE | 27.6 ~ 32.4V Protection type : Shut down o/p voltage, re-power on to recover | | |
| | | | | |
| SAFETY & EMC (Note 4) | WORKING TEMP. | -40 ~ +55°C (no derating) ; +70°C @ 60% load by free air convection ; +70°C (no derating with external base plate) | | |
| | WORKING HUMIDITY | 5 ~ 95% RH non-condensing | | |
| | STORAGE TEMP., HUMIDITY | -40 ~ +85°C, 10 ~ 95% RH non-condensing | | |
| | TEMP. COEFFICIENT | ±0.03%/°C (0 ~ 50°C) | | |
| | VIBRATION | 10 ~ 500Hz, 5G 10min./1cycle, 60min. each along X, Y, Z axes ; Mounting : compliance to IEC61373 | | |
| | SAFETY STANDARDS | Meet IEC60950-1 (LVD) | | |
| | WITHSTAND VOLTAGE | I/P-O/P:4KVDC I/P-FG:2.5KVDC O/P-FG:2.5KVDC | | |
| | ISOLATION RESISTANCE | I/P-O/P, I/P-FG, O/P-FG:100M Ohms / 500VDC / 25°C / 70% RH | | |
| | EMC EMISSION | Parameter | Standard | Test Level / Note |
| | | Conducted | EN55032 | Class A |
| | | Radiated | EN55032 | Class B |
| | | Harmonic Current | EN6100-3-2 | Class A |
| | EMC IMMUNITY | Voltage Flicker | EN6100-3-3 | ----- |
| | | Parameter | Standard | Test Level / Note |
| | | ESD | EN61000-4-2 | Level 3, ±8KV air ; Level 3, ±6KV contact |
| | | Radiated Field | EN61000-4-3 | Level X |
| | | EFT / Burst | EN61000-4-4 | Level 3, 2KV at power Level 4, 2KV at signal |
| | | Surge | EN61000-4-5 | Level 3, 1KV Line-Line, Level 3, 2KV Line-Earth |
| | | Conducted | EN61000-4-6 | Level 3 |
| OTHERS | RAILWAY STANDARD | Compliance to EN45545-2 for fire protection ; Meet EN50155 / IEC60571 including IEC61373 for shock & vibration, EN50121-3-2 for EMC | | |
| | MTBF | 396.9K hrs min. MIL-HDBK-217F (25°C) | | |
| | DIMENSION | 113*60*25mm (L*W*H) | | |
| NOTE | PACKING | 0.25Kg; 56pcs/15Kg/0.83CUFT | | |
| | 1. All parameters NOT specially mentioned are measured at 110VDC input, rated load and 25°C of ambient temperature. 2. Ripple & noise are measured at 20MHz of bandwidth by using a 12" twisted pair-wire terminated with a 0.1uf & 47uf parallel capacitor. 3. Tolerance : includes set up tolerance, line regulation and load regulation. 4. The power supply is considered a component which will be installed into a final equipment. All the EMC tests are been executed by mounting the unit on a 360mm*360mm metal plate with 1mm of thickness. The final equipment must be re-confirmed that it still meets EMC directives. For guidance on how to perform these EMC tests, please refer to "EMI testing of component power supplies." (as available on http://www.meanwell.com) 5. Strongly recommended that external output capacitance should not exceed 5000uF. | | | |



30W Reliable Railway DC-DC Converter

RSD-30 series**Block Diagram****Input Fuse**

There is one fuse connected in series to the positive input line, which is used to protect against abnormal surge. Fuse specifications of each model are shown as below.

| Type | Fuse Type | Reference and Rating |
|------|-----------|-------------------------|
| G | Time-Lag | CONQUE MST, 6.3A, 250V |
| L | Time-Lag | CONQUE MST, 3.15A, 250V |
| H | Time-Lag | CONQUE MST, 2A, 250V |

Input Reverse Polarity Protection

There is a MOSFET connected in series to the negative input line. If the input polarity is connected reversely, the MOSFET opens and there will be no output to protect the unit.

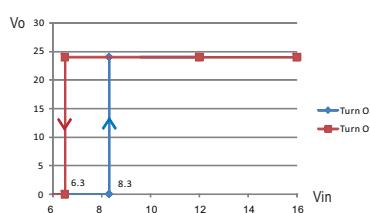
Input Range and Transient Ability

The series has a wide range input capability. With $\pm 40\%$ of rated input voltage, it can withstand that for 1 second.

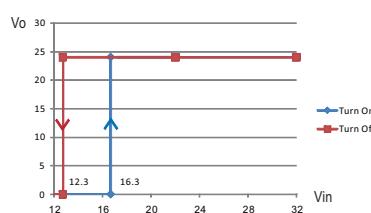
Input Under-Voltage Protection

If input voltage drops below V_{min} , the internal control IC shuts down and there is no output voltage. It recovers automatically when input voltage reaches above V_{min} , please refer to the curve below.

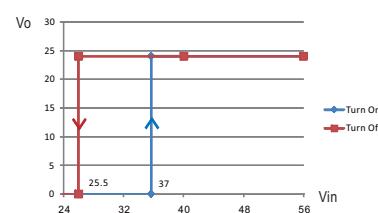
RSD-30G-24



RSD-30L-24



RSD-30H-24

**Inrush Current**

Inrush current is suppressed by a resistor during the initial start-up, and then the resistor is bypassed by a MOSFET to reduce power consumption after accomplishing the start-up.



30W Reliable Railway DC-DC Converter

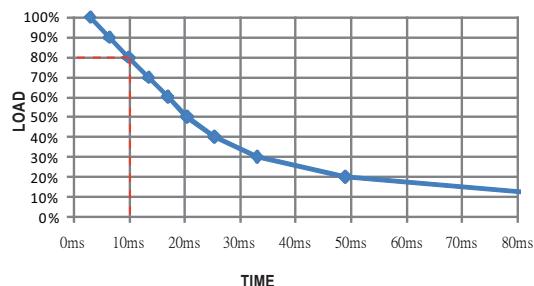
RSD-30 series

■ Hold-up Time

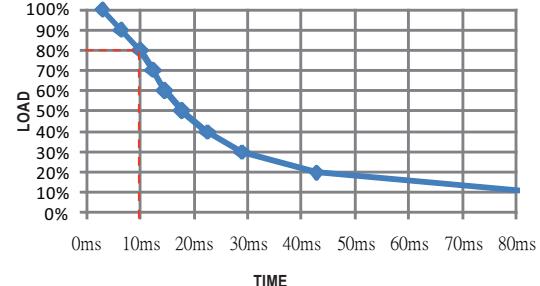
H type is in compliance with S2 level (10ms), while G and L types are in compliance with S1 level (3ms) at full load output condition.

To fulfil the requirements of S2 level (10ms), G types require de-rating their output load to 80%, please refer to the curve diagrams below.

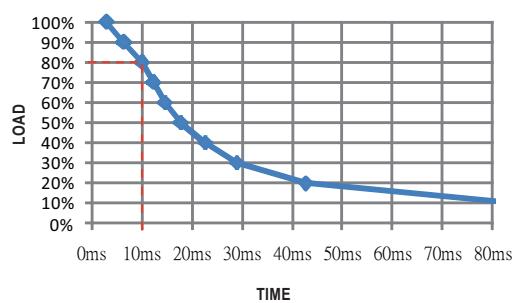
RSD-30G-3.3



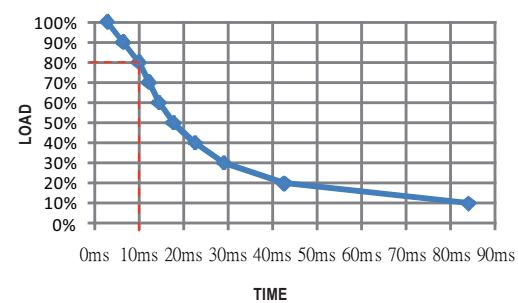
RSD-30G-5



RSD-30G-12



RSD-30G-24



■ Output Voltage Adjustment

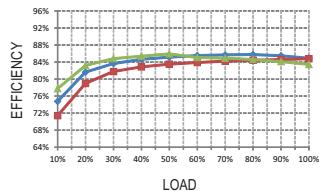
This function is optional, which the standard product does not have it. If you do need the function, please contact MW for details.

30W Reliable Railway DC-DC Converter

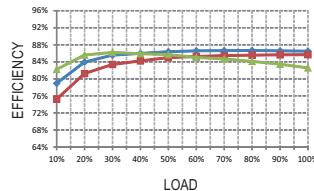
Efficiency vs Load & Vin Curve

The efficiency vs load & Vin curves of each model are shown as below.

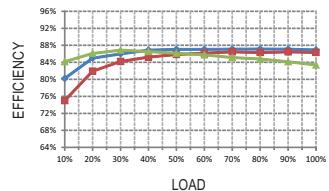
RSD-30G-3.3



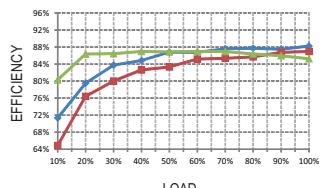
RSD-30G-5



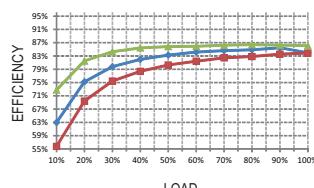
RSD-30G-12



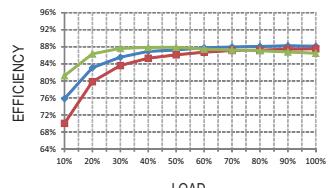
RSD-30G-24



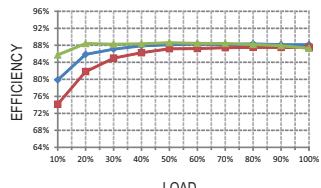
RSD-30L-3.3



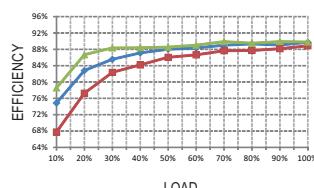
RSD-30L-5



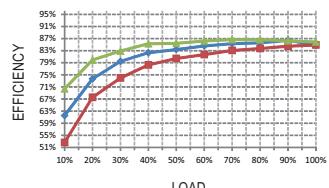
RSD-30L-12



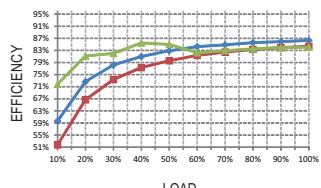
RSD-30L-24



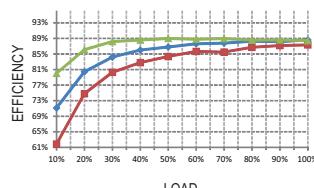
RSD-30H-3.3



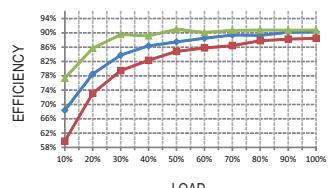
RSD-30H-5



RSD-30H-12



RSD-30H-24

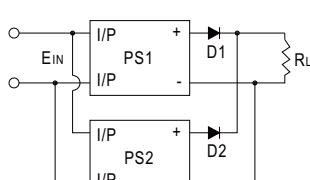


Parallel and Series Connection

A. Operation in Parallel

Since RSD-30 series don't have built-in parallel circuit, it can only use external circuits to achieve the redundant operation but not increase the current rating.

- Add a diode at the positive-output of each power supply (as shown as below), the current rating of the diode should be larger than the maximum output current rating and attached to a suitable heat sink. This is only for redundant use (increase the reliability of the system) and users have to check suitability of the circuit by themselves.

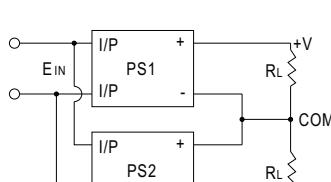


- When using S.P.S. in parallel connection, the leakage current will increase at the same time. This could pose as a shock hazard for the user. So please contact the supplier if you have this kind of application.

B. Operation in Series

RSD-30 can be operated in series. Here are the methods of doing it:

- Positive and negative terminals are connected as shown as below. According to the connection, you can get the positive and negative output voltages for your loads.

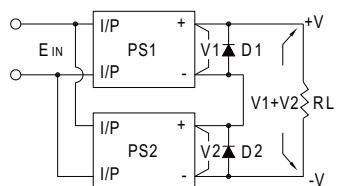




30W Reliable Railway DC-DC Converter

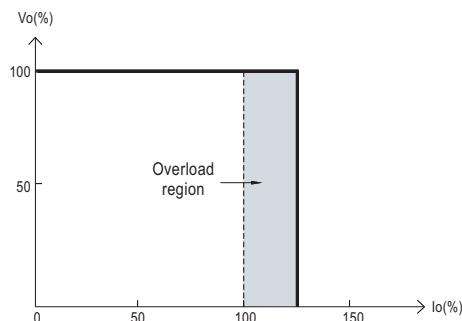
RSD-30 series

2.Increase the output voltage (current does not change). Because RSD-30 series have no reverse blocking diode in the unit, you should add an external blocking diode to prevent the damage of every unit while starting up. The voltage rating of the external diode should be larger than V_1+V_2 (as shown as below).



■ Overload Protection

If the output draw up to 105~135% of its output power rating, the converter will go into overload protection which is constant current mode. After the faulty condition is removed, it will recover automatically. Please refer to the diagram below for the detail operation characteristic. Please note that it's not suitable to operate within the overload region continuously, or it may cause to over temperature and reduce the life of the power supply unit or even damage it.



■ Over Voltage Protection

The converter shuts off to protect itself when the output voltage drawn exceeds 115~140% of its output rating. It must be repowered on to recover.

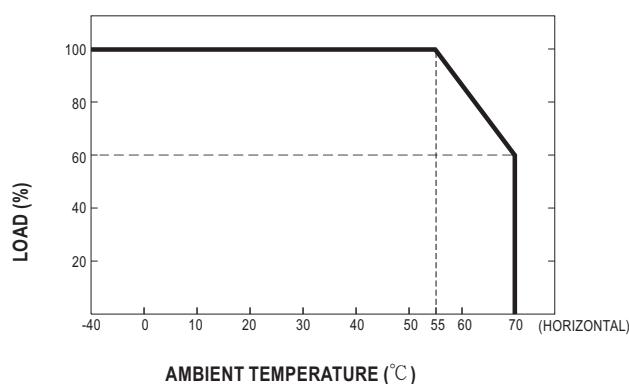
■ LED Indicator

Equipped with a built-in LED indicator, the converter provides an easy way for users to check its condition through the LED indicator.
Green : normal operation; No signal: no power or failure.

■ Derating Curve

a.Single unit operation

If the unit has no iron plate mounted on its bottom, the maximum ambient temperature for the unit will be 55°C as operating under full load condition. It requires de-rating output current when ambient temperature is between 55~70°C, please refer to the de-rating curve as below.

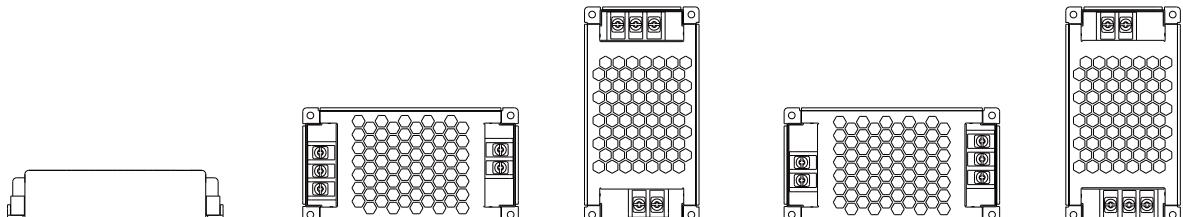




30W Reliable Railway DC-DC Converter

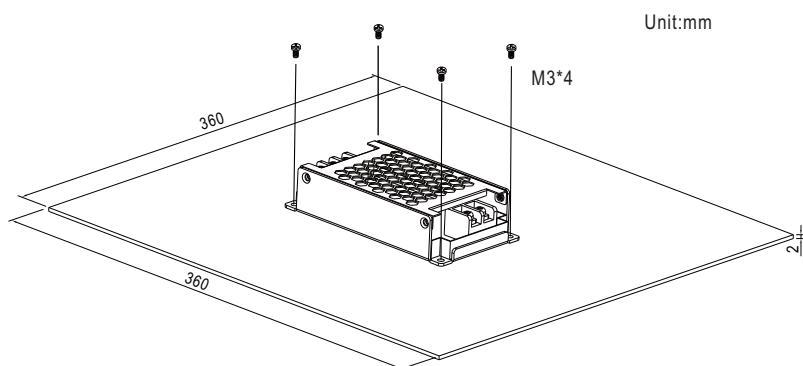
RSD-30 series

Suitable installation methods are shown as below. Since RSD-30 is a semi-potted model, its thermal performances for the following installation methods are similar and share the same derating curve.

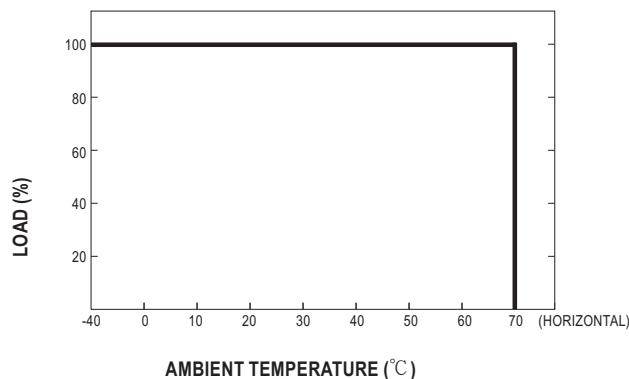


b. Operate with additional iron plate

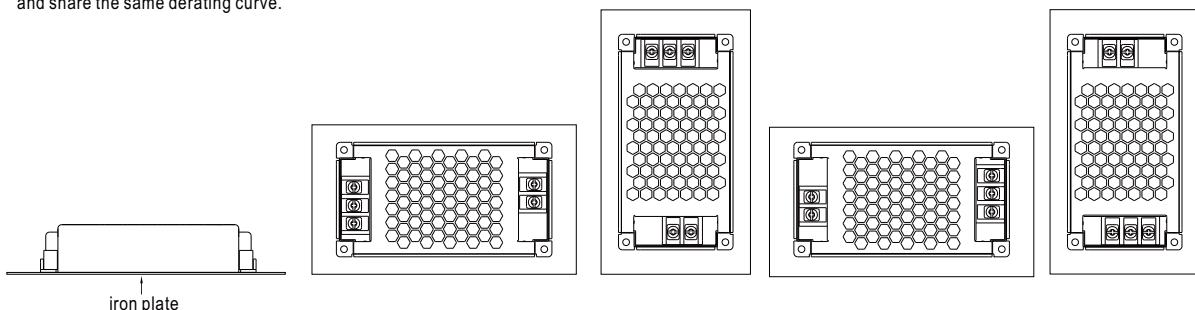
If it is necessary to fulfil the requirements of EN50155 TX level that operate the unit fully-loaded at 70°C, RSD-30 series must be installed onto an iron plate on the bottom. The size of the suggested iron plate is shown as below. In order for optimal thermal performance, the iron plate must have an even & smooth surface and RSD-30 series must be firmly mounted at the center of the iron plate.



The load vs ambient temperature curve is shown as below.



Suitable installation methods are shown as below. Since RSD-30 is a semi-potted model, its thermal performances for the following installation methods are similar and share the same derating curve.





30W Reliable Railway DC-DC Converter

RSD-30 series

■ Immunity to Environmental Conditions

| Test method | Standard | Test conditions | Status |
|------------------------------|---|---|-----------|
| Cooling Test | EN 50155 section 12.2.3 (Column 2, Class TX) EN 60068-2-1 | Temperature: -40°C Dwell Time: 2 hrs/cycle | No damage |
| Dry Heat Test | EN 50155 section 12.2.4 (Column 2, Class TX) EN 50155 section 12.2.4 (Column 3, Class TX & Column 4, Class TX) EN 60068-2-2 | Temperature: 70°C / 85°C Duration: 6 hrs / 10min | PASS |
| Damp Heat Test, Cyclic | EN 50155 section 12.2.5 EN 60068-2-30 | Temperature: 25°C ~ 55°C Humidity: 90% ~ 100% RH Duration: 48 hrs | PASS |
| Vibration Test | EN 50155 section 12.2.11 EN 61373 | Temperature: 19°C Humidity: 65% Duration: 10 mins | PASS |
| Increased Vibration Test | EN 50155 section 12.2.11 EN 61373 | Temperature: 19°C Humidity: 65% Duration: 5 hrs | PASS |
| Shock Test | EN 50155 section 12.2.11 EN 61373 | Temperature: 21 ± 3°C Humidity: 65 ± 5% Duration: 30ms * 18 | PASS |
| Low Temperature Storage Test | EN 50155 section 12.2.3 (Column 2, Class TX) EN 60068-2-1 | Temperature: -40°C Dwell Time: 16 hrs | PASS |
| Salt Mist Test | EN 50155 section 12.2.10 (Class ST4) | Temperature: 35°C ± 2°C Duration: 96 hrs | PASS |

■ EN45545-2 Fire Test Conditions

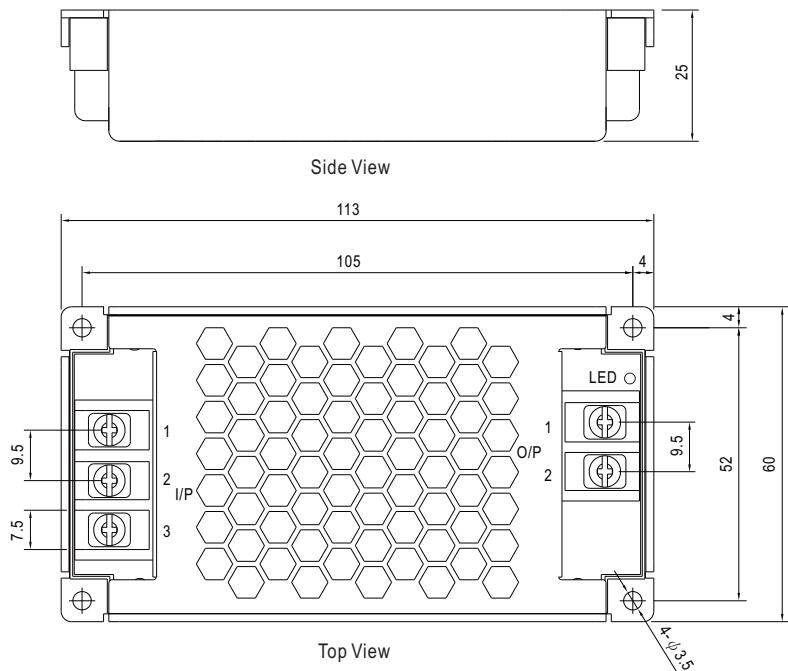
| Test Items | | Hazard Level | | | |
|------------|---------------------|---|------|------|------|
| Items | | Standard | HL1 | HL2 | |
| R24 | Oxygen index test | EN 45545-2:2013+A1:2015 EN ISO 4589-2:1996 | PASS | PASS | PASS |
| R25 | Glow-wire test | EN 45545-2:2013+A1:2015 EN 60695-2-11:2000 | PASS | PASS | PASS |
| R26 | Vertical flame test | EN 45545-2:2013+A1:2015 EN 60695-11:2003 | PASS | PASS | PASS |



30W Reliable Railway DC-DC Converter

RSD-30 series**■ Mechanical Specification**

Case No.253A Unit:mm



Input Terminal Pin No. Assignment :

| Pin No. | Assignment |
|---------|-------------|
| 1 | DC INPUT V+ |
| 2 | DC INPUT V- |
| 3 | FG \pm |

Output Terminal Pin No. Assignment :

| Pin No. | Assignment |
|---------|--------------|
| 1 | DC OUTPUT -V |
| 2 | DC OUTPUT +V |

■ Installation ManualPlease refer to : <http://www.meanwell.com/manual.html>

File Name:RSD-30-SPEC 2017-02-22

0.2 Mean Well SD-350C-12



350W Single Output DC-DC Converter

SD-350 series



■ Features :

- 2:1 wide input range
- Protections: Short circuit / Overload / Over voltage / Over temperature
- 1500VAC I/O isolation
- Forced air cooling by built-in DC Fan
- 100% full load burn-in test
- 24V and 48V input voltage design refer to LVD
- 2 years warranty



EN62368-1



IEC62368-1



SPECIFICATION

| MODEL | SD-350B | | | | SD-350C | | | | |
|--|------------------------------|--|--|---------------|--------------|--------------|--------------|------------|--------------|
| OUTPUT | DC VOLTAGE | 5V | 12V | 24V | 48V | 5V | 12V | 24V | 48V |
| | RATED CURRENT | 57A | 27.5A | 14.6A | 7.3A | 60A | 27.5A | 14.6A | 7.3A |
| | CURRENT RANGE | 0 ~ 57A | 0 ~ 27.5A | 0 ~ 14.6A | 0 ~ 7.3A | 0 ~ 60A | 0 ~ 27.5A | 0 ~ 14.6A | 0 ~ 7.3A |
| | RATED POWER | 285W | 330W | 350.4W | 350.4W | 300W | 330W | 350.4W | 350.4W |
| | ripple & noise (max.) Note.2 | 100mVp-p | 120mVp-p | 150mVp-p | 200mVp-p | 100mVp-p | 120mVp-p | 150mVp-p | 200mVp-p |
| | VOLTAGE ADJ. RANGE | 4.5 ~ 5.5VDC | 11 ~ 16VDC | 23 ~ 30VDC | 43 ~ 53VDC | 4.5 ~ 5.5VDC | 11 ~ 16VDC | 23 ~ 30VDC | 43 ~ 53VDC |
| | VOLTAGE TOLERANCE Note.3 | ±2.0% | ±1.0% | ±1.0% | ±1.0% | ±2.0% | ±1.0% | ±1.0% | ±1.0% |
| | LINER REGULATION | ±0.5% | ±0.3% | ±0.2% | ±0.2% | ±0.5% | ±0.3% | ±0.2% | ±0.2% |
| | LOAD REGULATION | ±1.0% | ±1.0% | ±1.0% | ±1.0% | ±1.0% | ±1.0% | ±1.0% | ±1.0% |
| INPUT | SETUP, RISE TIME | 300ms, 50ms at full load | | | | | | | |
| | VOLTAGE RANGE | B:19 ~ 36VDC | C:36 ~ 72VDC | D:72 ~ 144VDC | | | | | |
| | EFFICIENCY (Typ.) | 74% | 80% | 80% | 84% | 76% | 81% | 81% | 82% |
| | DC CURRENT (Typ.) | 14.4A/24V | 16A/24V | 17.6A/24V | 17.6A/24V | 7.6A/48V | 8.8A/48V | 9.0A/48V | 9.0A/48V |
| | INRUSH CURRENT (Typ.) | C:45A/48VDC D:45A/96VDC | | | | | | | |
| | PROTECTION | OVERLOAD | 105 ~ 135% rated output power Protection type : Shut down o/p voltage, re-power on to recover | | | | | | |
| | | OVER VOLTAGE | 5.75 ~ 6.75V | 16.8 ~ 20V | 31.5 ~ 37.5V | 53 ~ 65V | 5.75 ~ 6.75V | 16.8 ~ 20V | 31.5 ~ 37.5V |
| | OVER TEMPERATURE | Protection type : Shut down o/p voltage, re-power on to recover | | | | | | | |
| ENVIRONMENT | WORKING TEMP. | -20 ~ +60°C (Refer to "Derating Curve") | | | | | | | |
| | WORKING HUMIDITY | 20 ~ 90% RH non-condensing | | | | | | | |
| | STORAGE TEMP., HUMIDITY | -40 ~ +85°C, 10 ~ 95% RH | | | | | | | |
| | TEMP. COEFFICIENT | ±0.03%/°C (0 ~ 50°C) | | | | | | | |
| | VIBRATION | 10 ~ 500Hz, 2G 10min./1cycle, 60min. each along X, Y, Z axes | | | | | | | |
| SAFETY & EMC (Note 4) | SAFETY STANDARDS | IEC62368-1 CB approved by TUV (for D type only), EAC TP TC 004 approved | | | | | | | |
| | WITHSTAND VOLTAGE | I/P-O/P:1.5KVAC I/P-FG:2KVAC O/P-FG:0.5KVAC | | | | | | | |
| | ISOLATION RESISTANCE | I/P-O/P, I/P-FG, O/P-FG:100M Ohms / 500VDC / 25°C/ 70% RH | | | | | | | |
| | EMC EMISSION | Compliance to EN55032 (CISPR32) Class B, EAC TP TC 020 | | | | | | | |
| OTHERS | EMC IMMUNITY | Compliance to EN61000-4-2,3,4,6,8, light industry level, criteria A, EAC TP TC 020 | | | | | | | |
| | MTBF | 209.4K hrs min. MIL-HDBK-217F (25°C) | | | | | | | |
| | DIMENSION | 215*115*50mm (L*W*H) | | | | | | | |
| NOTE | PACKING | 1.1Kg; 12pcs/14.4Kg/0.92CUFT | | | | | | | |
| 1. All parameters NOT specially mentioned are measured at 24,48,96VDC input, rated load and 25°C of ambient temperature. 2. Ripple & noise are measured at 20MHz of bandwidth by using a 12" twisted pair-wire terminated with a 0.1uf & 47uf parallel capacitor. 3. Tolerance : includes set up tolerance, line regulation and load regulation. 4. The power supply is considered a component which will be installed into a final equipment. All the EMC tests are been executed by mounting the unit on a 360mm*360mm metal plate with 1mm of thickness. The final equipment must be re-confirmed that it still meets EMC directives. For guidance on how to perform these EMC tests, please refer to "EMI testing of component power supplies." (as available on http://www.meanwell.com) 5. The ambient temperature derating of 3.5°C/1000m with fanless models and of 5°C/1000m with fan models for operating altitude higher than 2000m(6500ft). | | | | | | | | | |

File Name:SD-350-SPEC 2020-03-37



350W Single Output DC-DC Converter

SD-350 series

■ Features :

- 2:1 wide input range
- Protections: Short circuit / Overload / Over voltage / Over temperature
- 1500VAC I/O isolation
- Forced air cooling by built-in DC Fan
- 100% full load burn-in test
- 24V(B) and 48V(C) input voltage design refer to LVD
- 2 years warranty

**CB** (for D type only)
IEC62368-1**SPECIFICATION**

| MODEL | SD-350D | | | |
|--------------------------|--|--|--------------|----------------|
| OUTPUT | DC VOLTAGE | 5V | 12V | 24V |
| | RATED CURRENT | 60A | 29.2A | 14.6A |
| | CURRENT RANGE | 0 ~ 60A | 0 ~ 29.2A | 0 ~ 14.6A |
| | RATED POWER | 300W | 350.4W | 350.4W |
| | RIPPLE & NOISE (max.) Note.2 | 100mVp-p | 120mVp-p | 150mVp-p |
| | VOLTAGE ADJ. RANGE | 4.5 ~ 5.5VDC | 11 ~ 16VDC | 23 ~ 30VDC |
| | VOLTAGE TOLERANCE Note.3 | ±2.0% | ±1.0% | ±1.0% |
| | LINE REGULATION | ±0.5% | ±0.3% | ±0.2% |
| | LOAD REGULATION | ±1.0% | ±1.0% | ±1.0% |
| | SETUP, RISE TIME | 300ms, 50ms at full load | | |
| INPUT | VOLTAGE RANGE | B:19 ~ 36VDC | C:36 ~ 72VDC | D:72 ~ 144VDC |
| | EFFICIENCY (Typ.) | 78% | 83% | 87% |
| | DC CURRENT (Typ.) | 6A/96V | 6A/96V | 6A/96V |
| | INRUSH CURRENT (Typ.) | C:45A/48VDC | D:45A/96VDC | |
| PROTECTION | OVERLOAD | 105 ~ 135% rated output power | | |
| | | Protection type : Shut down o/p voltage, re-power on to recover | | |
| | OVER VOLTAGE | 5.75 ~ 6.75V | 16.8 ~ 20V | 31.5 ~ 37.5V |
| | | Protection type : Shut down o/p voltage, re-power on to recover | | |
| ENVIRONMENT | OVER TEMPERATURE | Shut down o/p voltage, recovers automatically after temperature goes down | | |
| | WORKING TEMP. | -20 ~ +60°C (Refer to "Derating Curve") | | |
| | WORKING HUMIDITY | 20 ~ 90% RH non-condensing | | |
| | STORAGE TEMP., HUMIDITY | -40 ~ +85°C, 10 ~ 95% RH | | |
| | TEMP. COEFFICIENT | ±0.03%/°C (0 ~ 50°C) | | |
| SAFETY & EMC (Note 4) | VIBRATION | 10 ~ 500Hz, 2G 10min./cycle, 60min. each along X, Y, Z axes | | |
| | SAFETY STANDARDS | IEC62368-1 CB approved by TUV (for D type only), EAC TP TC 004 approved | | |
| | WITHSTAND VOLTAGE | I/P-O/P:1.5KVAC | I/P-FG:2KVAC | O/P-FG:0.5KVAC |
| | ISOLATION RESISTANCE | I/P-O/P, I/P-FG, O/P-FG:100M Ohms / 500VDC / 25°C/ 70% RH | | |
| | EMC EMISSION | Compliance to EN55022 (CISPR22) Class B, EAC TP TC 020 | | |
| OTHERS | EMC IMMUNITY | Compliance to EN61000-4-2,3,4,6,8, light industry level, criteria A, EAC TP TC 020 | | |
| | MTBF | 209.4K hrs min. MIL-HDBK-217F (25°C) | | |
| | DIMENSION | 215*115*50mm (L*W*H) | | |
| NOTE | PACKING | 1.1Kg; 12pcs/14.4Kg/0.92CUFT | | |
| | 1. All parameters NOT specially mentioned are measured at 24,48,96VDC input, rated load and 25°C of ambient temperature. 2. Ripple & noise are measured at 20MHz of bandwidth by using a 12" twisted pair-wire terminated with a 0.1uf & 47uf parallel capacitor. 3. Tolerance : includes set up tolerance, line regulation and load regulation. 4. The power supply is considered a component which will be installed into a final equipment. All the EMC tests are been executed by mounting the unit on a 360mm*360mm metal plate with 1mm of thickness. The final equipment must be re-confirmed that it still meets EMC directives. For guidance on how to perform these EMC tests, please refer to "EMI testing of component power supplies." (as available on http://www.meanwell.com) 5. The ambient temperature derating of 3.5°C/1000m with fanless models and of 5°C/1000m with fan models for operating altitude higher than 2000m(6500ft). | | | |

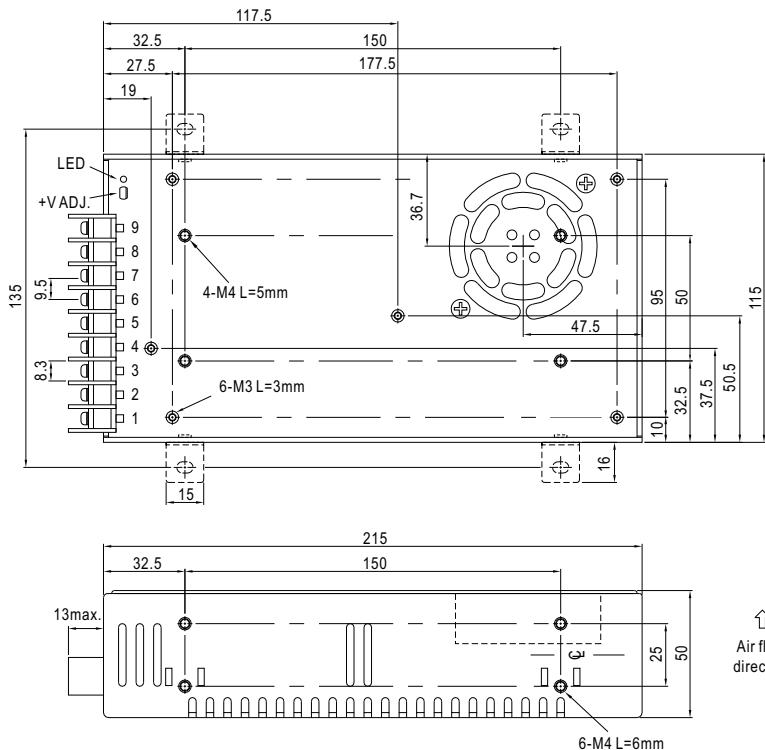


350W Single Output DC-DC Converter

SD-350 series

■ Mechanical Specification

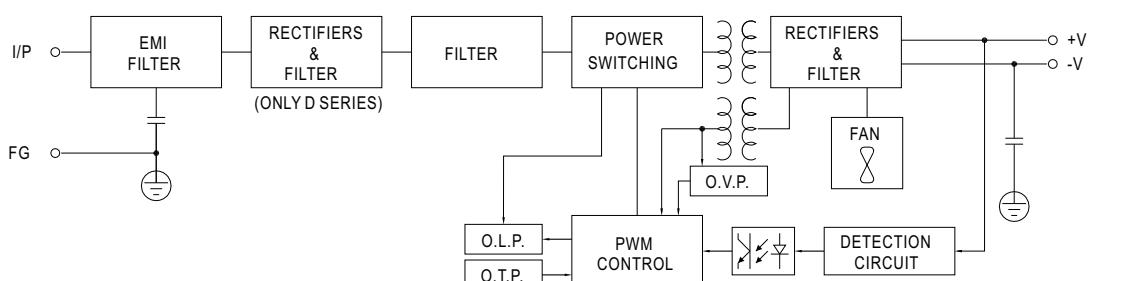
Case No. 912B Unit:mm



Terminal Pin No. Assignment:

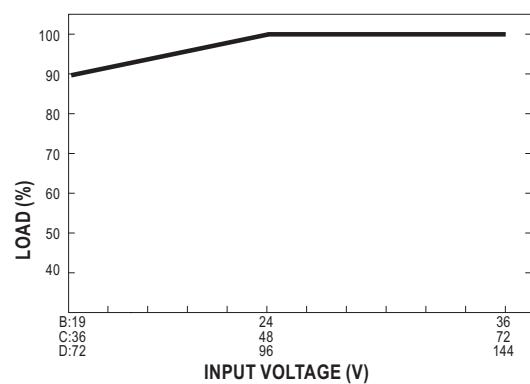
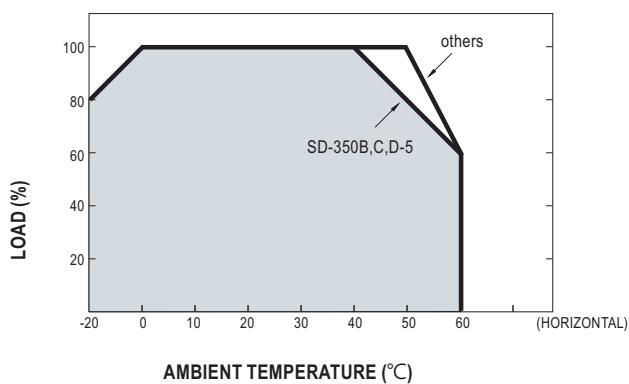
| Pin No. | Assignment | Pin No. | Assignment |
|---------|-------------|---------|--------------|
| 1 | DC INPUT V+ | 4,5,6 | DC OUTPUT V- |
| 2 | DC INPUT V- | 7,8,9 | DC OUTPUT V+ |
| 3 | FG \pm | | |

■ Block Diagram



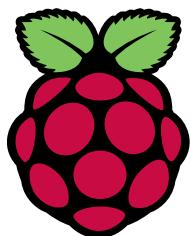
■ Derating Curve

■ Static Characteristics



0.3 Raspberry Pi 4 Model B

DATASHEET



Raspberry Pi 4 Model B

Release 1

June 2019

Copyright 2019 Raspberry Pi (Trading) Ltd. All rights reserved.



Raspberry Pi 4 Model B Datasheet
Copyright Raspberry Pi (Trading) Ltd. 2019

Table 1: Release History

| Release | Date | Description |
|---------|------------|---------------|
| 1 | 21/06/2019 | First release |

The latest release of this document can be found at <https://www.raspberrypi.org>



Contents

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | Introduction | 5 |
| 2 | Features | 6 |
| 2.1 | Hardware | 6 |
| 2.2 | Interfaces | 6 |
| 2.3 | Software | 7 |
| 3 | Mechanical Specification | 7 |
| 4 | Electrical Specification | 7 |
| 4.1 | Power Requirements | 9 |
| 5 | Peripherals | 9 |
| 5.1 | GPIO Interface | 9 |
| 5.1.1 | GPIO Pin Assignments | 9 |
| 5.1.2 | GPIO Alternate Functions | 10 |
| 5.1.3 | Display Parallel Interface (DPI) | 11 |
| 5.1.4 | SD/SDIO Interface | 11 |
| 5.2 | Camera and Display Interfaces | 11 |
| 5.3 | USB | 11 |
| 5.4 | HDMI | 11 |
| 5.5 | Audio and Composite (TV Out) | 11 |
| 5.6 | Temperature Range and Thermals | 11 |
| 6 | Availability | 12 |
| 7 | Support | 12 |



List of Figures

| | | |
|---|--------------------------------------|---|
| 1 | Mechanical Dimensions | 7 |
| 2 | Digital IO Characteristics | 8 |
| 3 | GPIO Connector Pinout | 9 |



List of Tables

| | | |
|---|---|----|
| 1 | Release History | 1 |
| 2 | Absolute Maximum Ratings | 8 |
| 3 | DC Characteristics | 8 |
| 4 | Digital I/O Pin AC Characteristics | 8 |
| 5 | Raspberry Pi 4 GPIO Alternate Functions | 10 |



Raspberry Pi 4 Model B Datasheet
Copyright Raspberry Pi (Trading) Ltd. 2019

1 Introduction

The Raspberry Pi 4 Model B (Pi4B) is the first of a new generation of Raspberry Pi computers supporting more RAM and with significantly enhanced CPU, GPU and I/O performance; all within a similar form factor, power envelope and cost as the previous generation Raspberry Pi 3B+.

The Pi4B is available with either 1, 2 and 4 Gigabytes of LPDDR4 SDRAM.



2 Features

2.1 Hardware

- Quad core 64-bit ARM-Cortex A72 running at 1.5GHz
- 1, 2 and 4 Gigabyte LPDDR4 RAM options
- H.265 (HEVC) hardware decode (up to 4Kp60)
- H.264 hardware decode (up to 1080p60)
- VideoCore VI 3D Graphics
- Supports dual HDMI display output up to 4Kp60

2.2 Interfaces

- 802.11 b/g/n/ac Wireless LAN
- Bluetooth 5.0 with BLE
- 1x SD Card
- 2x micro-HDMI ports supporting dual displays up to 4Kp60 resolution
- 2x USB2 ports
- 2x USB3 ports
- 1x Gigabit Ethernet port (supports PoE with add-on PoE HAT)
- 1x Raspberry Pi camera port (2-lane MIPI CSI)
- 1x Raspberry Pi display port (2-lane MIPI DSI)
- 28x user GPIO supporting various interface options:
 - Up to 6x UART
 - Up to 6x I2C
 - Up to 5x SPI
 - 1x SDIO interface
 - 1x DPI (Parallel RGB Display)
 - 1x PCM
 - Up to 2x PWM channels
 - Up to 3x GPCLK outputs



2.3 Software

- ARMv8 Instruction Set
 - Mature Linux software stack
 - Actively developed and maintained
 - Recent Linux kernel support
 - Many drivers upstreamed
 - Stable and well supported userland
 - Availability of GPU functions using standard APIs

3 Mechanical Specification

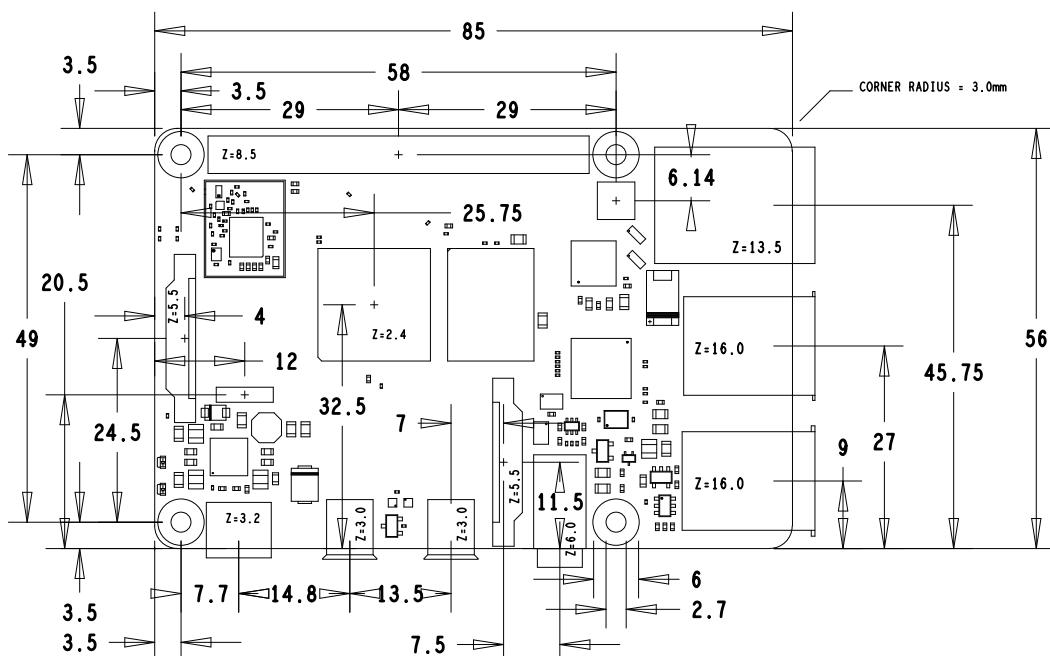


Figure 1: Mechanical Dimensions

4 Electrical Specification

Caution! Stresses above those listed in Table 2 may cause permanent damage to the device. This is a stress rating only; functional operation of the device under these or any other conditions above those listed in the operational sections of this specification is not implied. Exposure to absolute maximum rating conditions for extended periods may affect device reliability.



| Symbol | Parameter | Minimum | Maximum | Unit |
|--------|------------------|---------|---------|------|
| VIN | 5V Input Voltage | -0.5 | 6.0 | V |

Table 2: Absolute Maximum Ratings

Please note that VDD_IO is the GPIO bank voltage which is tied to the on-board 3.3V supply rail.

| Symbol | Parameter | Conditions | Minimum | Typical | Maximum | Unit |
|----------|----------------------------------|------------------------------|---------|---------|---------|------------|
| V_{IL} | Input low voltage ^a | $VDD_IO = 3.3V$ | - | - | TBD | V |
| V_{IH} | Input high voltage ^a | $VDD_IO = 3.3V$ | TBD | - | - | V |
| I_{IL} | Input leakage current | $TA = +85^{\circ}C$ | - | - | TBD | μA |
| C_{IN} | Input capacitance | - | - | TBD | - | pF |
| V_{OL} | Output low voltage ^b | $VDD_IO = 3.3V, IOL = -2mA$ | - | - | TBD | V |
| V_{OH} | Output high voltage ^b | $VDD_IO = 3.3V, IOH = 2mA$ | TBD | - | - | V |
| I_{OL} | Output low current ^c | $VDD_IO = 3.3V, VO = 0.4V$ | TBD | - | - | mA |
| I_{OH} | Output high current ^c | $VDD_IO = 3.3V, VO = 2.3V$ | TBD | - | - | mA |
| R_{PU} | Pullup resistor | - | TBD | - | TBD | k Ω |
| R_{PD} | Pulldown resistor | - | TBD | - | TBD | k Ω |

^a Hysteresis enabled

^b Default drive strength (8mA)

^c Maximum drive strength (16mA)

Table 3: DC Characteristics

| Pin Name | Symbol | Parameter | Minimum | Typical | Maximum | Unit |
|-----------------|------------|-------------------------------|---------|---------|---------|------|
| Digital outputs | t_{rise} | 10-90% rise time ^a | - | TBD | - | ns |
| Digital outputs | t_{fall} | 90-10% fall time ^a | - | TBD | - | ns |

^a Default drive strength, $CL = 5pF, VDD_IO = 3.3V$

Table 4: Digital I/O Pin AC Characteristics



Figure 2: Digital IO Characteristics



4.1 Power Requirements

The Pi4B requires a good quality USB-C power supply capable of delivering 5V at 3A. If attached downstream USB devices consume less than 500mA, a 5V, 2.5A supply may be used.

5 Peripherals

5.1 GPIO Interface

The Pi4B makes 28 BCM2711 GPIOs available via a standard Raspberry Pi 40-pin header. This header is backwards compatible with all previous Raspberry Pi boards with a 40-way header.

5.1.1 GPIO Pin Assignments

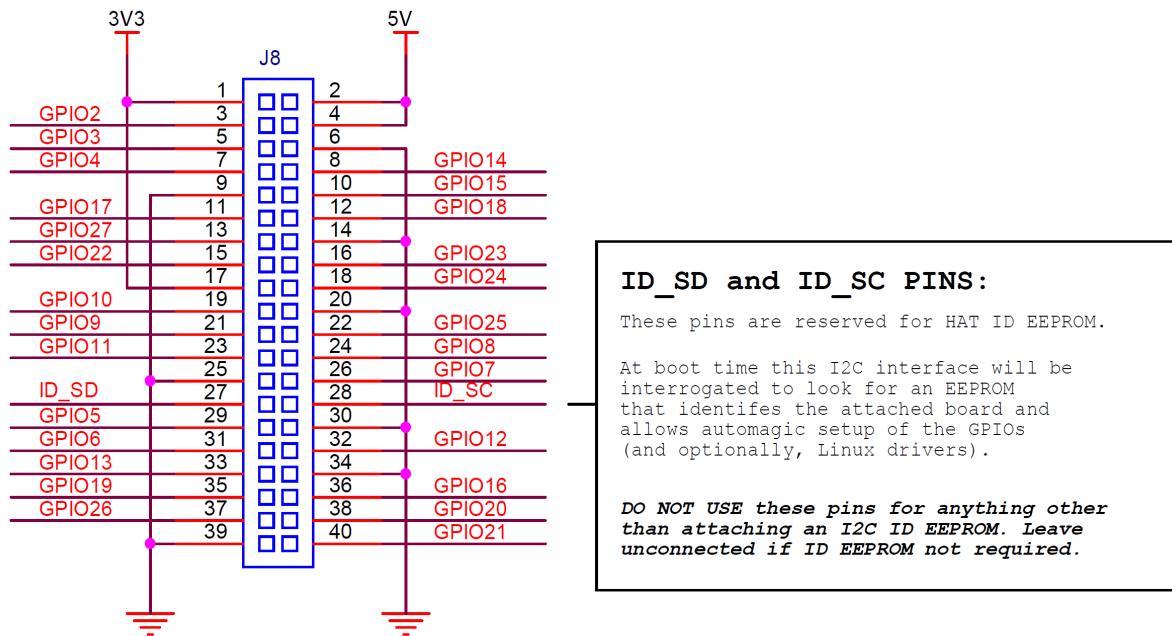


Figure 3: GPIO Connector Pinout

As well as being able to be used as straightforward software controlled input and output (with programmable pulls), GPIO pins can be switched (multiplexed) into various other modes backed by dedicated peripheral blocks such as I2C, UART and SPI.

In addition to the standard peripheral options found on legacy Pis, extra I2C, UART and SPI peripherals have been added to the BCM2711 chip and are available as further mux options on the Pi4. This gives users much more flexibility when attaching add-on hardware as compared to older models.



5.1.2 GPIO Alternate Functions

| GPIO | Pull | Default | | | | | |
|-------------|-------------|----------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| | | ALT0 | ALT1 | ALT2 | ALT3 | ALT4 | ALT5 |
| 0 | High | SDA0 | SA5 | PCLK | SPI3_CE0_N | TXD2 | SDA6 |
| 1 | High | SCL0 | SA4 | DE | SPI3_MISO | RXD2 | SCL6 |
| 2 | High | SDA1 | SA3 | LCD_VSYNC | SPI3_MOSI | CTS2 | SDA3 |
| 3 | High | SCL1 | SA2 | LCD_HSYNC | SPI3_SCLK | RTS2 | SCL3 |
| 4 | High | GPCLK0 | SA1 | DPI_D0 | SPI4_CE0_N | TXD3 | SDA3 |
| 5 | High | GPCLK1 | SA0 | DPI_D1 | SPI4_MISO | RXD3 | SCL3 |
| 6 | High | GPCLK2 | SOE_N | DPI_D2 | SPI4_MOSI | CTS3 | SDA4 |
| 7 | High | SPI0_CE1_N | SWE_N | DPI_D3 | SPI4_SCLK | RTS3 | SCL4 |
| 8 | High | SPI0_CE0_N | SD0 | DPI_D4 | - | TXD4 | SDA4 |
| 9 | Low | SPI0_MISO | SD1 | DPI_D5 | - | RXD4 | SCL4 |
| 10 | Low | SPI0_MOSI | SD2 | DPI_D6 | - | CTS4 | SDA5 |
| 11 | Low | SPI0_SCLK | SD3 | DPI_D7 | - | RTS4 | SCL5 |
| 12 | Low | PWM0 | SD4 | DPI_D8 | SPI5_CE0_N | TXD5 | SDA5 |
| 13 | Low | PWM1 | SD5 | DPI_D9 | SPI5_MISO | RXD5 | SCL5 |
| 14 | Low | TXD0 | SD6 | DPI_D10 | SPI5_MOSI | CTS5 | TXD1 |
| 15 | Low | RXD0 | SD7 | DPI_D11 | SPI5_SCLK | RTS5 | RXD1 |
| 16 | Low | FL0 | SD8 | DPI_D12 | CTS0 | SPI1_CE2_N | CTS1 |
| 17 | Low | FL1 | SD9 | DPI_D13 | RTS0 | SPI1_CE1_N | RTS1 |
| 18 | Low | PCM_CLK | SD10 | DPI_D14 | SPI6_CE0_N | SPI1_CE0_N | PWM0 |
| 19 | Low | PCM_FS | SD11 | DPI_D15 | SPI6_MISO | SPI1_MISO | PWM1 |
| 20 | Low | PCM_DIN | SD12 | DPI_D16 | SPI6_MOSI | SPI1_MOSI | GPCLK0 |
| 21 | Low | PCM_DOUT | SD13 | DPI_D17 | SPI6_SCLK | SPI1_SCLK | GPCLK1 |
| 22 | Low | SD0_CLK | SD14 | DPI_D18 | SD1_CLK | ARM_TRST | SDA6 |
| 23 | Low | SD0_CMD | SD15 | DPI_D19 | SD1_CMD | ARM_RTCK | SCL6 |
| 24 | Low | SD0_DAT0 | SD16 | DPI_D20 | SD1_DAT0 | ARM_TDO | SPI3_CE1_N |
| 25 | Low | SD0_DAT1 | SD17 | DPI_D21 | SD1_DAT1 | ARM_TCK | SPI4_CE1_N |
| 26 | Low | SD0_DAT2 | TE0 | DPI_D22 | SD1_DAT2 | ARM_TDI | SPI5_CE1_N |
| 27 | Low | SD0_DAT3 | TE1 | DPI_D23 | SD1_DAT3 | ARM_TMS | SPI6_CE1_N |

Table 5: Raspberry Pi 4 GPIO Alternate Functions

Table 5 details the default pin pull state and available alternate GPIO functions. Most of these alternate peripheral functions are described in detail in the BCM2711 Peripherals Specification document which can be downloaded from the hardware documentation section of the website.



5.1.3 Display Parallel Interface (DPI)

A standard parallel RGB (DPI) interface is available the GPIOs. This up-to-24-bit parallel interface can support a secondary display.

5.1.4 SD/SDIO Interface

The Pi4B has a dedicated SD card socket which supports 1.8V, DDR50 mode (at a peak bandwidth of 50 Megabytes / sec). In addition, a legacy SDIO interface is available on the GPIO pins.

5.2 Camera and Display Interfaces

The Pi4B has 1x Raspberry Pi 2-lane MIPI CSI Camera and 1x Raspberry Pi 2-lane MIPI DSI Display connector. These connectors are backwards compatible with legacy Raspberry Pi boards, and support all of the available Raspberry Pi camera and display peripherals.

5.3 USB

The Pi4B has 2x USB2 and 2x USB3 type-A sockets. Downstream USB current is limited to approximately 1.1A in aggregate over the four sockets.

5.4 HDMI

The Pi4B has 2x micro-HDMI ports, both of which support CEC and HDMI 2.0 with resolutions up to 4Kp60.

5.5 Audio and Composite (TV Out)

The Pi4B supports near-CD-quality analogue audio output and composite TV-output via a 4-ring TRS 'A/V' jack.

The analog audio output can drive 32 Ohm headphones directly.

5.6 Temperature Range and Thermals

The recommended ambient operating temperature range is 0 to 50 degrees Celcius.

To reduce thermal output when idling or under light load, the Pi4B reduces the CPU clock speed and voltage. During heavier load the speed and voltage (and hence thermal output) are increased. The internal governor will throttle back both the CPU speed and voltage to make sure the CPU temperature never exceeds 85 degrees C.

The Pi4B will operate perfectly well without any extra cooling and is designed for sprint performance - expecting a light use case on average and ramping up the CPU speed when needed (e.g. when loading a webpage). If a user wishes to load the system continually or operate it at a high temperature at full performance, further cooling may be needed.



6 Availability

Raspberry Pi guarantee availability Pi4B until at least January 2026.

7 Support

For support please see the hardware documentation section of the Raspberry Pi website and post questions to the Raspberry Pi forum.

Abbildungsverzeichnis

Tabellenverzeichnis

Code Listings