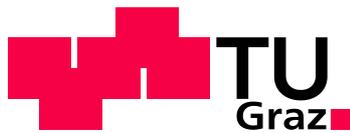


Elektrisches Gesamtsystem für einen Formula Student Electric Boliden

Diplomarbeit



Institut für Elektronik
Technische Universität Graz

Betreuer:

Ass.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Bernd Eichberger

Verfasser:

Florian Raffeiner

Institutsleiter: Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Wolfgang Pribyl

Inffeldgasse 12 A-8010 Graz

Tel.: +43 (0) 316 873 – 7521

<http://www.ife.tugraz.at/>

Graz, Mai 2011

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei Ass.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Bernd Eichberger und den Mitarbeitern des Instituts für Elektronik für die Betreuung meiner Diplomarbeit, sowie für die hilfreichen und sachlichen Gespräche bedanken.

Ein besonderer Dank gilt dem Rektorat der TU Graz, das es ermöglicht hat, meine Idee eines elektrischen Rennwagens in die Realität umzusetzen. Danke für die tatkräftige Unterstützung und Förderung.

Hervorheben möchte ich Vizerektor O.Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Dr.h.c Michael Muhr, der stets ein offenes Ohr für meine Anliegen hatte, für das Team eintrat und somit entscheidend zum Gelingen des Vorhabens beitrug. Danken möchte ich auch der Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik allen voran Dekan Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Mag.rer.soc.oec. Dr.techn. Heinrich Stigler für die großzügige Unterstützung.

Allen Wirtschaftspartnern des TU Graz e-Power Racing Teams möchte ich für das entgegengebrachte Vertrauen und die finanziellen und materiellen Sponsorings danken. Erst dadurch wurde es möglich, ein Auto auf solch einem hohen Niveau zu realisieren.

Ein spezieller Dank geht an das Team, das zu jeder Tages- und Nachtstunde mit vollem Enthusiasmus hinter mir stand und seine Freizeit aufopferte, um die Idee MaxWheel in die Tat umzusetzen. Ich möchte mich auch besonders für den Rückhalt, sowie die technischen und persönlichen Gespräche mit den Teamkollegen bedanken, die mir sowohl das Durchhaltevermögen als auch die Ausdauer für die Leitung des Teams gaben. Ebenso danke ich meinen Freunden, die mir ständig motivierend zur Seite standen und für die wertvollen Hilfestellungen. Weiters danke ich den Kollegen vom Hochspannungszeichensaal der TU Graz, mit denen ich im Laufe meines Studiums viele schöne Stunden verbringen durfte.

Zum Schluss möchte ich noch meinen Geschwistern, Verwandten und besonders meinen Eltern, Elisabeth und Helmut für ihre fast selbstverständliche Unterstützung in allen Lebenslagen danken. Ohne ihre Hilfsbereitschaft wäre es mir nicht möglich gewesen, mein Studium an der TU Graz abzuschließen.

Kurzfassung

Formula Student Electric ist ein weltweiter Konstruktionswettbewerb für studentische Teams mit dem Ziel, einen elektrischen Formel Rennwagen zu bauen. Diese Diplomarbeit beschäftigt sich mit der Konzepterstellung und der Ausführung des elektrischen Gesamtsystems des Formula Student Electric Boliden des TU Graz e-Power Racing Teams. Die Anforderungen für den elektrischen Antriebsstrang werden mittels Berechnung und Simulation ermittelt. Durch Vergleich der Anforderungen und der verfügbaren Technologien wird der Einsatz der jeweiligen Produkte im Fahrzeug begründet. Zu den elektrischen Antriebskomponenten zählen die Batterie, das Batterie-Management-System, der Stromrichter und der Motor sowie deren Steuerung und Regelung im Fahrzeug. In der vorliegenden Arbeit werden im Detail die Auslegung und Implementierung des Batteriemanagementsystems behandelt. Die Kommunikation zwischen den Einheiten und die Funktionsweise des Gesamtsystems werden beschrieben.

Stichwörter: Formula Student Electric, Batterie-Management-System, MaxWheel, TU Graz e-Power Racing

Abstract

Formula Student Electric is a worldwide design competition for students with the aim to build an electric racing car. This diploma thesis deals with the design and implementation of the overall electrical system of the Formula Student Electric race car built by the TU Graz e-Power Racing Team. The requirements for the electric drive train are determined through calculation and simulation. By comparing the requirements and available technologies, the use of each product in the race car is justified. The electric drive train components include the battery, the battery-management-system, the inverter, the motor and the control system of the car. In detail, this diploma thesis discusses the design and implementation of the battery-management-system. The communication between the units and the functionality of the overall system are described.

Key words: Formula Student Electric, Battery-management-system, MaxWheel, TU Graz e-Power Racing

EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Graz, am

.....
(Unterschrift)

Englische Fassung:

STATUTORY DECLARATION

I declare that I have authored this thesis independently, that I have not used other than the declared sources / resources and that I have explicitly marked all material which has been quoted either literally or by content from the used sources.

date

.....
(signature)

Inhaltsverzeichnis

1. Formula Student	1
1.1. Geschichte	1
1.2. Formula Student Electric	3
1.2.1. Reglement	3
1.2.2. Bewerb	5
1.3. TU Graz e-Power Racing Team	7
2. Anforderungen und Rahmenbedingungen	9
2.1. Ausgangspunkt	9
2.2. Kinematisches Modell	9
2.3. Simulation Endurance	15
2.4. Simulation Acceleration	17
2.5. Platzverhältnisse	19
2.6. Abschätzung Schwerpunkt:	21
2.7. Auswertung	23
2.8. Zusammenfassung der Ergebnisse	27
3. Auswahl der Komponenten.....	28
3.1. Batterie.....	28
3.1.1. Technologien und Theorie	29
3.1.2. Verfügbare Batterien.....	31
3.1.3. Auswahl der Zellen	33
3.2. Batteriemanagement	35
3.2.1. Anforderungen.....	35
3.2.2. Auswahl der Hauptkomponenten	36

3.3. Motor.....	37
3.3.1. Antriebskonzepte.....	37
3.3.2. Auswahl und Auslegung des Motors.....	39
3.4. Stromrichter	41
3.4.1. Anforderungen Verfügbarkeit.....	41
3.4.2. Eingesetzte Komponenten.....	43
3.5. Zentrale Steuereinheit.....	46
3.5.1. Aufgaben.....	46
3.5.2. Verfügbare Produkte.....	47
4. Batterie Management System	49
4.1. Accumulator Container.....	49
4.1.1. Aufbau.....	49
4.1.2. Batterie-Pack.....	50
4.2. Batterieelektronik	52
4.2.1. BMS Master.....	52
4.2.2. BMS Balancing.....	58
4.2.3. BMS Kontroller	59
4.2.4. Software	60
4.3. Elektronik Test	67
4.4. Batterieprüfstand.....	68
4.4.1. Kapazitätsbestimmung	68
4.4.2. Endurance Test	70
4.4.3. Innenwiderstand	71
4.5. Betrieb.....	74

5. Fahrzeug.....	77
5.1. Integration der Komponenten.....	77
5.2. Sicherheitstechnische Aspekte.....	80
6. Ausblick.....	83

1. Formula Student

1.1. Geschichte

Bereits 1976 wurde die Idee zur Formula Student geboren. Damals organisierte die amerikanische Society of Automotive Engineers (SAE) den Mini Baja Wettbewerb, bei dem Studierende ein geländegängiges Fahrzeug konstruieren und bauen konnten. Die Limitierung war ein einheitlicher Rasenmähermotor, mit dem die Fahrzeuge angetrieben werden mussten. Mit denselben fünf PS Aggregaten wurde 1979 die Mini Indy ins Leben gerufen und in den USA ausgetragen. Bei der ersten Austragung des Bewerbs nahmen elf universitäre Teams teil. Damals handelte es sich um Fahrzeuge, die Komponenten eines Go-Karts als auch eines Formelwagens aufwiesen. Die Mini Indy Serie war noch sehr stark reglementiert. Um den studentischen Teams mehr Freiheit in der Kreativität zu geben, beschloss die SAE 1981 ein neues Regelwerk und gründete die Formula SAE. Die wichtigste Änderung war, dass nun Formelfahrzeuge mit open Wheel und open Cockpit gebaut werden mussten. Eine weitere wichtige Neuerung war, dass die Motoren nicht mehr vorgegeben waren.

Seit 1981 stieg in den USA die Bedeutung und Popularität des Bewerbs stetig an. Immer mehr Universitäten bauten ein Auto und nahmen an den Bewerben teil. Auch die Automobilindustrie erkannte bald das Potenzial der Formula SAE. So unterstützten die drei großen Automobilhersteller der USA, Ford, Chrysler und General Motors (GM) seit 1986 die Formula SAE. Innerhalb von zehn Jahren erreichte der Wettbewerb in den USA eine Teilnehmerzahl von 99. 1997 nahm das erste Europäische Team von der Universität in Leed an der Formula SAE teil (Institution of Mechanical Engineers) (Kastens).

Im Jahre 1998 entstand die Europäische Version der Formula SAE und in England wurde erstmals die Formula Student ausgetragen. Für die Formula Student galt das selbe Reglement wie für die Formula SAE. In den folgenden Jahren stieg die Anzahl der Teams rasant an und so wird in Australien seit 2000, in Japan seit 2003 und Italien seit 2005 ein Rennen ausgetragen. In Deutschland veranstaltet der Verein Deutscher Ingenieure (VDI) seit 2006 die Formula Student Germany. Seit 2009 wird auch in

Österreich ein Formula Student Event veranstaltet (Institution of Mechanical Engineers).

Parallel zur Formula Student wurde in England von 2007 bis 2009 die Formula Hybrid ausgetragen. Bei dieser Variante der Formula Student war es nicht nur möglich, alternative Kraftstoffe zu fahren, sondern auch ein wirkliches Hybridkonzept an den Start zu bringen. Aufgrund der hohen Komplexität der Hybridsysteme und der geringen Teilnehmerzahlen wurde der Formula Hybrid keine große Aufmerksamkeit geschenkt. Im Weiteren wurde durch Abänderung der Teildisziplinen die Anlehnung an den Motorsport genommen.

Class 1A: Seit 2009 wird in England gleichzeitig mit der Formula Student die Formula Student Class 1A ausgetragen. In dieser Klasse sind wiederum Hybridkonzepte zugelassen und erstmals auch reine Elektroautos. Bis auf kleine Abänderungen nehmen die Fahrzeuge dieser neuen Klasse an denselben Teildisziplinen wie die herkömmlichen benzinbetriebenen Autos teil. Damit ist ein direkter Vergleich und Konkurrenzkampf gegeben.

Die Entwicklung der Automobilindustrie hat den Weg zur Elektrifizierung der Kraftfahrzeuge eingeschlagen. So ist es auch nicht verwunderlich, dass in der Formula Student eine Klasse für reine Elektrofahrzeuge ausgeschrieben wurde. Von den Veranstaltern der Formula Student Germany wurde aus diesen Gründen die Formula Student Electric gegründet. 2009 wurden die Idee und das erste Reglement veröffentlicht und bereits 2010 fand der erste Bewerb statt. Insgesamt 19 Europäische Teams nahmen die Herausforderung an, einen elektrischen Formelwagen, der sich mit einem benzinbetriebenen Auto messen kann, zu bauen. Auch an der TU Graz wurde ein Formula Student Electric Team gegründet, das bislang einzige Österreichs, das TU Graz e-Power Racing Team.

1.2. Formula Student Electric

Die Formula Student Electric ist ein Konstruktionswettbewerb, in dem es darum geht, in einem universitären Team nach einem vorgegebenen Reglement ein Formel Auto zu bauen. Aktiv an der Konstruktion, der Auslegung, der Fertigung und dem Betrieb des Fahrzeuges dürfen nur immatrikulierte Studierende arbeiten. Der Faculty Advisor muss ein Bediensteter der Universität sein, arbeitet nicht am Fahrzeug mit, stellt aber die offizielle Verbindung zur Hochschule her. Der Safety Responsible und seine Stellvertreter müssen einen akademischen Titel haben, dürfen am Fahrzeug mitarbeiten und sind für die elektrische Sicherheit des Fahrzeuges verantwortlich (Formula Student Electric).

1.2.1. Reglement

Aufgrund der Thematik wird in diesem Kapitel hauptsächlich auf die elektrischen Aspekte der Formula Student eingegangen. Dennoch werden hier einige strukturelle und mechanische Forderungen angeführt. Das Team soll sich in die Rolle einer Firma versetzen, die beauftragt wird, ein Formelfahrzeug für einen nicht professionellen „weekend race driver“ zu bauen. Der fiktive Auftrag gibt eine jährliche Produktion von 1000 Fahrzeugen an, die möglichst günstig produziert werden sollen. Das Fahrzeug muss eine open wheel und open cockpit Konstruktion sein und vier Räder haben, die nicht in einer Linie angeordnet sind. Der minimale Radstand beträgt 1525 mm, die Spurweite ist nicht limitiert. Jedoch muss bei der Auslegung bedacht werden, dass die engen Kurven, die auf der Strecke vorkommen, gefahren werden können. Jedes Auto muss mit einem hydraulischen Bremssystem ausgestattet sein, das direkt über ein Pedal betätigt wird. Die ersten 50 % des Pedalweges können zum rein regenerativen Bremsen verwendet werden. Bei Betätigung des Bremspedals muss das Bremslicht aufleuchten. Der Großteil des restlichen mechanischen Regelwerks schreibt sicherheitstechnische Maßnahmen vor wie den Überrollkäfig, den Seiten-Aufprallschutz und die maximale Verzögerung, die bei einem Frontalzusammenstoß auftreten darf.

Auch der Teil des Reglements über die elektrischen Komponenten und deren Verschaltung befasst sich hauptsächlich mit Aspekten, die für einen sicheren Betrieb des Fahrzeugs notwendig sind. In jedem Fahrzeug müssen zwei galvanisch getrennte Systeme aufgebaut werden. Das Kontrollsystem kann mit Spannungen bis 60 VDC betrieben werden. Dieses muss mit dem negativen Pol mit allen elektrisch leitenden Teilen des Fahrzeugs niederohmig verbunden sein. Das Antriebssystem bildet den Hochvolt Teil des Systems und darf eine Spannung von 600 V nicht überschreiten. Ein Isolationsüberwachungsgerät muss durchgehend den Widerstand zwischen dem Hochvoltsystem und dem Kontrollsystem messen und bei einer Unterschreitung von $500 \Omega/V$, bezogen auf die maximale Betriebsspannung, das Hochvoltsystem abschalten. Jedes Fahrzeug muss mit einem Blinklicht ausgestattet sein, das aktiv ist, wenn die Hochvolt-Batterie-Relais geschlossen sind oder an einem Punkt im Zwischenkreis eine Spannung über 60 V anliegt. Die Unterschreitung des Isolationswiderstandes unterbricht ebenso wie die Hauptschalter, die Notastaster und der Kontakt, der geöffnet wird, falls das Bremspedal versagt, den Interlock Kreis. All diese Einrichtungen müssen unabhängig voneinander die Hochvoltrelais öffnen können und dadurch die Batterien vom restlichen System trennen. Die Batterien des Antriebssystems müssen in mechanisch robusten und nicht brennbaren Gehäusen im Auto befestigt werden. In diesen Gehäusen müssen auch jeweils Isolationsrelais verbaut werden. Für die Batterien selbst muss eine Spannungsüberwachung für jede Zelle und Temperaturüberwachung für mindestens 35 % der Zellen vorgesehen werden. Die Spannung und der Strom, der aus den Batterien kommt, wird mit einem vom Veranstalter zur Verfügung gestellten Messgerät aufgezeichnet und daraus die Effizienz berechnet. Bei den Motoren ist es den Teams überlassen wie viele und welche Art sie verwenden.

Um bei den Wettbewerben an den Start gehen zu können, müssen im Vorfeld detaillierte Dokumentationen über das Elektrische System abgegeben werden. So wird einerseits die Electrical Safety Form (ESF), in der alle elektrischen Komponenten angeführt sein müssen und deren Verschaltung und Funktion erklärt wird, abgegeben. Andererseits muss eine Failure Modes and Effects Analysis (FMEA) durchgeführt und dokumentiert werden.

1.2.2. Bewerb

Der Bewerb selbst lässt sich grob in drei Teile unterteilen:

- die technischen Abnahmen des Fahrzeugs, für die es noch keine Wertung gibt
- die statischen Disziplinen
- die dynamischen Disziplinen

Die technische Abnahme des Fahrzeugs unterteilt sich in folgende Punkte:

E-Scruteneering ist die Abnahme des elektrischen Systems. Hierbei wird überprüft, ob das Fahrzeug so gebaut ist, wie in der ESF beschrieben ist. Es wird der Isolationswiderstand gemessen und die Funktionalität der einzelnen Komponenten überprüft.

M-Scruteneering ist die Abnahme der mechanischen Komponenten. Ein positiver Abschluss dieser Überprüfung bestätigt, dass das Auto reglementkonform gebaut wurde.

Tilt Table: Das Fahrzeug wird zuerst auf 45° gekippt, dabei dürfen keine Flüssigkeiten auslaufen. Dann wird das Auto auf 60° gekippt und es muss mit allen vier Rädern auf der Plattform stehen bleiben.

Rain Test: Bei diesem Test wird ein Regenschauer simuliert. Das fahrbereite Fahrzeug mit eingeschaltetem Antriebssystem wird für 120 Sekunden besprenkelt, dabei darf das Isolationsüberwachungsgerät keine Unterschreitung des Isolationswiderstandes feststellen und infolgedessen abschalten.

Brake Test: Hierbei wird das Fahrzeug erstmals aus eigener Kraft bewegt. Der Fahrer muss das Auto kurz beschleunigen, dann das Antriebssystem abschalten und mit der hydraulischen Bremse alle vier Räder zum Blockieren bringen.

Sobald diese Überprüfungen geschafft sind, darf das Team an allen Disziplinen des Wettkampfs teilnehmen.

Die Disziplinen des Formula Student Electric Bewerb teilen sich in sieben Teildisziplinen auf. Insgesamt werden bis zu 1000 Punkte vergeben. Die Punkteanzahl, die ein jeweiliges Team bekommt, wird im Verhältnis zum besten Team aufgeteilt. Es wird zwischen statischen Disziplinen, bei denen das Know-How der Teams bewertet wird, und den dynamischen Disziplinen bei denen die Performance des Fahrzeugs auf der Strecke zählt, unterschieden (Formula Student Electric).

Statische Disziplinen		325	Punkte
Business Plan Presentation		75	Punkte
	Marketingpräsentation bei einer fiktiven Fertigungsfirma		
Engineering Design Event		150	Punkte
	Bewertung der einzelnen technischen Bereiche nach Idee und Ausführung		
Cost Event		100	Punkte
	Kostenaufstellung für eine Serienfertigung von 1000 Fahrzeugen/Jahr		
Dynamische Disziplinen		675	Punkte
Skid Pad		75	Punkte
	Fahrverhalten in der Kurvenfahrt bei konstantem Radius		
Acceleration		75	Punkte
	Beschleunigung des Autos auf einer geraden Strecke von 75 m		
Autocross		100	Punkte
	Manövrierbarkeit und Handling des Autos auf engem Kurs		
Endurance		325	Punkte
	Gesamtpformance des Autos auf einer Renndistanz von 22 km		
Efficiency		100	Punkte
	Benötigte Energie beim Endurance Event		
Summe		1000	Punkte

Tabelle 1 Punkteaufteilung

1.3. TU Graz e-Power Racing Team

An der TU Graz besteht bereits seit 2003 das TU Graz Racing Team, das sehr erfolgreich an der Formula Student teilnimmt. Als im August 2009 bekannt wurde, dass die Formula Student Electric erstmals ausgetragen wird, ergriff ich, Florian Raffener, die Initiative, auch an der TU Graz ein Formula Student Electric Team zu gründen. Dank meiner Erfahrungen aus dem TU Graz Racing Team und dem Anreiz einer neuen Herausforderung bildete ich ein Team von 25 begeisterten Studierenden aus den verschiedensten Fachrichtungen der TU Graz. Das Projekt mit dieser innovativen Idee fand bei den Instituten der TU Graz sowie in der Wirtschaft reichlich Anklang. Zahlreiche Sponsoren aus der Wirtschaft und speziell aus den automotiven und den elektrotechnischen Bereichen der Wirtschaft unterstützten unser Vorhaben. Unter diesen Voraussetzungen konnte das Team den eng gesteckten Zeitplan umsetzen und den Rennboliden MaxWheel fertigen. Die wichtigsten Phasen und Milestones der ersten Saison waren:

		Juli 09	Aug 09	Sep 09	Okt 09	Nov 09	Dez 09	Jan 10	Feb 10	März 10	Apr 10	Mai 10	Jun 10	Jul 10	Aug 10
Konzept	15. Aug. 09 - 13. Nov. 09		■	■	■	■	■	■	■	■					
Konstruktion und Auslegung	02. Nov. 09 - 8. Jan 10					■	■	■	■	■					
Mechanische Fertigung	01. Dez. 09 - 16. Apr. 10						■	■	■	■	■				
Elektrische Fertigung	11. Jan. 10 - 07. Mai. 10							■	■	■	■	■			
Optimierung und Testen	15. Feb. 10 - 13. Aug. 10								■	■	■	■	■	■	■
Batterieprüfstand	15. Feb. 10 - 26. Feb. 10								■						
Gesamtfahrzeugprüfstand	14. Mai. - 11 Jun. 10											■	■		
Rollout	25. Jun. 10													■	
Bewerb England	13. Jul. 10 - 19. Jul. 10														■
Bewerb Deutschland	03. Aug. 10 - 09. Aug. 10														■
Bewerb Österreich	11. Aug. 10 - 16. Aug. 10														■

Abbildung 1 Zeitplan MaxWheel

Bei den Bewerben standen das Fahrzeug und das Team in direktem Vergleich mit anderen Teams aus Europa und konnten sich beeindruckend gut platzieren. Die wichtigsten Erfolge aus der Saison 2010 sind in folgender Übersicht dargestellt.

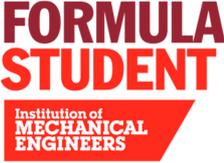
		
<p>Formula Student UK</p>	<p>Formula Student Electric</p>	<p>Formula Student Austria</p>
<p>6th Place Overall 3rd Place Design Airbus Teamwork Award</p>	<p>1st Endurance Finisher 3rd Place Overall</p>	<p>4th Place (Electric) 17th Place (Electric+VKM)</p>

Tabelle 2 Erfolge Saison 2010

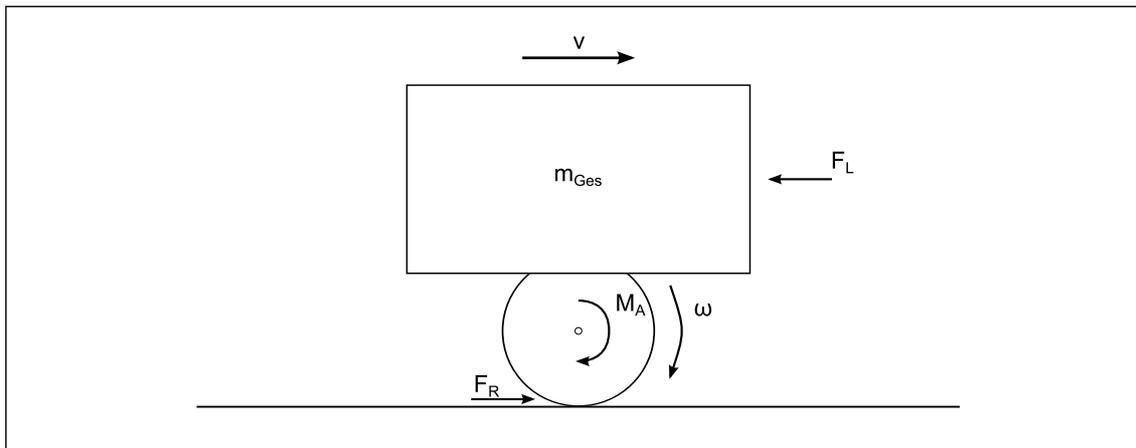
2. Anforderungen und Rahmenbedingungen

2.1. Ausgangspunkt

Das Reglement der Formula Student Electric limitiert weder die Leistung noch die Kapazität der Batterien, die im Auto verbaut werden dürfen. Als Ausgangspunkt wird die Konkurrenzfähigkeit zu den herkömmlichen benzinbetriebenen Formula Student Fahrzeuge genommen. Aus dem TU Graz Racing Team stehen zahlreiche Datenaufzeichnungen von verschiedenen Fahrzeugen, zahlreichen Testfahrten und diversen Rennen zur Verfügung. Aus diesen Daten können die notwendige Leistung und die Energie abgeleitet werden, die aufgebracht werden müssen, um die Beschleunigungswerte zu erreichen und am Rundkurs äquivalente Rundenzeiten zu fahren. Ziel der Simulation ist es, die erforderliche Motorleistung und Batteriekapazität zu ermitteln. Für diese energetischen Betrachtungen wird ein kinematisches Modell des Fahrzeugs eingesetzt.

2.2. Kinematisches Modell

Das Modell kann in zwei Teile aufgeteilt werden: Das Fahrzeug selbst, das translatorische Bewegungen erfährt; die drehenden Teile, wobei die Reifen den größten Anteil ausmachen. Weitere rotatorische Energiespeicher wie Kettenrad, Getriebe und Motor können in dieser Betrachtung vernachlässigt werden, da diese prozentuell nur einen sehr geringen Anteil ausmachen. Sehr wohl aber werden die Fahrwiderstände, die in erster Linie aus Luftwiderstand und dem Rollwiderstand bestehen, berücksichtigt. In Abbildung 2 sind die wirkenden Größen eingezeichnet. die Masse m_{Aufbau} des Fahrzeugs und das Gewicht des Fahrers m_{Fahrer} die den kinetischen Energiespeicher darstellen. In weiterer Folge ist die Luftwiderstandskraft F_{Luft} , die proportional zum Quadrat der Geschwindigkeit wirkt, das Trägheitsmoment der Reifen J_{Rad} und die Reibungskraft F_{Roll} , die aus dem Rollwiderstand resultiert berücksichtigt.

**Abbildung 2 Kinematisches Modell**

Aus den Datenaufzeichnungen sind die Geschwindigkeiten der vier Räder bekannt. Um die Geschwindigkeit des Fahrzeugs zu ermitteln, wird der Mittelwert der nicht angetriebenen Räder gebildet, dadurch verfälscht der Antriebsschlupf nicht die Fahrzeuggeschwindigkeit. Durch diesen Mittelwert wird die Abweichung der unterschiedlichen Radgeschwindigkeiten bei einer Kurvenfahrt eliminiert. Aufgrund von blockierenden Rädern beim Bremsen und durch Fehlsignale des Sensors ist das Rohsignal verrauscht. Diese Messfehler werden durch ein Filter, das bei zu hohen Drehzahländerungen pro Zeiteinheit auf den plausiblen Wert umschaltet, entfernt. Proportional zum Kehrwert des Reifenradius ergibt sich die Winkelgeschwindigkeit der Räder. Die Masse des Fahrzeugs wird in der Simulation als variabel angenommen, um verschiedene Konzepte von Batteriegewicht und Motorleistung zu vergleichen. Die Variation der Masse liegt im Bereich von 180 kg bis 300 kg. Das Gewicht des Fahrers inklusive Fahrerausrüstung wird mit 80 kg angenommen. Aus den Abmessungen und dem Gewicht der Reifen errechnet sich das Trägheitsmoment der rotierenden Massen.

Parameter	Wert	Einheit
m_{Aufbau}	$180 < m_{\text{Aufbau}} < 300$	[kg]
m_{Fahrer}	80	[kg]
m_{Reifen}	6	[kg]
$r_{\text{Reifen_au\ss en}}$	0,25	[m]
$r_{\text{Reifen_innen}}$	0,15	[m]

Tabelle 3 Fahrzeugparameter

Mittelung der Geschwindigkeiten der Vorderräder $v_{\text{Front_right}}$, $v_{\text{Front_left}}$:

$$v_{\text{mittel}} = \frac{v_{\text{Front_right}} + v_{\text{Front_left}}}{2} \quad (1)$$

Abbildung 3 zeigt die Filterung des Geschwindigkeitssignals, v_{Ground} ist die tatsächliche Fahrzeuggeschwindigkeit.

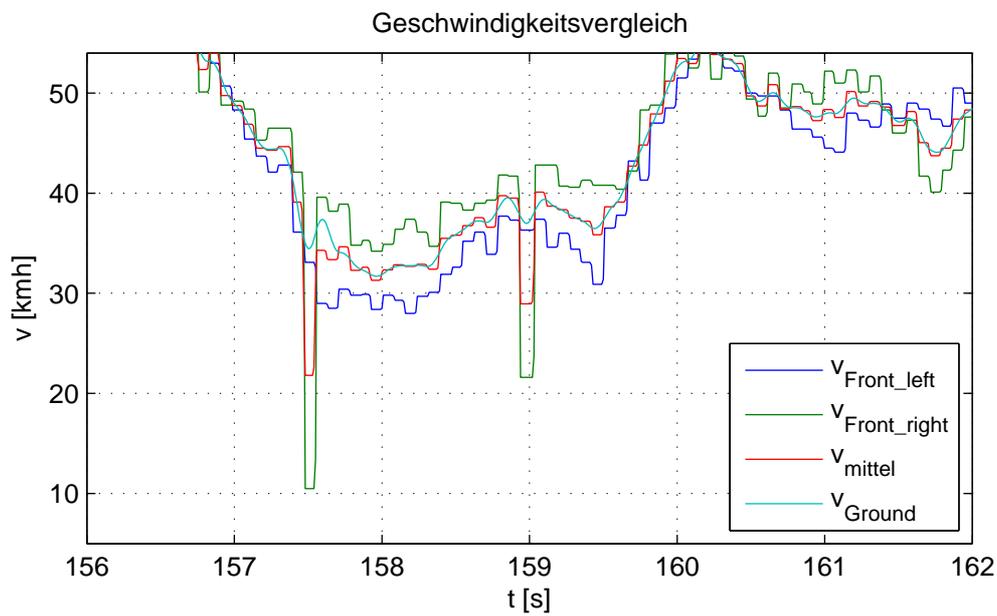


Abbildung 3 Geschwindigkeitsvergleich

Die Masse m_{Gesamt} des Gesamtfahrzeugs ergibt sich zu:

$$m_{\text{Gesamt}} = m_{\text{Aufbau}} + m_{\text{Fahrer}} \quad (2)$$

Die Kinetische Energie $E_{\text{Kin,translatorisch}}(t)$ zu jedem Zeitpunkt:

$$E_{\text{Kin,translatorisch}}(t) = \frac{m_{\text{Gesamt}} \cdot v_{\text{Ground}}^2}{2} \quad (3)$$

Für den rotatorischen Anteil:

$$J_{\text{Rad}} = m_{\text{Rad}} \cdot \frac{(r_{\text{Reifen_außen}}^2 + r_{\text{Reifen_innen}}^2)}{2} \quad (4)$$

$$J_{\text{Rad}} = 6 \text{ kg} \cdot \frac{((0,25\text{m})^2 + (0,15\text{m})^2)}{2} = 0,255 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

$$J_{\text{Gesamt}} = 4 \cdot J_{\text{Rad}} \quad (5)$$

$$J_{\text{Gesamt}} = 4 \cdot 0,255 \text{ kg} \cdot \text{m}^2 = 1,020 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

$$\omega_{\text{Ground}} = \frac{v_{\text{Ground}}}{r_{\text{Reifen_außen}}} \quad (6)$$

$$E_{\text{Kin,rotatorisch}}(t) = \frac{J_{\text{Gesamt}} \cdot \omega_{\text{Ground}}^2}{2} \quad (7)$$

$$E_{\text{Kin}}(t) = E_{\text{Kin,translatorisch}} + E_{\text{Kin,rotatorisch}} \quad (8)$$

Durch Ableitung der kinetischen Energie nach der Zeit ergibt sich die Beschleunigungsleistung $P_a(t)$, die notwendig ist um im zeitdiskreten Intervall von 0,01 Sekunden die Energiedifferenz aufzubringen.

$$P_a(t) = \frac{\Delta E_{\text{Kin}}}{\Delta t} \quad (9)$$

Fahrwiderstände

Die Formula Student Rennen werden grundsätzlich auf waagrechten Fahrbahnen ausgetragen. Deshalb kann hier der Steigungswiderstand weggelassen werden, da dieser bei einem Steigungswinkel $\alpha = 0$ immer gleich Null ist. Der Rollreibungswiderstand ist proportional der Aufstandskraft und dem Rollwiderstandsbeiwert. Beide Werte können als konstant angenommen werden: die Aufstandskraft, da der Steigungswinkel zu Null definiert wird und der Rollwiderstandsbeiwert für die relativ kleinen Geschwindigkeiten als konstant gilt. In den Luftwiderstand hingegen gehen die Geschwindigkeit v_{Ground} mit einem quadratischen Term ein. Weiter ist er vom Querschnitt des Fahrzeugs, vom c_w Wert, der für ein Formelfahrzeug mit freistehenden Rädern relativ schlecht ist, und von der Dichte der Luft, die verdrängt werden muss, abhängig. Die Fahrwiderstände werden mit der Geschwindigkeit multipliziert, um die Fahrwiderstandsleistungen zu erhalten, die zur kinetischen Leistung aus (9) addiert werden. Das ergibt die Gesamtleistung, die zu jedem Zeitpunkt aufgebracht werden muss.

Die Reibungskraft

Parameter	Wert	Einheit
g	9,81	[m/s ²]
μ_R	0,80	[–]

Tabelle 4 Parameter der Reibkraft

$$F_N = m_{\text{Gesamt}} \cdot g \quad (10)$$

$$F_{\text{Roll}} = \mu_R \cdot F_N \quad (11)$$

Der Luftwiderstand

Parameter	Wert	Einheit
c_W	0,7	[-]
ρ_{Luft}	1,2	[kg/m ³]
$b_{Spurweite}$	1,6	[m]

Tabelle 5 Parameter des Luftwiderstandes

Da das Fahrzeug sehr flach gebaut ist, wird die Querschnittsfläche aus dem Produkt von Spurweite $b_{Spurweite}$ und Raddurchmesser D_{Reifen} berechnet:

$$D_{Reifen} = 2 \cdot r_{Reifen_au\ss en} \quad (12)$$

$$A_{Querschnitt} = b_{Spurweite} \cdot D_{Reifen} \quad (13)$$

$$F_{Luft} = \frac{1}{2} \cdot c_W \cdot \rho \cdot A_{Querschnitt} \cdot v_{Ground}^2 \quad (14)$$

$$F_{Fahrwiderstand} = F_{Roll} + F_{Luft} \quad (15)$$

Die Gesamt-Widerstandsleistung $P_{GW}(t)$ ergibt sich zu

$$P_{GW}(t) = F_{Fahrwiderstand} \cdot v_{Ground} \quad (16)$$

und die Gesamtleistung $P_{Ges}(t)$ zu:

$$P_{Ges}(t) = P_a(t) + P_{GW}(t) \quad (17)$$

2.3. Simulation Endurance

Der Endurance ist das Ausdauerrennen bei den Bewerben. Es werden insgesamt 22 km gefahren; zur Hälfte findet ein Fahrerwechsel statt. Die Simulation wird bis zur Hälfte der Strecke durchgeführt und die Ergebnisse auf die Gesamtstrecke hochgerechnet. Der Energiegehalt der Batterien muss für die gesamte Distanz ausreichen, ausgehend von der Forderung, dass das Elektroauto die gleichen Rundenzeiten wie das Benzinauto fahren soll. Als Ausgangspunkt dienen Datenaufzeichnungen der Rennen in Deutschland und England vom TANKIA2007 des TU Graz Racing Teams. Das Ziel der Simulation ist eine Abschätzung der Energie, der durchschnittlichen- und der maximalen Leistung in Abhängigkeit vom Fahrzeuggewicht.

Im Histogramm der Abbildung 4 ist die Zeit angegeben, in der das Auto folgende Geschwindigkeiten fuhr.

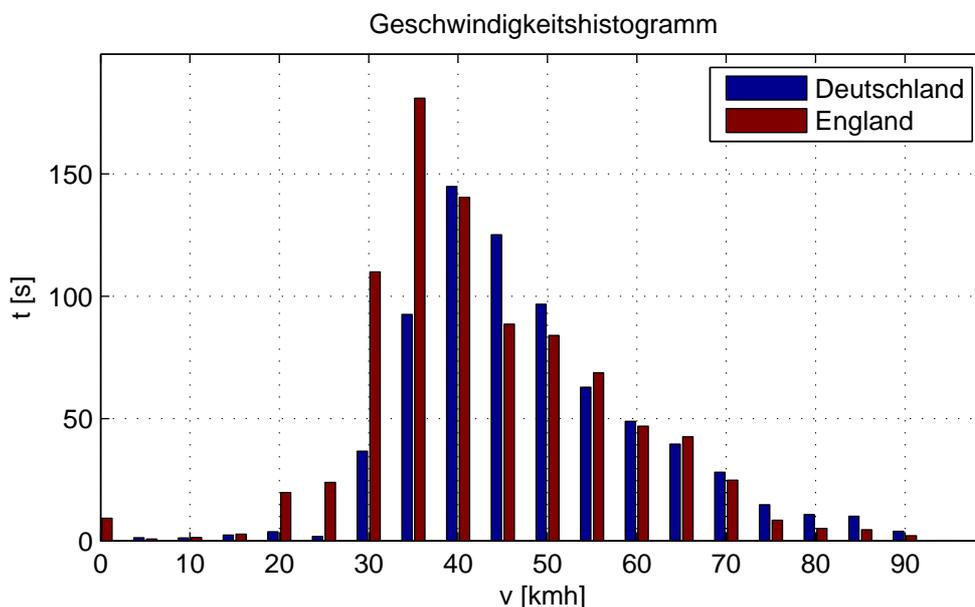


Abbildung 4 Histogramm Geschwindigkeitsvergleich

Als erstes werden die Geschwindigkeitsprofile der beiden Rennen verglichen. Daraus lässt sich erkennen, dass in England häufiger niedrigere Geschwindigkeiten gefahren

wurden. Die Durchschnittsgeschwindigkeit in England ist um 5 km/h geringer als in Deutschland, daher ist die Gesamtdauer länger.

	Endurance in Deutschland		Endurance in England	
v_{mittel}	50,22	km/h	45,48	km/h
v_{max}	93,84	km/h	94,35	km/h
T_{Gesamt}	731	s	865	s

Tabelle 6 Vergleich der Geschwindigkeiten bei verschiedenen Bewerben

Die in (17) berechnete Leistung wird in positive und negative Werte aufgeteilt, um zwischen den Beschleunigungsphasen und den Bremsmanövern zu unterscheiden. Bei positiver Leistung muss durch den Motor angetrieben werden. Die Verzögerung ist eine Kombination von mechanischer Bremse und generatorischer Bremse, wobei der Motor als Generator arbeitet und somit die Energie in die Batterien zurückspeist (Rekuperation). Für beide Betriebsarten werden unterschiedliche Wirkungsgrade angenommen. Der Antriebswirkungsgrad $\mu_{Antrieb}$ setzt sich aus dem Wirkungsgrad der Batterie, des Motors und des mechanischen Abtriebs zusammen und wird laut Tabelle 7 variiert. Der Rekuperationswirkungsgrad $\mu_{Rekuperation}$ setzt sich auch aus den elektrischen und mechanischen Wirkungsgraden - wie vorher beschrieben - zusammen. Jedoch muss noch berücksichtigt werden, dass nur auf der Hinterachse generatorisch gebremst werden kann und der Großteil der Bremsleistung durch die Gewichtsverlagerung auf der Vorderachse aufgebracht werden muss. Der Faktor der Gewichtsverlagerung i_{GV} wird mit 25 % angenommen. Somit ergibt sich $\mu_{Rekuperation} = \mu_{Antrieb} \cdot 0,25$. Um den theoretisch maximalen Wert der Rekuperation zu erhalten, wird der Wirkungsgrad $\mu_{Rekuperation} = 1$ gesetzt.

$\mu_{Antrieb}$	$\mu_{Rekuperation}$
1,000	1,000
0,900	0,225
0,800	0,200
0,700	0,175

Tabelle 7 Variation des Wirkungsgrades

Die Antriebsleistung $P_{Antrieb}$ und die Verzögerungsleistung $P_{Verzögerung}$ beziehungsweise die elektrischen Leistungen $P_{elektrisch_Antrieb}$ und $P_{elektrisch_Verzögerung}$ ergeben sich zu.

$$P_{Antrieb} = P_{Ges}, \forall P_{Ges} > 0 \quad (18)$$

$$P_{Verzögerung} = P_{Ges}, \forall P_{Ges} < 0 \quad (19)$$

$$P_{elektrisch_Antrieb} = \frac{P_{Antrieb}}{\mu_{Antrieb}} \quad (20)$$

$$P_{elektrisch_Verzögerung} = P_{Verzögerung} \cdot \mu_{Rekuperation} \quad (21)$$

Durch numerische Integration der zeitdiskreten Leistung wird die Antriebsenergie

$$E_{Antrieb} = \sum (P_{elektrisch_Antrieb} \cdot \Delta t) \quad (22)$$

und die Verzögerungsenergie

$$E_{Verzögerung} = \sum (P_{elektrisch_Verzögerung} \cdot \Delta t) \quad (23)$$

berechnet.

2.4. Simulation Acceleration

Das Beschleunigungsrennen (Acceleration) findet auf einer 75 Meter langen Geraden statt. Hier wird aus dem Stand heraus beschleunigt. Das Ziel der durchgeführten Simulation ist es, die notwendige Leistung zu berechnen, um eine bestimmte Zielzeit zu erreichen. Vorgegeben ist das maximale Moment, das der Reifen je nach

Aufstandskraft übertragen kann. Das Gewicht wird variiert und die Gewichtsverteilung in Abhängigkeit von der Beschleunigung berücksichtigt.

Das maximal übertragbare Moment des Reifens auf die Fahrbahn berechnet sich aus Gleichung (24). Der Wert μ_H ist abhängig von der Streckenbedingung und variiert bei den gefahrenen Hoosier Reifen zwischen nasser und trockener Fahrbahn folgendermaßen: $\mu_H = [0,8 \dots 1,5]$

$$M_{Rad\ Max} = \frac{1}{4} \cdot \mu_H \cdot m_{Gesamt} \cdot g \cdot r_{Reifen_au\ss en} \quad (24)$$

$$M_{Antrieb_Max} = 4 \cdot M_{Rad_Max} \cdot i_{Gewichtsverteilung} \quad (25)$$

$$\ddot{x}(t) = i_{Gewichtsverteilung} \cdot \mu_H \cdot g \quad (26)$$

Bis zur gewählten Maximalleistung P_{Max} beschleunigt das Auto konstant, danach mit Gleichung (27).

$$\ddot{x}(t) = \frac{P_{Max}}{\dot{x}(t)} \cdot m_{Gesamt} \quad (27)$$

Die aktuelle Geschwindigkeit errechnet sich zu

$$\dot{x}(t) = \dot{x}(t - \Delta T) + \ddot{x}(t) \cdot \Delta T \quad (28)$$

und die zurückgelegte Wegstrecke errechnet sich zu jedem Zeitpunkt nach der Gleichung:

$$x(t) = x(t - \Delta T) + \dot{x}(t) \cdot \Delta T \quad (29)$$

Sobald $x(t)$ die 75 Meter Grenze überschreitet, wird die Simulation abgebrochen und die Zielzeit gestoppt. Die mechanische Leistung wird in (30) berechnet. Um auf die

elektrische Leistung zurückzurechnen, die aus den Batterien kommt, muss noch der Wirkungsgrad berücksichtigt werden.

$$P(t) = \mu_H \cdot m_{\text{Gesamt}} \cdot g \cdot i_{\text{Gewichtsverteilung}}(t) \cdot \dot{x}(t) \quad (30)$$

$$P_{\text{elektrisch}}(t) = \frac{P(t)}{\mu_{\text{Antrieb}}} \quad (31)$$

2.5. Platzverhältnisse

Das Reglement erlaubt, dass benzinbetriebene Fahrzeuge, die aus vergangenen Saisonen von Formula Student Teams stammen und bereits an Wettbewerben teilgenommen haben, umgebaut oder nachgebaut werden dürfen. Um den enormen Entwicklungsaufwand, eine Karosserie und ein Fahrwerk neu zu entwickeln, zu minimieren, wird für den MaxWeehl auf die besagten Komponenten des TANKIA 2009 des TU Graz Racing Teams zurückgegriffen. So steht von Anfang an fest, wo und wie viel Platz zur Verfügung steht, um die Batterien und die Motoren zu integrieren. Da das Fahrzeug neu gebaut wird, bestehen dennoch genug Freiheiten, um Modifikationen vorzunehmen und auf die Anforderungen eines Elektroautos anzupassen. Neben dem vorgegebenen Platz muss bei einem Rennfahrzeug die Gewichtsverteilung zwischen Vorderachse und Hinterachse gleich bleiben, um fahrdynamisch keine Einbußen zu erhalten. Ein weiterer ausschlaggebender Punkt, um eine möglichst gute Fahrbarkeit zu erreichen, ist die Lage des Schwerpunkts in der z-Achse. Je tiefer der Schwerpunkt liegt, umso weniger wird das Fahrzeug wanken und nicken. Um die Trägheit des Autos um die Hoch-, Längs- und Querachse möglichst klein zu halten, müssen die Abstände der Massen zum Schwerpunkt minimiert werden. Alle Komponenten sollen möglichst konzentriert um den Schwerpunkt angeordnet sein.

Ohne den Verbrennungskraftmotor, den Benzintank und das Differential stehen die in Abbildung 5 dargestellten Bereiche zur Verfügung.

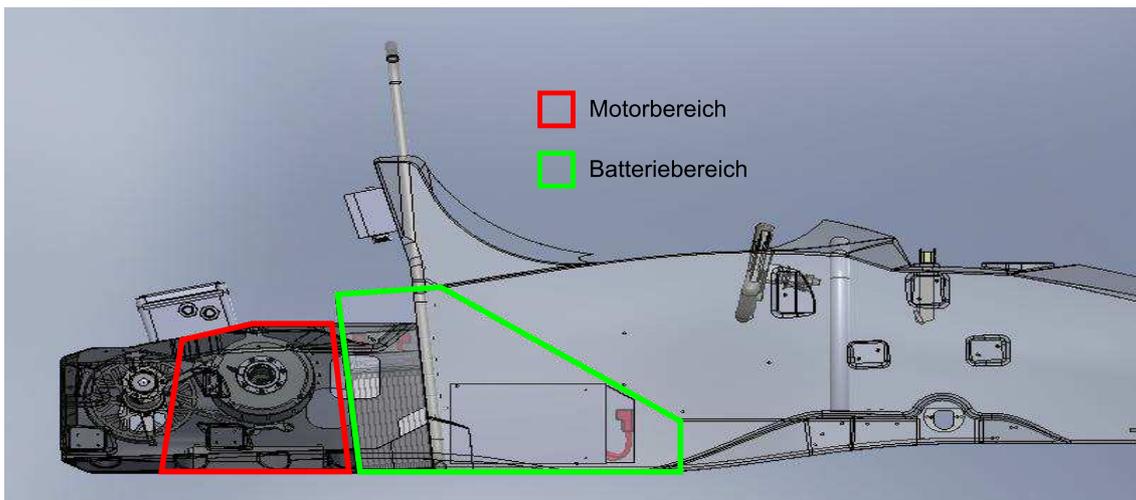


Abbildung 5 Bereich für die elektrischen Komponenten des Antriebs

Die Antriebswellen und deren Position sind durch die Übernahme des Fahrwerks des TANKIA 2009 gegeben. Die Motoren treiben diese über einen Kettentrieb an und müssen daher im hinteren Teil des Fahrzeugs Platz finden. Im Weiteren sind der maximale Durchmesser und die Länge der Motoren begrenzt.

Abmessungen Motor	
Maximale Länge L [mm]	180
Maximaler Durchmesser D [mm]	200

Tabelle 8 Maximalabmessungen Motor

Für die Batterien ist der grüne Bereich in Abbildung 5 rund um den Schwerpunkt vorgesehen. Dieser errechnet sich aus zwei Volumina, dem Volumen vor dem Überrollbügel und dem Volumen im Heck, daraus ergibt sich ein Gesamtvolumen von 140 Liter.

Abmessungen Batterie	
Volumen 1 [l]	35
Volumen 2 [l]	105
Gesamtvolumen [l]	140

Tabelle 9 Gesamtvolumen Batterien

2.6. Abschätzung Schwerpunkt:

Unter der Annahme des Gewichts der Motoren, der Batterien und deren Positionierung können ausgehend vom TANKIA 2009 das zu erwartende Gesamtgewicht, die Schwerpunktslage und die Gewichtsverteilung des Elektroautos abgeschätzt werden. Alle Abstände werden vom Mittelpunkt der Vorderachse aus angegeben.

Gewichtsannahmen der Komponenten des elektrischen Antriebssystems

Bauteil	Gewicht
	[kg]
Motor	45
Getriebe	5
Stromrichter	5
Batterie 1	25
Batterie 2	25

Tabelle 10 Angenommene Gewichte der elektrischen Komponenten

Für den TANKIA 2009 ist folgende Gewichtsverteilung und Schwerpunktslage bekannt:

TANKIA 2009	280 kg inkl. Fahrer	
	Vorderachse	Hinterachse
Gewichtsverteilung in [%]	52	48
Gewichtsverteilung in [kg]	145,6	134,4
Schwerpunkts-Lage absolut in z-Richtung über der Fahrbahn in [mm]	272	

Tabelle 11 Gewichtsverteilung TANKIA 2009

Aus diesen angenommenen Werten, dem bekannten Gewicht des TANKIA 2009 und dem Gewicht dessen Komponenten und deren Position wird in der folgenden Tabelle 12 erst die Gewichtsverteilung des Fahrzeugs ohne Antriebsstrang berechnet. Im zweiten Teil der Tabelle sind die Bauteile und das Gewicht des elektrischen Antriebsstrangs angeführt. Daraus werden das zu erwartende Gesamtgewicht und die neue Gewichtsverteilung errechnet.

Bauteil			Abstand Vorderachse		Gewichtsmoment			
Fahrzeug	Bemerkung	Masse	x	z	x	z		
+/- Bauteil		[kg]	[mm]	[mm]	[kg·mm]	[kg·mm]		
TANKIA 2009		Gewichtsverteilung [%]			52,00	48,00		
		Gewichtsverteilung [kg]			145,60	134,40		
	ohne Fahrer [kg]	200	280	-819	22	-229320	6160	
-	VKM ohne Kühlung	mit allen Fluiden	65	-1300	-10	-84500	-650	
-	Kühlung	mit Rohren und Wasser	3	-730	60	-2190	180	
-	Hinterachslenkung		6	-1770	0	-10620	0	
-	Tank		8	-800	-100	-6400	-800	
-	Fahrer		80	-550	110	-44000	8800	
-	Felgen Vorne	Kohlefelge	3	0	0	0	0	
-	Felgen Hinten	Kohlefelge	3	-1575	0	-4725	0	
-	Auspuff		2	-1575	110	-3150	220	
Fahrzeug ohne VKM- Antrieb			110	-905	236	-670	-14	
		Gewichtsverteilung [%]			57,44	42,56		
		Gewichtsverteilung [kg]			63,18	46,82		
+	Motoren		40	-1444	0	-57760	0	
+	Getriebe		8	-1500	0	-12000	0	
+	Stromrichter		5	-1342	200	-6710	1000	
+	Batterie Vorne		50	-700	-110	-35000	-5500	
+	Batterie hinten		25	-1150	-110	-28750	-2750	
+	Kühlung		2,5	-730	60	-1825	150	
+	Fahrer		80	-400	150	-32000	12000	
+	Felgen vorne		9	0	0	0	0	
+	Felgen hinten		9	-1575	0	-14175	0	
MaxWheel		ohne Fahrer [kg]	259	338,5	-801	10	-774	10
		Gewichtsverteilung [%]			50,87	49,13		
		Gewichtsverteilung [kg]			172,18	166,32		

Tabelle 12 Berechnung Schwerpunktslage

MaxWheel	339 kg inkl. Fahrer	
	Vorderachse	Hinterachse
Gewichtsverteilung in [%]	50,9	49,1
Gewichtsverteilung in [kg]	172,2	166,3
Schwerpunkts-Lage absolut in z-Richtung über der Fahrbahn in [mm]	260	

Tabelle 13 Gewichtsverteilung MaxWheel

2.7. Auswertung

Endurance

Die in 2.3 „Simulation Endurance“ beschriebene Simulation des Ausdauerrennens wurde - wie bereits erwähnt - über verschiedene Fahrzeugmassen und Wirkungsgrade durchgeführt. Nach dem Geschwindigkeitsvergleich der beiden betrachteten Rennen in Abbildung 4 wird nun die Leistungsverteilung im Histogramm Abbildung 6 von den Rennen in England und Deutschland verglichen. Für den Vergleich wird die Fahrzeugmasse des TANKIA von 200 kg verwendet. Um die wirkliche mechanisch notwendige Leistung darzustellen, wurden sowohl der Antriebswirkungsgrad $\mu_{Antrieb}$ als auch der Rekuperationswirkungsgrad $\mu_{Rekuperation}$ auf eins gesetzt.

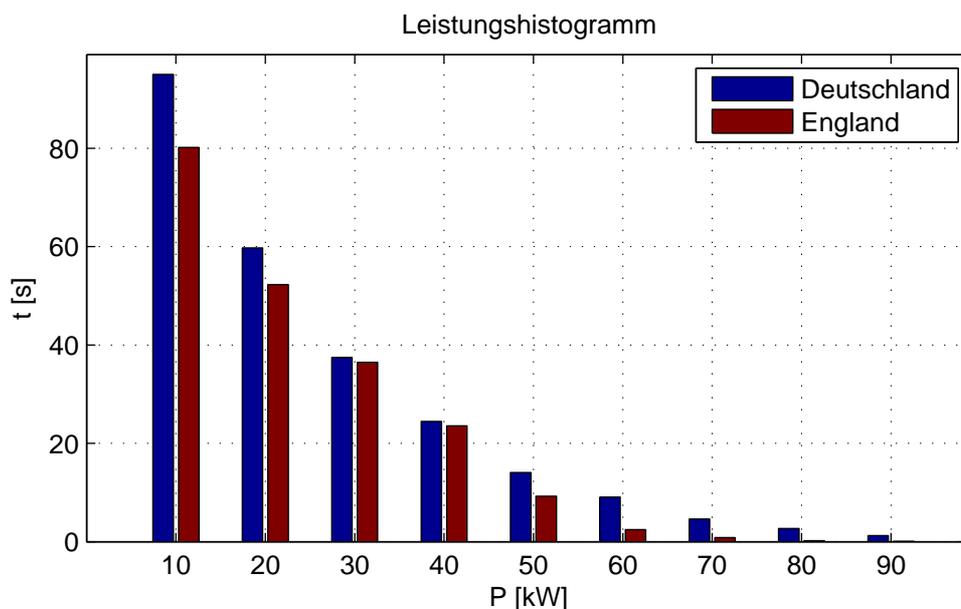


Abbildung 6 Leistungshistogramm Vergleich Deutschland und England

Das Ergebnis der Simulation soll die Maximalwerte darstellen, die zur Verfügung stehen müssen, um das geforderte Geschwindigkeitsprofil zu erreichen. Aus Abbildung 6 ist ersichtlich, dass beim Rennen in Deutschland häufiger größere Leistungen vorkommen als beim Endurance in England.

Die folgenden Betrachtungen basieren auf dem Rennen in Deutschland. Der Vergleich in Abbildung 7 zeigt das Leistungshistogramm für ein Fahrzeug mit 200 kg und 260 kg. Das Leistungsspektrum verschiebt sich erwartungsgemäß hin zu größeren Leistungen.

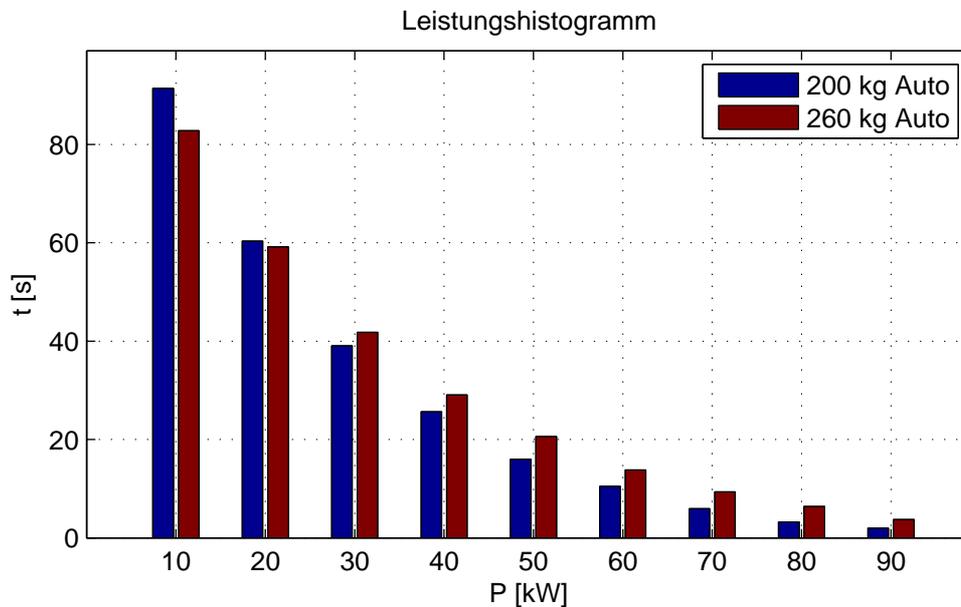


Abbildung 7 Leistungshistogramm mit verschiedenen Fahrzeugmassen

Die mittlere Antriebsleistung steigt mit dem Gewicht des Fahrzeugs an. Reichen für ein 200 kg Fahrzeug im Durchschnitt 14 kW, so muss bei einem 260 kg Fahrzeug bereits eine durchschnittliche Leistung von 18 kW aufgebracht werden, um dieselbe Rundenzeit zu erreichen.

Bei der Betrachtung der benötigten Energie über das gesamte Rennen wird nun der Faktor zwei berücksichtigt, um auf die gesamte Renndistanz zu schließen. In den vorhergehenden Abschnitten wurde nur eine Hälfte des Rennens betrachtet, um bei der Simulation Rechenzeit und Speicher einzusparen. In Tabelle 14 ist die benötigte Energie über den Antriebswirkungsgrad und der Fahrzeugmasse dargestellt. Es wird keine Rekuperation eingerechnet.

Wird das Gewicht des Fahrzeugs mit 260 kg und ein Antriebswirkungsgrad von 0,7, angenommen, so ergibt sich die Energie für die Batterie von 8,1 kWh ohne Rekuperation. Bei einem Rekuperationswirkungsgrad von 0,2, ergibt sich die minimal verbrauchte Energie von 7,5 kWh.

Deutschland							England						
Energie in kW/h		Wirkungsgrad					Energie in kW/h		Wirkungsgrad				
		1	0,9	0,8	0,7	0,6			1	0,9	0,8	0,7	0,6
Fahrzeugmasse + 80 kg Fahrer	180	4,47	4,97	5,59	6,38	7,45	180	3,56	3,95	4,45	5,08	5,93	
	200	4,77	5,30	5,96	6,81	7,95	200	3,80	4,22	4,75	5,42	6,33	
	220	5,07	5,63	6,33	7,24	8,44	220	4,03	4,48	5,04	5,76	6,72	
	240	5,37	5,96	6,71	7,67	8,94	240	4,27	4,74	5,34	6,10	7,12	
	260	5,67	6,29	7,08	8,09	9,44	260	4,51	5,01	5,63	6,44	7,51	
	280	5,96	6,63	7,46	8,52	9,94	280	4,74	5,27	5,93	6,78	7,91	
	300	6,26	6,96	7,83	8,95	10,44	300	4,98	5,53	6,23	7,12	8,30	
	320	6,563	7,292	8,204	9,376	10,94	320	5,22	5,80	6,52	7,45	8,70	
	340	6,862	7,625	8,578	9,804	11,44	340	5,45	6,06	6,82	7,79	9,09	
	360	7,162	7,958	8,952	10,23	11,94	360	5,69	6,32	7,11	8,13	9,49	
	380	7,461	8,29	9,327	10,66	12,44	380	5,93	6,59	7,41	8,47	9,88	
	400	7,761	8,623	9,701	11,09	12,93	400	6,17	6,85	7,71	8,81	10,28	

Tabelle 14 Benötigte Energie bei verschiedenen Fahrzeugmassen und Wirkungsgraden in Deutschland und England

Acceleration

Für die Auswertung der Acceleration-Simulation wird im ersten Schritt von optimalen Fahrbahnbedingungen ausgegangen und bei verschiedenen Fahrzeugmassen und Maximalleistungen die erreichbare Zeit über die Distanz von 75 Meter bestimmt.

Optimale Fahrbahnbedingungen $\mu_H = 1,5$							
P Max [kW]		50	60	70	80	90	100
M Auto [kg]	t [s]						
180		3,92	3,84	3,80	3,78	3,77	3,77
200		3,95	3,87	3,82	3,79	3,78	3,77
220		3,99	3,90	3,84	3,80	3,79	3,78
240		4,03	3,93	3,86	3,82	3,80	3,78
260		4,07	3,96	3,89	3,84	3,81	3,79
280		4,11	3,99	3,91	3,86	3,82	3,8

Tabelle 15 Beschleunigungszeiten bei verschiedenen Maximalleistungen und Fahrzeugmassen

Wird für den MaxWheel beispielsweise ein Gewicht von 260 kg und eine maximale Antriebsleistung von 90 kW mechanisch angenommen, kann durch Variation von μ_H die Zielzeit für verschiedene Fahrbahnbedingungen errechnet werden.

μ_H []	t [s]
0,8	6,03
1,0	5,11
1,2	4,49
1,4	3,98
1,5	3,81

Tabelle 16 Beschleunigungszeiten mit verschiedenen Fahrbahnbedingungen

2.8. Zusammenfassung der Ergebnisse

Parameter	Einheit	Minimalwert	Optimum	Maximalwert
Batterie				
Volumen	[l]	80	100	140
Energiegehalt	[kWh]	7,5	8,1	9,4
Energiedichte	[Wh/l]	67,1	93,7	
Spannung	[V]	200	400	400
Motor				
Durchschnittsleistung	[kW]	15	18	25
Maximalleistung	[kW]	60	90	100
Volumen	[l]		4	5,6
Leistungsdichte	[kW/l]		4,5	
Maximale Fahrzeuggeschwindigkeit	[m/s]	30	38	45
Untersetzung	[-]	1	5	10
Maximaldrehzahl	[U/min]	1500	7500	15000

Tabelle 17 Zusammenfassung der Ergebnisse

3. Auswahl der Komponenten

3.1. Batterie

Folgendes Kapitel soll einen Überblick über Technologien von chemischen Energiespeichern für elektrische Energie geben. Speziell wird auf Akkumulatoren eingegangen, die auf einem Entwicklungsstand sind, um in Elektrofahrzeuge eingesetzt zu werden. Weitere Einschränkungen für den Einsatz im MaxWheel sind die Vorgaben des Reglements, der beschränkte Bauraum und das Gewicht. Im Vergleich der Energiedichten von konventionellen chemischen Energiespeichern und verschiedener Batterietechnologien wird klar, dass der Energiespeicher in einem Elektroauto einen maßgeblichen Einfluss auf das Gesamtgewicht hat. Nachstehend werden die grundlegenden Eigenschaften und die Funktionsweise von Batterien beschrieben und die Charakteristiken von Blei-Batterien, Nickel-Cadmium-Batterien, der Lithium-Ionen-Batterien und die Natrium-Nickelchlorid-Batterien aufgezeigt (Hoffmann 2010).

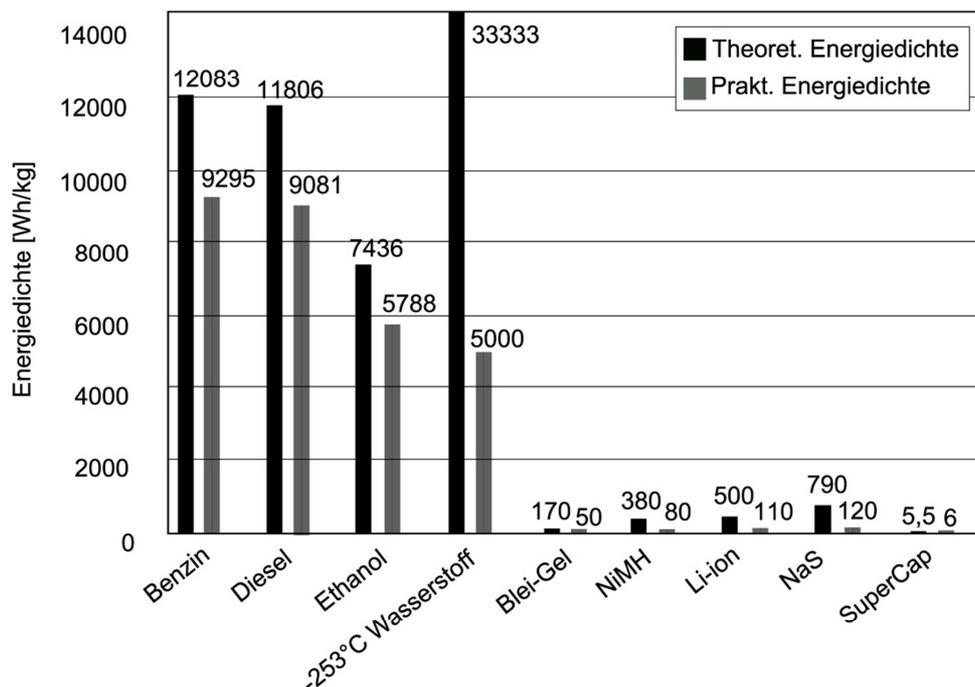


Abbildung 8 Vergleich von Kraftstoffen (Hoffmann 2010)

3.1.1. Technologien und Theorie

Für den Einsatz in Fahrzeugen werden in erster Line Sekundärelemente eingesetzt. Diese zeichnen sich dadurch aus, dass sie reversibel sind, das heißt, sie sind wiederaufladbar. Jeder Akkumulator besteht prinzipiell aus einer elektrochemischen Zelle, in der die chemisch gespeicherte Energie in elektrische umgewandelt wird und beim Ladevorgang wieder zurück in chemische Energie. Zwei unterschiedliche Metalle befinden sich in einem Elektrolyten, der für Ionen leitfähig ist. Der Separator ist für die elektrische Isolation zwischen den beiden Polen verantwortlich, muss jedoch Ionen gut leiten. Bei der Entladung fließen Elektronen über den Verbraucher vom unedleren Metall (negativer Pol) zum edleren Metall (positiver Pol). Durch den Elektronenfluss oxidiert das Metall des negativen Pols, Ionen werden frei und fließen durch den Elektrolyten zum positiven Pol und lagern sich dort an (Hoffmann 2010).

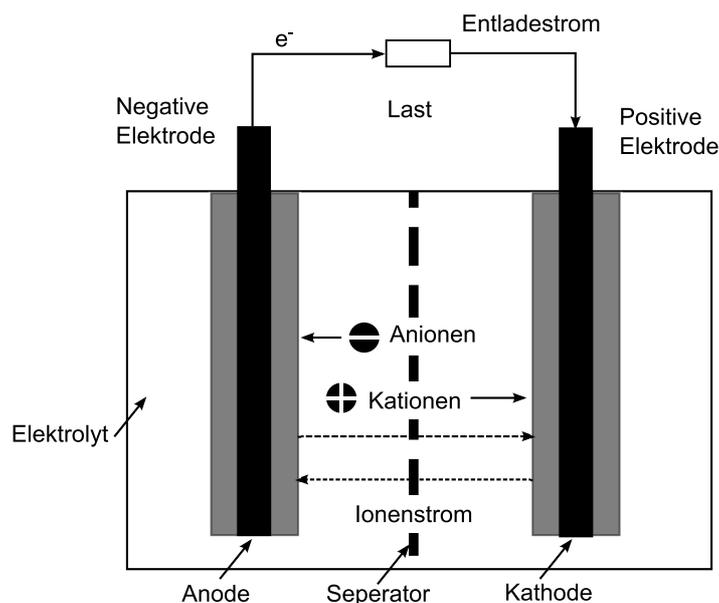


Abbildung 9 Funktionsweise Batterie (Hoffmann 2010)

Nennspannung

Die Spannung der Batterie ist von der Metallpaarung abhängig. Jedes Metall hat eine spezifische Spannung. Die Differenz der Spannung, die aus der elektrochemischen Spannungsreihe Tabelle 18 abgelesen werden kann, ergibt die Nennspannung der jeweiligen Batterie.

Reduzierte Form	Oxidierter Form		Standardpotential in V
<i>Li</i>	$\rightleftharpoons Li^+$	$+e^-$	-3,045
<i>Na</i>	$\rightleftharpoons Na^+$	$+e^-$	-2,71
<i>Mg</i>	$\rightleftharpoons Mg^{2+}$	$+2e^-$	-2,36
<i>Al</i>	$\rightleftharpoons Al^{3+}$	$+3e^-$	-1,66
<i>Zn</i>	$\rightleftharpoons Zn^{2+}$	$+2e^-$	-0,76
<i>Fe</i>	$\rightleftharpoons Fe^{2+}$	$+2e^-$	-0,41
<i>Cd</i>	$\rightleftharpoons Cd^{2+}$	$+2e^-$	-0,40
<i>Pb</i> + SO_4^{2-}	$\rightleftharpoons PbSO_4$	$+2e^-$	-0,36
<i>Ni</i>	$\rightleftharpoons Ni^{2+}$	$+2e^-$	-0,25
<i>Sn</i>	$\rightleftharpoons Sn^{2+}$	$+2e^-$	-0,14
<i>Pb</i>	$\rightleftharpoons Pb^{2+}$	$+2e^-$	-0,13
<i>Fe</i>	$\rightleftharpoons Fe^{3+}$	$+3e^-$	-0,036
$H_2 + 2H_2O$	$\rightleftharpoons 2H_3O^+$	$+2e^-$	0
Sn^{2+}	$\rightleftharpoons Sn^{4+}$	$+4e^-$	+0,15
<i>Cu</i>	$\rightleftharpoons Cu^{2+}$	$+e^-$	+0,15
$S + 3H_2O$	$\rightleftharpoons Cu^+H_2SO_3 + 4H^+$	$+2e^-$	+0,45
Fe^{2+}	$\rightleftharpoons Fe^{3+}$	$+e^-$	+0,77
<i>Ag</i>	$\rightleftharpoons Ag^+$	$+e^-$	+0,80
$2Br^-$	$\rightleftharpoons Br_2$	$+2e^-$	+1,07
$2Cl^-$	$\rightleftharpoons Cl_2$	$+2e^-$	+1,36
$PbSO_4 + 2H_2O$	$\rightleftharpoons PbO_2 + SO_4^{2-} + 4H^+$	$+2e^-$	+1,67
$2F^-$	$\rightleftharpoons 2F$	$+2e^-$	+2,87

Tabelle 18 Elektrochemische Spannungsreihe (Hoffmann 2010)

Klemmenspannung

Die Klemmenspannung ist abhängig vom Ladezustand der Batterie und vom Momentanwert des Stroms multipliziert mit dem Innenwiderstand der Zelle.

Leerlaufspannung

Die Leerlaufspannung der Batterie wird im unbelasteten Zustand und nach den inneren chemischen Ausgleichsvorgängen gemessen. Sie ist abhängig vom State of Charge (SOC) und ist somit ein Maß für den Ladezustand der Batterie.

Entladeschlussspannung

Die Entladeschlussspannung ist die Spannung, die nicht dauerhaft unterschritten werden darf, ohne dass die Zellen einen bleibenden Schaden davontragen. Sie wird vom Hersteller spezifiziert.

Ladeschlussspannung

Die Ladeschlussspannung bildet die obere Grenze, die beim Laden erreicht werden kann. Dauerhaftes Überschreiten dieser Schranke kann speziell bei Lithium-Ionen-Batterien zur Entflammung und Zerstörung der Zellen führen.

Kapazität

Die Kapazität wird in Amperestunden angegeben. Der theoretische Wert wird aus dem aktiven Material in der Zelle bestimmt. Für die praktische Anwendung ist dieser Wert von geringer Aussagekraft, da die effektiv entnehmbare Kapazität stark vom Belastungsgrad und von der Temperatur abhängt. Die nutzbare Kapazität wird in Abhängigkeit der Entladerate und der Temperatur über die Zellspannung angegeben.

C-Rate

Mit der C-Rate wird - abhängig von der Nennkapazität – angegeben, mit welchem Strom die Batterie geladen oder entladen wird. 1 C bedeutet, dass die Batterie innerhalb einer Stunde entladen ist, oder zum Beispiel bei einer 5 Ah Batterie, 5 A für eine Stunde liefern kann.

Ladezustand SOC

Der SOC (State of Charge) gibt den Ladezustand der Batterie in Prozent bezogen auf die Nennkapazität an.

3.1.2. Verfügbare Batterien (Hoffmann 2010)

Die Bleibatterie

Die Bleibatterie ist die wohl bekannteste Batterie im Kraftfahrzeug. Fast jedes konventionelle Auto ist mit einer Bleibatterie ausgestattet. Für ein Elektrofahrzeug und speziell für ein Rennfahrzeug eignet sich die Bleibatterie aufgrund ihres Gewichtes nicht. Dennoch werden hier zum Vergleich die technischen Daten angeführt.

<i>Pb/Pb O₂</i> Batterie	Optimierung		
	Einheit	Hochenergie	Hochleistung
Zellnennspannung	[V]	2,1	2,1
Spezifische Energie	[Wh/kg]	35	32
Spezifische Leistung	[W/kg]	200	430
Energiedichte	[Wh/l]	90	68
Leistungsdichte	[W/l]	510	910

Tabelle 19 Bleibatterie

Nickel-Metallhydrid-Batterie

Die Nickel-Metallhydrid-Batterie wird bereits in einigen Hybrid- und Elektrofahrzeugen eingesetzt. Die Vorteile dieser Technologie sind die lange Lebensdauer, der große Temperaturbereich und die hohe Eigensicherheit. Speziell im Vergleich mit Lithium-Ionen-Batterien sind folgende Nachteile zu nennen: hohes Systemgewicht, geringe Energieeffizienz und geringe Nennspannung.

<i>NiMH</i> Batterie	Optimierung		
	Einheit	Hochenergie	Hochleistung
Zellnennspannung	[V]	1,25 – 1,35	1,25 – 1,35
Spezifische Energie	[Wh/kg]	70	43
Spezifische Leistung	[W/kg]	140	1300
Energiedichte	[Wh/l]	200	90
Leistungsdichte	[W/l]	400	2700

Tabelle 20 NiMH-Batterie

Lithium-Ionen-Batterien

Lithium-Ionen-Batterien sind ein Sammelbegriff für eine Vielzahl von Batterien mit zumeist Graphit als negativer Elektrode. Die Materialkombination des positiven Pols ist für die Eigenschaften der Zelle entscheidend.

Li Batterien	Einheit	Typ			
		Lithium-Ionen	Lithium-Eisen-Phosphat	Lithium-Nickel-Kobalt-Mangan	Lithium-Titanat
Zellnennspannung	[V]	3,6	3,3	3,7	3,8
Spezifische Energie	[Wh/kg]	120	110	155	72
Spezifische Leistung	[W/kg]	200	1500	1900	4000
Energiedichte	[Wh/l]	250	200	283	-
Leistungsdichte	[W/l]	1000	3000	3700	-

Tabelle 21 Lithium-Ionen-Batterie

3.1.3. Auswahl der Zellen

Aus den Ergebnissen in Kapitel 2 „Anforderungen und Rahmenbedingungen“ und den Nennwerten der Batterien aus Kapitel 3.1.2 „Verfügbare Batterien“ sind die meisten Batterietypen für den Einsatz im MaxWheel nicht geeignet. Dafür sind das vorgegebene Volumen im Auto und die spezifische Energie der Zellen verantwortlich. Die Konzentration bei der Batterieauswahl beschränkte sich somit auf die Vertreter der Lithium-Ionen-Batterien. Die reine Lithium-Ionen-Batterie ist für den Einsatz in Elektrofahrzeugen aufgrund der sicherheitstechnischen Aspekte nicht sinnvoll. Genauer betrachtet wurden Produkte mit Lithium-Eisen-Phosphat (LiFePO) und Lithium-Nickel-Kobalt-Mangan (NMC) Technologie. Die Auswertung der infrage kommenden Zellen zeigte, dass die NMC Zellen aufgrund der Bauform, der Nennspannung und dem Gewicht die beste Wahl sind.

Die Eigenschaften der eingesetzten Zelle sind in der Tabelle 22 zusammengefasst.

Hersteller	EnerDel, enertech	
Bauform	Prisma, Softpack	
Kapazität	45	Ah
Nennspannung	3,8	V
Ladeschlussspannung	4,2	V
Entladeschlussspannung	2,5	V
Abmessungen		
Länge	268	mm
Breite	205	mm
Dicke	11	mm
Gewicht	1100	g
Energiedichte	283,0	Wh/l
Spezifische Energie	155,5	Wh/kg

Tabelle 22 Technische Daten Batterie

Um die Anforderungen aus Tabelle 17 zu erfüllen, werden die Zellen in Serie verschalten und die Kenngrößen des Verbunds sind in Tabelle 23 dargestellt.

Anordnung	72	Zellen in Serie
Nennspannung	273,6	V
Spannung max	298	V
Spannung min	227,2	V
Energie	12,14	kWh
Gewicht	78	Kg
Volumen	46,0	l

Tabelle 23 Aufbau des Batteriepacks

3.2. Batteriemanagement

3.2.1. Anforderungen

Das Batteriemanagement System (BMS) ist in Batteriesystemen mit Serienschaltung notwendig, um den Zustand der einzelnen Zellen zu überwachen. Aufgrund von Toleranzen der Zelleigenschaften hat jede Zelle eine leicht unterschiedliche Kapazität und dadurch auch abweichende Spannungen. Dennoch müssen jederzeit für jede Zelle die Grenzwerte eingehalten werden. Eine Unter- oder Überschreitung der Spannungs- sowie Temperaturgrenzwerte kann bleibende Schäden an den Zellen verursachen sowie sicherheitskritische Reaktionen in den Batterien hervorrufen, die zur Entgasung und Entflammung führen können. Das Balancing ist die Maßnahme, die das BMS ergreifen muss, um die Potentialdifferenzen der einzelnen Batterien auszugleichen. Hierbei gibt es zwei unterschiedliche Ansätze, das passive und das wesentlich komplexere aktive Balancing. Beim passiven Balancing wird zu den Zellen, die im Vergleich zu den anderen Zellen auf einem höheren Potential sind, ein Belastungswiderstand parallelgeschaltet, um dadurch alle Batterien auf dasselbe Spannungsniveau zu bringen. Das aktive Balancing hingegen nutzt die Energie, die im vorher beschriebenen Verfahren in den Widerständen verheizt wird, um diese in andere Zellen oder in die Gesamtbatterie zu speisen. Der Vorteil ist, dass die Ausgleichsenergie nicht als Verlust betrachtet wird, sondern wieder in die Batterie zurückgespeist wird. Dem entgegen steht natürlich der schaltungstechnisch kompliziertere Aufbau. In einem Rennfahrzeug, das mit voll aufgeladenen und ausbalancierten Zellen an den Start gehen kann und nur einen geringen Prozentsatz an Rekuperationsvermögen hat, reicht ein passives Balancing aus, da die Zellen über eine Entladung nur weniger als ein bis drei Prozent Abweichung der Spannungen aufweisen. Im Belastungsfall kann nicht über die Klemmenspannung auf den SOC der Batterie zurückgeschlossen werden. Beim Formula Student Electric Auto kann unter bestimmten Voraussetzungen über das Integral des Stroms der aktuelle SOC bestimmt werden. Voraussetzung ist, dass nach dem Laden die Leerlaufspannung gemessen wird. Diese ist proportional zum Start SOC. Das Reglement verlangt eine Visualisierung von jeder Zellspannung und von den gemessenen Temperaturen. Dies bedeutet, im Fall von MaxWheel, dass Messwerte von 72 Spannungen und 42 Temperaturen gesammelt werden müssen und über CAN-Bus den anderen Geräten im

Fahrzeug zur Verfügung gestellt werden. Eine Übersicht der Anforderungen ist in Tabelle 24 zusammengefasst.

3.2.2. Auswahl der Hauptkomponenten

Im MaxWheel wird ein BMS mit passivem Balancing eingesetzt. Das Packaging für die Zellen, deren elektrischen Verbindung und das BMS wird im Detail im Kapitel 4 „Batterie Management System“ abgehandelt. Hier soll ein Überblick über die verwendeten Hauptkomponenten und deren Funktion gegeben werden.

Die integrierte Schaltung AD7280 von Analog Devices ist speziell für BMS Anwendungen entwickelt worden. Es können pro IC sechs Batteriespannungen und sechs Temperaturen gemessen werden. Diese können über eine Serial Peripheral Interface (SPI) Schnittstelle ausgelesen werden. Es stehen auch digitale Ausgänge zur Verfügung, um ein Balancing zu realisieren. Durch die Kaskadierung der AD7280 können auch mehr als sechs Zellen mit einem Controller ausgewertet werden. Die Verarbeitung der Daten und die Kommunikation mit dem restlichen Auto wird auf einem AT90CAN von Atmel realisiert. Um die galvanische Trennung von Hochvolt- und Kontrollsystem zu gewährleisten wird der CAN-Bus über einen Optokoppler ausgeführt.

Anforderungen an das BMS für 72 Zellen			
Spannungsmessung		72x	
	Bereich	2,5 – 4,2	[V]
	Auflösung	0,005	[V]
Temperatur		42x	
	Bereich	0 - 100	[°C]
	Auflösung	0,5	[°C]
Balancing		72x	
	Strom	2	[A]

Tabelle 24 Anforderungen an das BMS

3.3. Motor

3.3.1. Antriebskonzepte

Die Charakteristik der Elektromotoren kann allgemein in Grundstellbereich und Feldschwächbereich eingeteilt werden. Im Grundstellbereich kann vom Stillstand aus das maximale Moment abgegeben werden, bis die Spannungsgrenze und somit die Maximalleistung erreicht ist. Im Feldschwächbereich wird die Leistung konstant gehalten, der magnetische Fluss in der Maschine und das Moment sinken proportional mit dem Kehrwert der Drehzahl ab. Diese Drehmomentcharakteristik entspricht im Wesentlichen der Drehmomentanforderung der Antriebsräder. In Abbildung 10 ist die angestrebte Zugkrafthyperbel eines Verbrennungskraftmotors mit Schaltgetriebe dem Drehmomentverlauf einer elektrischen Maschine gegenübergestellt. Unschwer zu erkennen ist die Analogie zwischen den zwei Kurven. Bei richtiger Dimensionierung des Elektromotors kann somit auf ein Schaltgetriebe verzichtet werden. Der Motor kann direkt die Räder antreiben oder mit einer konstanten Übersetzung auf das Drehzahlniveau der Antriebswelle gebracht werden (Hoffmann 2010, 114-117).

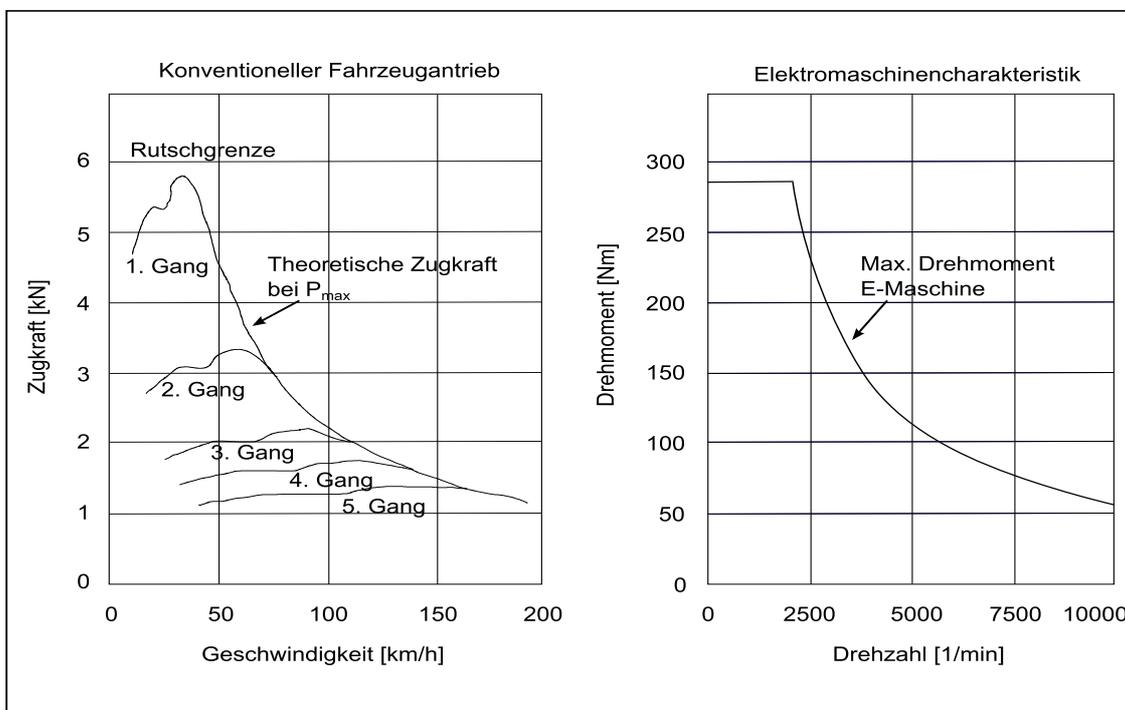


Abbildung 10 Maximale Zugkraft eines Fahrzeugs mit Verbrennungsmotor (Hoffmann 2010, 117)

Der mechanische Aufbau des Antriebsstranges kann somit wesentlich vereinfacht werden. Es ist keine Kupplung zum Anfahren notwendig, da der Elektromotor vom Stillstand aus das maximale Moment aufbringen kann. In einem elektrisch betriebenen Fahrzeug stehen somit mehr Freiheiten im Design des Antriebsstranges zur Verfügung. Die Vor- und Nachteile einiger Varianten, die für ein Formula Student Electric Fahrzeug in Frage kommen, werden nachstehend aufgelistet:

a) ein Motor

Bei dieser Variante wird der Verbrennungskraftmotor inklusive Getriebe durch einen Elektromotor ersetzt. Die Verteilung des Drehmoments an den Antriebsrädern stellt sich über das mechanische Differential ein. In dieser einfachsten Konfiguration können die Vorteile des elektrischen Antriebs nur begrenzt eingesetzt werden, da ein Eingriff auf die Fahrdynamik nur sehr eingeschränkt möglich ist.

b) zwei Motoren an der Hinterachse

In dieser Konfiguration vereinfacht sich der mechanische Aufbau um das Differential, da beide Räder getrennt von jeweils einem Motor angetrieben werden. Die Komplexität des elektrischen Systems erhöht sich. Die durch dieses System gewonnenen Freiheitsgrade können für den aktiven Eingriff in die Fahrdynamik genutzt werden. Weiter kann die Rekuperation der Bremsenergie besser ausgenutzt werden ohne die Stabilität des Fahrzeugs zu gefährden. In dieser Anordnung wären Radnabenmotoren denkbar, die jedoch die ungefederten Massen wesentlich erhöhen würden, dies würde sich negativ auf das Fahrverhalten auswirken. Mit sogenannten Radnabenmotoren werden die Motoren und das Untersetzungsgetriebe am Fahrzeug platziert, die Räder werden über Halbachsen angetrieben.

c) vier Motoren

Im Gegensatz zur vorher beschriebenen Variante werden auch hier die Vorderräder angetrieben. Im Rennfahrzeug ist aus mechanischen Gründen nur ein Radnabenmotor denkbar. Jedoch können hier wesentlich kleinere Motoren eingesetzt werden, die hauptsächlich für fahrdynamische Eingriffe und für die Rekuperation der Bremsenergie zuständig sind. Daher ist die zusätzliche ungefederte Masse akzeptabel. Die Komplexität des Gesamtsystems steigt enorm an.

Für den Einsatz im MaxWheel wurde die Variante mit zwei Motoren an der Hinterachse umgesetzt.

3.3.2. Auswahl und Auslegung des Motors

In Tabelle 25 sind die Vor- und Nachteile der verschiedenen elektrischen Maschinen gegenübergestellt. Da für ein Rennfahrzeug besonders die Leistungsdichte und die Regelbarkeit - weniger die Kosten - im Vordergrund stehen, wurden sehr kompakte, wassergekühlte, permanenterregte Synchronmaschinen eingesetzt.

	Gleichstrom- maschine	Synchronmaschine		Asynchron- maschine
	Permanent erregt	Fremd erregt	Permanent erregt	
Leistungsdichte	-	0	++	+
Wirkungsgrad	-	+	++	0
Regelbarkeit	++	+	+	0
Geräusch	-	0	++	+
Überlastfähigkeit	-	+	0	++
Kosten	+	0	0	++
Stand der Technik	+	-	++	++
Sicherheit	-	++	-	++

Tabelle 25 Bewertungsmatrix von Elektromaschinen (Hoffmann 2010, 129)

Durch die enge Zusammenarbeit mit einem Wirtschaftspartner konnten maßgeschneiderte Motoren gefertigt werden, die den Leistungsanforderungen und den beschränkten Platzverhältnissen gerecht wurden. Beide Motoren sind im Heck des MaxWheel integriert und treiben über ein Kettengetriebe die Hinterräder an. Aus der Schnittzeichnung in Abbildung 11 sind das Packaging und die Funktionsweise des Antriebsstrangs ersichtlich.

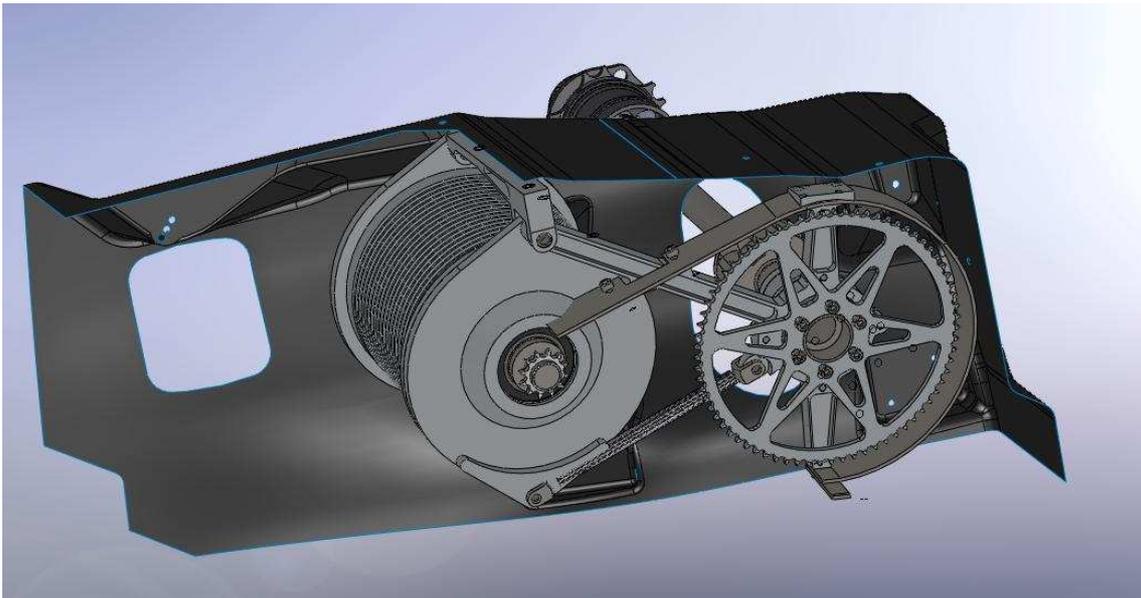


Abbildung 11 Antriebskonzept

Die Technischen Daten sind in Tabelle 26 zusammengefasst:

Parmanenterregter Synchronmotor mit innenliegendem Rotor	
Pole	10
Betriebsspannung	200-405 V
Nomineller Phasenstrom	121 A
Maximaler Phasenstrom	370 A
Nominales Drehmoment	56 Nm
Maximales Drehmoment	150 Nm
Übersetzung	1:5,5

Tabelle 26 Technische Daten Motor

Der Stator der Motoren wird mit einem Wassermantel gekühlt. Jeweils ein Motor und der dazugehörige Stromrichter sind in einem eigenen Kühlkreis geschaltet.

3.4. Stromrichter

3.4.1. Anforderungen Verfügbarkeit

Der Stromrichter hat die Aufgabe aus der Batteriespannung die für den Betrieb des Motors notwendige dreiphasige Wechselspannung zu erzeugen. Um bei dieser fünfpolpaarigen Maschine die Maximalgeschwindigkeit zu erreichen, muss der Stromrichter mit einer Frequenz von 10 kHz arbeiten:

$$v_{max} \approx 50 \frac{m}{s} \quad (32)$$

$$n_{max_Rad} = \frac{50 \frac{m}{s}}{2 \cdot r_{Rad_aussen} \cdot \pi} = 31,8 \frac{1}{s} \quad (33)$$

$$n_{max_Motor} = n_{max_Rad} \cdot i_{mech} = 222,6 \frac{1}{s} \quad (34)$$

Somit beträgt die maximale Sinusfrequenz $f_{max_elektrisch}$, die der Stromrichter nachbilden muss:

$$f_{max_elektrisch} = n_{max_Motor} \cdot p = 1113Hz \quad (35)$$

Bei einer Schaltfrequenz von 10 kHz stehen für die Maximalfrequenz noch 8,9 Stützstellen pro Periode zur Verfügung, um den Sinusverlauf nachzubilden.

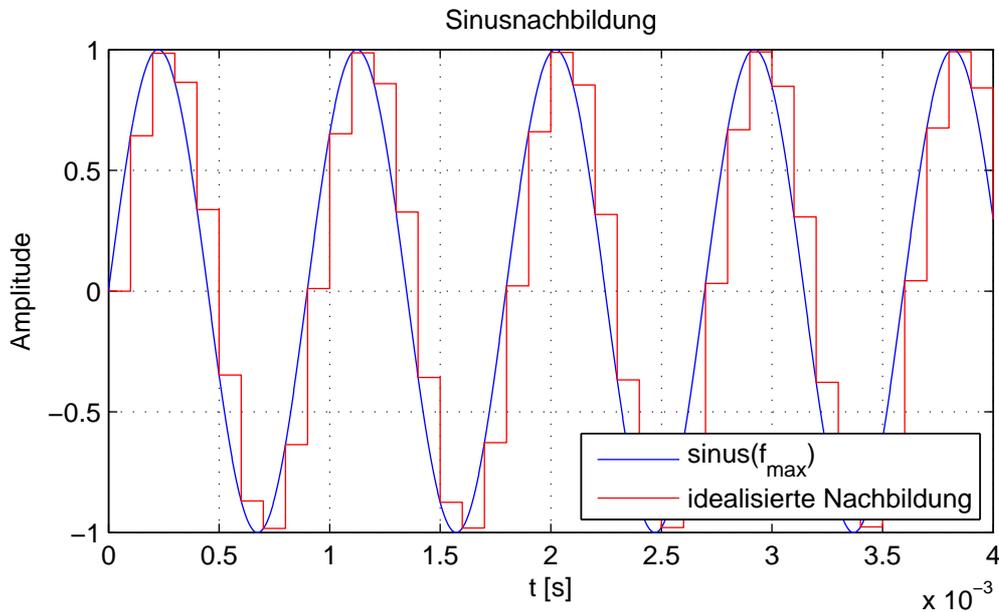


Abbildung 12 Sinusnachbildung

Das zentrale Bauteil des Stromrichters ist der Halbleiter, der möglichst verlustarm die Betriebsspannungen und Ströme schalten kann. Die verwendbaren Halbleiter können in drei Technologien eingeteilt und wie folgt verglichen werden:

	IGBT	MOSFET	Bipolarer Transistor
Strombelastbarkeit	sehr gut	befriedigend	gut
Durchlassverluste	gering	hoch	gering
Sperrvermögen	sehr gut	befriedigend	gut
Einschaltzeit	mittel	kurz	mittel
Ausschaltzeit	mittel	kurz	lang
Schaltverluste	mittel	gering	hoch
Steuerleistung	niedrig	niedrig	hoch

Tabelle 27 Vergleich IGBT, MOSFET und bipolarem Transistor (Beuth und Beuth 2003, 79)

In weiterer Folge kann ihr Einsatzgebiet über die Schaltfrequenz und die übertragene Leistung eingeteilt werden. Aus Abbildung 13 ist ersichtlich, dass sich für die Anwendung im MaxWheel ein Stromrichter auf Basis von IGBTs am besten eignet.

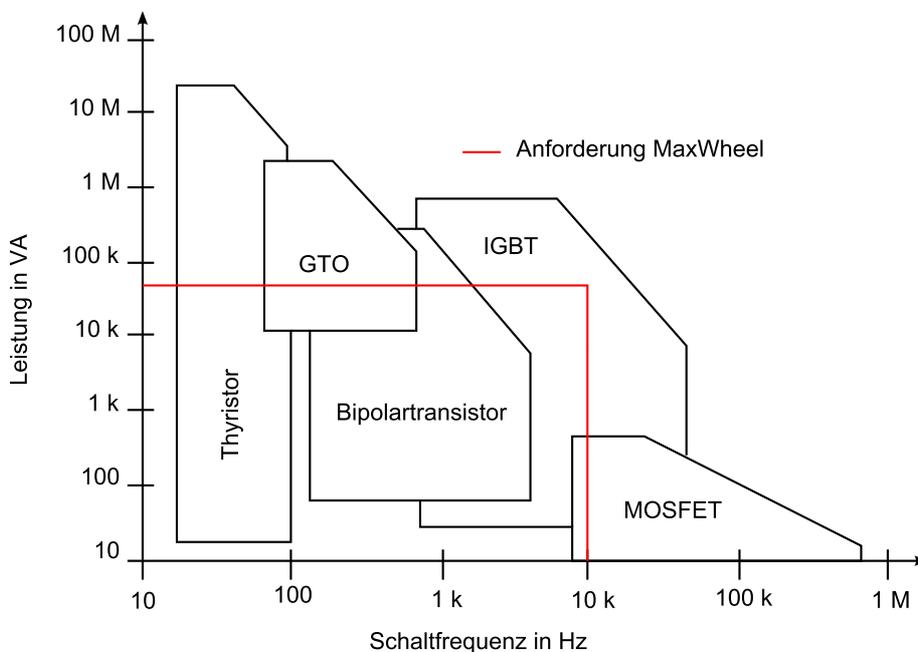


Abbildung 13 Einsatzbereich der wichtigsten steuerbaren elektronischen Bauelemente (Riefenstahl 2006)

3.4.2. Eingesetzte Komponenten

Der Stromrichter des Formula Student Electric Boliden wurde in Zusammenarbeit mit Infineon Technologies auf Basis des Hybrid Kit1 aufgebaut. In diesem Evaluation Kit sind das IGBT Modul HybridPACK™1, die IGBT Treiber, deren galvanische Trennung, eine galvanisch getrennte Spannungsmessung des Zwischenkreises, ein Mikrokontroller (TC1767) und die Sensorinterfaces für die Strommessung und den Motorresolver sowie Kommunikations- und Programmierschnittstellen integriert. Ein passender Zwischenkreiskondensator kann direkt über Schraubklemmen angeschlossen werden. Das folgende Blockschaltbild zeigt die prinzipielle Verschaltung und Funktionsweise.

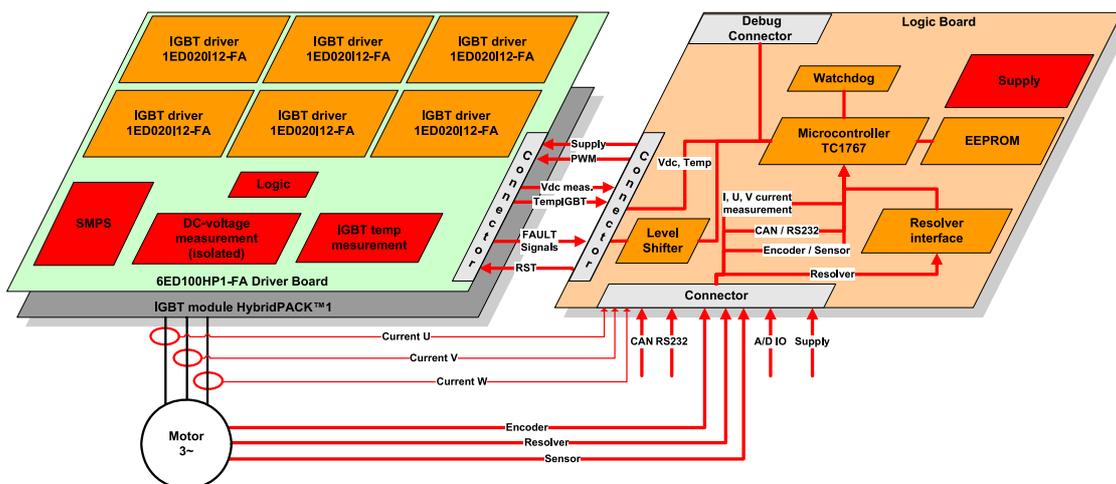


Abbildung 14 Blockschaltbild Stromrichter (Infineon Technologies)

Für die Strommessung kommen Sensoren der Firma LEM Components zum Einsatz. Diese Sensoren funktionieren auf dem Prinzip des Halleffekts. Somit ist die galvanische Trennung sichergestellt. Der Nennstrom beträgt 200 A RMS mit einer Genauigkeit von weniger als einem Prozent vom Nennstrom. Die Grenzfrequenz liegt bei 20 kHz.

Der Winkel der Motorwelle wird mit einem Sinus-Cosinus-Encoder des Typs Singlsyn® der Firma Tamagawa Seiki gemessen. Die Erregung des Sensors und die Auswertung der Messsignale ist Aufgabe des Sensorinterfaces vom Hybrid Kit1.

Die weiteren Kenndaten des Stromrichters sind in Tabelle 28 zusammengefasst.

maximale Zwischenkreisspannung	600	V
maximaler Phasenstrom	400	A
Schaltfrequenz	10	kHz
maximale Gesamtverlustleistung	1250	W

Tabelle 28 Technische Daten Stromrichter

Im Fahrzeug kommt pro Motor ein Stromrichter zum Einsatz. Beide Module wurden in einem Aluminiumgehäuse inklusive der Zwischenkreiskondensatoren und der Wasserkühlung untergebracht.

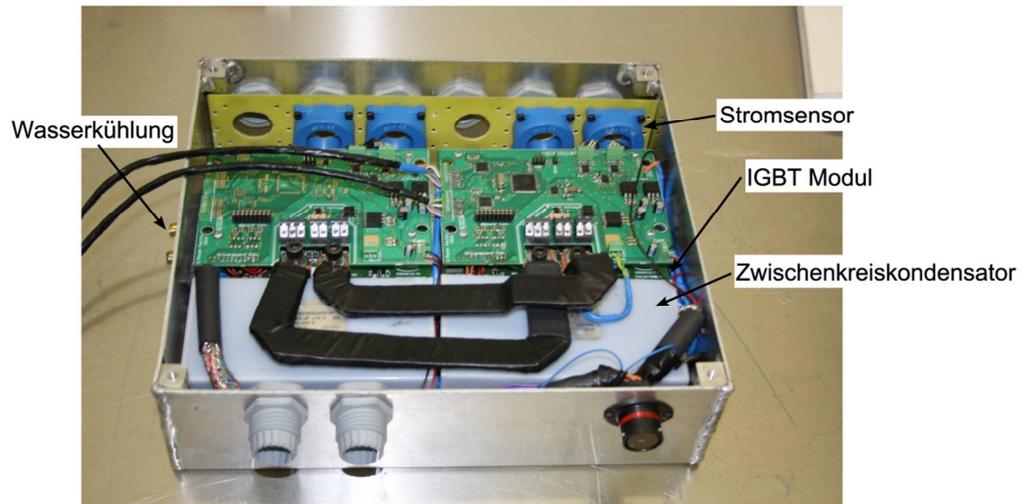


Abbildung 15 Stromrichter Aufbau

3.5. Zentrale Steuereinheit

3.5.1. Aufgaben

Die zentrale Steuereinheit koordiniert und regelt die Prozesse, die zum Betrieb des Fahrzeugs notwendig sind. Die Aufgaben lassen sich in drei Hauptbereiche unterteilen, die elektrische Sicherheit, die Fahrzeugregelung und die Datenaufzeichnung. Die Prozesse sind untereinander vernetzt und beeinflussen sich gegenseitig. Die detaillierte Funktionsweise der einzelnen Bereiche sind im Kapitel 5 „Fahrzeug“ beschrieben. Hier soll nur ein Überblick über die Aufgaben und die daraus folgenden Anforderungen für die zentrale Steuereinheit gegeben werden.

Elektrische Sicherheit

- Isolationswiderstand
- Grenzwerte der Batterien
- Drive by Wire
- Interlock
- Schalten der HV Relais

Fahrzeugregelung

- Sensorwerte einlesen
- Fahrerwunsch interpretieren
- Sollwertvorgabe für Motorregler

Datenaufzeichnung

- Sensorwerte einlesen
- Daten aufzeichnen

Die zentrale Steuereinheit muss besonders für die Regelung und die Datenaufzeichnung ein Echtzeitsystem und mit allen anderen Geräten im Auto kompatibel sein.

3.5.2. Verfügbare Produkte

Im industriellen Bereich gibt es Produkte, die alle geforderten Aufgaben bewältigen können wie zum Beispiel jene von Bernecker + Rainer. Die einfache Bedienung und die Zuverlässigkeit sind besonders hervorzuheben. Die Programmierung, speziell im Bereich der Regelungstechnik, gestaltet sich ebenfalls einfach und komfortabel, da viele Module bereits implementiert sind und es zusätzlich zahlreiche Schnittstellen zu den verschiedenen Entwicklungsumgebungen gibt. Die Kompatibilität zu den anderen Einheiten im Fahrzeug gestaltet sich jedoch schwierig, da die Schnittstellen begrenzt sind und zum Teil nicht den KFZ üblichen Signalpegeln entsprechen - somit wäre eine Signalkonditionierung notwendig. Auch die Betriebsspannung von 24 V müsste speziell für die Steuerung aufbereitet werden. Die relativ große Bauform, die bei Industrieanwendungen eine untergeordnete Rolle spielt, ist jedoch schwierig in einem Rennfahrzeug unterzubringen.

Eine Alternative, um die vorher genannten Nachteile zu umgehen, ist eine Micro-Auto-Box der Firma dSPACE. Neben der kompakten Bauform und dem geringen Gewicht sprechen die zahlreichen Schnittstellen für den Einsatz in einem Fahrzeug. Die automatische Programmcode-Erstellung aus MatLab Simulink Modellen bietet besonders für regelungstechnische Aufgaben eine einfache Bedienung. Zusätzlich kann auch „C-Quellcode“ miteingebunden werden. Die umfangreichen Debugging Tools ermöglichen eine schnelle Verifizierung der programmierten Funktionen. Durch den leistungsstarken Prozessor und das Echtzeitbetriebssystem lassen sich zeitkritische Tasks leicht implementieren und überblicken. Ein großer Nachteil sind die hohen Anschaffungskosten und die Lizenzgebühren für diese Software. Durch ein umfassendes Sponsoring der Firma dSPACE kommt im MaxWheel eine Micro-Auto-Box als zentrale Steuereinheit zum Einsatz. Die weiteren technischen Daten sind in folgender Tabelle zusammengefasst:

Betriebsspannung	6 bis 40 V
Leistungsaufnahme	maximal 20 W
Prozessor	800 MHz 1 MB cache
Speicher	16 MB
Interfaces	
CAN	4 unabhängige Busse
Serial Interface	2
Analog Input	16 Auflösung 12 Bit
Analog Output	8 Auflösung 12 Bit
Digital Inputs	16
Digital Outputs	10
Digital I/O	16
PWM	20 bis zu 100 kHz

Tabelle 29 Eigenschaften Zentrale Steuereinheit

Eine weitere Möglichkeit ist eine individuelle Eigenentwicklung, bei der auf alle Anforderungen Rücksicht genommen werden kann. Ein solches System ist jedoch mit einem hohen personellen Aufwand verbunden, da die Hard- und Software entwickelt werden muss. Aus diesen Gründen wurde ein solches System für den Bau des Fahrzeugs nicht in Erwägung gezogen.

4. Batterie Management System

4.1. Accumulator Container

4.1.1. Aufbau

In Kapitel 2.5 „Platzverhältnisse“ wurde gezeigt, in welchem kleinen Raum die Batterien und das BMS Platz finden müssen. Im Sinne des Reglements wird der Bereich, in dem sich die HV-Komponenten der gesamten Batterie befinden dürfen, „Accumulator Container“ genannt. Ist das Fahrzeug abgeschaltet, dürfen außerhalb des „Accumulator Containers“ keine Spannungen über 60 V auftreten. Das bedeutet, dass auch die Hauptrelais, die Pre-Charging-Einheit, welche für die Ladung der Zwischenkreiskondensatoren zuständig ist, und die HV-Sicherungen in dieser Schutzstruktur untergebracht sein müssen. Die Batterien selbst sind in Packs zu je zwölf Zellen unterteilt und in separate, leicht herausnehmbare Gehäuse verbaut. Die Hauptpole dieser Packs werden mittels berührungssicheren Steckern mit den anderen Packs in Serie geschaltet. So können durch wenige Handgriffe die Verbindungskabel zwischen den Packs entfernt und die maximale auftretende Spannung auf einen Wert kleiner 60 V gesenkt werden. Dies ermöglicht ein sicheres Hantieren mit den Batteriepacks.

Funktion

Die zentrale Steuereinheit gibt Befehle, um die drei Relais in Abbildung 16 zu schalten. Vorab muss sie alle sicherheitstechnischen Überprüfungen durchführen, erst dann kann vom Fahrer der Startknopf im Cockpit betätigt werden. Zunächst wird das Hauptrelais am Minuspol geschaltet. Das Pre-Charging Relais schaltet danach über einen 1,2 k Ω Widerstand den Pluspol der Batterie an den Stromrichter, um den Zwischenkreiskondensator zu laden. Erreicht die Zwischenkreisspannung über 90 % der Batteriespannung kann auch das zweite Hauptrelais den Pluspol mit dem Stromrichter verbinden. Wenn das Pre-Charging Relais öffnet, ist das Fahrzeug fahrbereit.

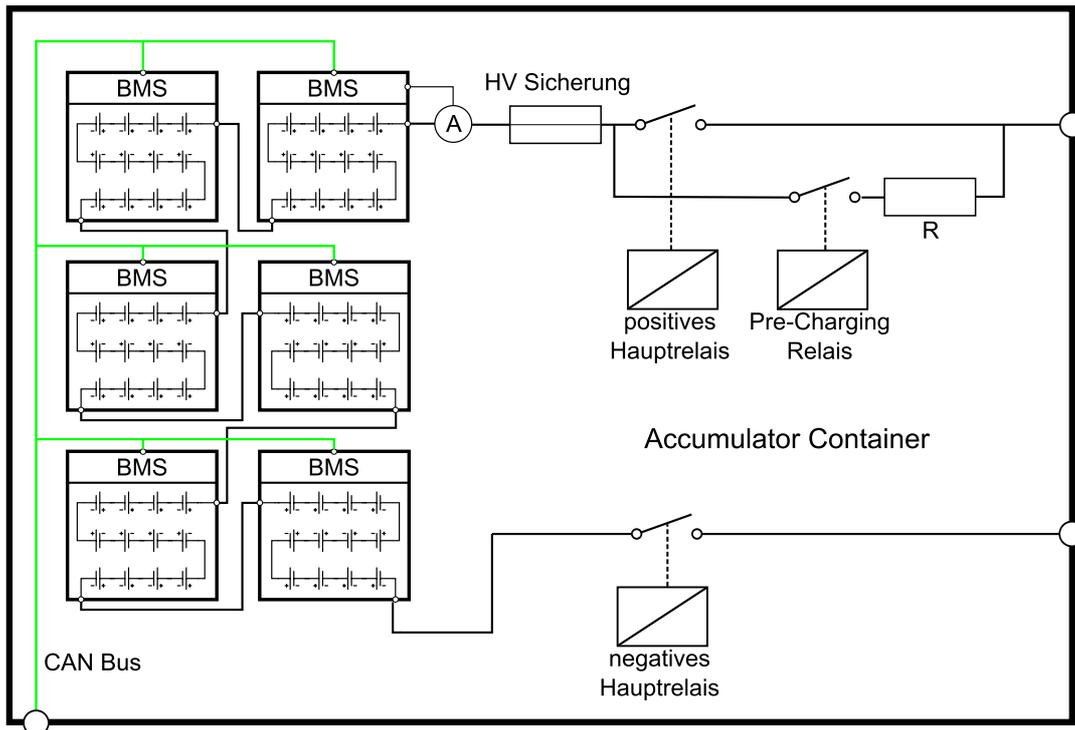


Abbildung 16 HV Container

Die HV-Sicherung ist hinter dem Fahrer in einem Schnellwechselhalter eingebaut. Dadurch ist sie von außen schnell zugänglich und kann im Notfall abgezogen werden, um das Auto in einen sicheren Zustand zu bringen. Die Verbindung vom Batteriecontainment zum Rest des Fahrzeugs wird mechanisch getrennt. Ein zusätzliches Voltmeter, das die Spannung am Ausgang des Batteriecontainments misst, gibt Aufschluss über den Betriebszustand des Fahrzeugs.

4.1.2. Batterie-Pack

Die sechs Batterie-Packs sind identisch aufgebaut und können leicht getauscht werden beziehungsweise ist es möglich, ein defektes Pack problemlos durch ein Ersatzpack zu ersetzen. Das Gehäuse der Packs besteht aus einem Verbund von Kohlefaser verstärkten Kunststoff (CFK) und Glasfaser verstärkten Kunststoff (GFK). Die Außenlagen bestehen aus CFK, um dem Pack die nötige Festigkeit zu geben, die Innenlagen aus GFK, das im Gegensatz zu CFK elektrisch nicht leitend ist. Bereits mit einer 0,3 mm dicken Schicht kann eine Isolation bis 1000 V erreicht werden. Für die

Serienschaltung der zwölf Batterien im Pack werden die Fahnen der Zellen (Anschlusslaschen) durch die BMS Master-Platine gesteckt und jeweils gegengleich überlappt. Durch das Verschrauben zweier Aluminiumbügel wird das Packet bestehend aus der Platine und den beiden Fahnen zusammengepresst - somit entsteht eine großflächige und gut leitende Verbindung zwischen den Zellen und auf die Platine. Über die Fahnen und den Übergangswiderstand zwischen den Zellen fließt der gesamte Strom wodurch ein Temperatur-Hotspot zu erwarten ist. Die Aluminium-Bügel dienen hier zusätzlich als Kühlkörper.



Abbildung 17 Zellverbindung

An die BMS Master-Platine können bis zu zwölf Temperatursensoren angeschlossen werden. In den aufgebauten Packs sind sechs Temperatursensoren des Typs NTC (Negative Temperature Coefficient) verbaut, die jeweils zwischen den Zellen abwechselnd am oberen Ende und am unteren Ende platziert sind. Der siebte Sensor wurde mit der Zellverbindung mitverschraubt, um die Temperatur des Aluminiumbügels zu messen und Erkenntnisse über die Verluste in den Zellverbindungen zu gewinnen.

Die BMS Master-Platine verbindet die Zellen untereinander und stellt das Interface zu den Temperatursensoren, dem Balancing und der Kommunikation dar. Die Balancing-Platine wird mittels Distanzhalter auf die Master-Platine geschraubt und verdrahtet. Die Controller-Platine wird über Stiftleisten mit der Master-Platine verbunden und ebenfalls verschraubt.

4.2. Batterieelektronik

In diesem Kapitel wird die entwickelte Elektronik und Software für die Überwachung der Zellen, die Funktionsweise der Hardware und der Ablauf der Software erläutert. Die Hardware lässt sich in die folgenden drei Teile unterteilen:

- BMS Master
- BMS Balancing
- BMS Controller

4.2.1. BMS Master

Wie in Kapitel 4.1.2 „Batterie-Pack“ beschrieben werden über die Master-Platine die Zellen in Serie geschaltet und gleichzeitig zur Messung der Zellspannungen und der Temperaturen verwendet. Auch die MOSFETs für das Balancing werden darüber angesteuert. All diese Funktionen lassen sich durch den IC AD7280 von Analog Devices relativ einfach realisieren. Ein AD7280 hat die I/Os für sechs Zellen und zusätzlich ein Kommunikationsinterface um mehrere Chips hintereinander zu schalten. Dabei wird der IC jeweils mit der Gesamtspannung der sechs Zellen versorgt. Intern werden die benötigten Referenzspannungen generiert. So wird zum Beispiel die Versorgungsspannung von 5 V für die Temperaturmessung jeweils bezogen auf den Minuspol der untersten Zelle erzeugt.

Die Spannungsmessung erfolgt über einen Multiplexer, der die Anschlüsse der zu messenden Zellspannung auf den differentiellen Analog-digital-converter (ADC) schaltet.

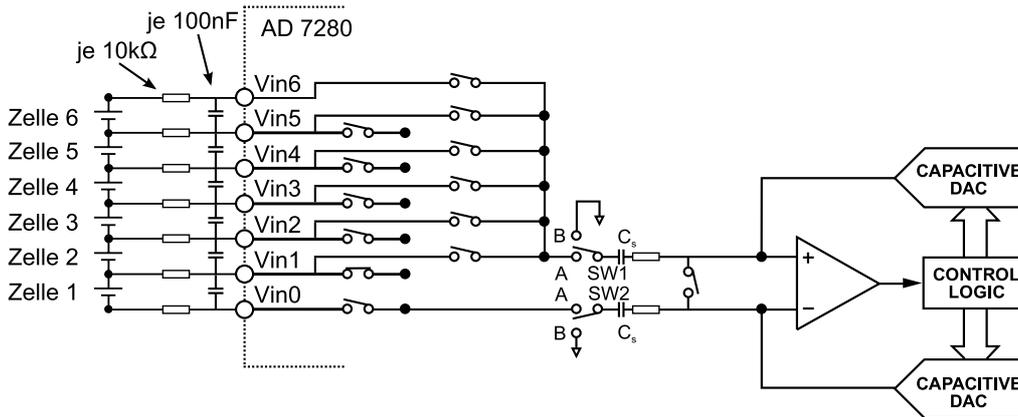


Abbildung 18 Messung der Zellspannungen (Analog Devices)

Nach der Auswahl der Zelle wird SW1 und SW2 in Position A gebracht, SW3 ist geschlossen, siehe Abbildung 18. Die Kondensatoren CS werden geladen. Sobald die Konvertierung startet, schalten SW1 und SW2 in Position B, SW3 öffnet. Die Digital-Analog-Converter (DAC) versuchen, den Komparator zum Umschalten zu bringen. Der Controllogic-Block wertet das Ergebnis aus und schreibt den zwölf Bit Wert in das ADC Register der jeweiligen Spannung. Die zwölf Bits beschreiben den Bereich zwischen 1 V und 4 V. Die Auflösung der Spannung beträgt $976 \mu V$. Die Eingangsbeschaltung für die Temperaturmessung besteht aus einem RC-Tiefpass. Der Widerstand ist auf der Platine möglichst nahe an den Zellanschlüssen positioniert, um im Fehlerfall - zum Beispiel bei einem Kurzschluss auf der Platine - den Kurzschlussstrom zu begrenzen.

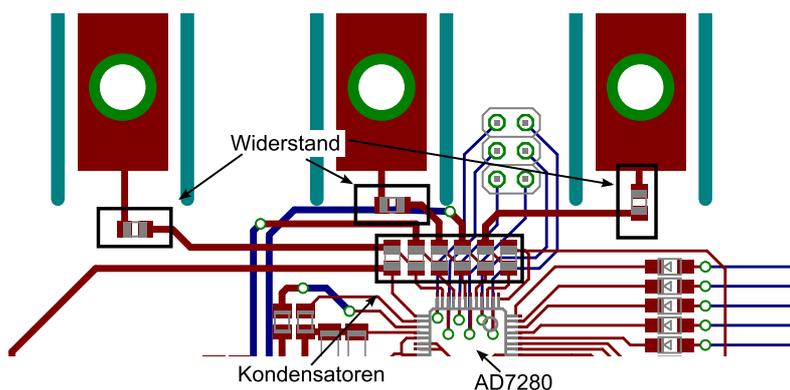


Abbildung 19 Layout: Messung Zellspannung

Die Temperaturmessung erfolgt über die sechs zusätzlichen ADCs, die bezogen auf die Chipmasse von 0 V bis 5 V mit einer Auflösung von 1,22 mV messen. Werden die analogen Eingänge im Kontrollregister als Widerstands-temperaturfühler definiert, so kann für die Spannungsteiler der Temperaturmessung ein gemeinsamer Widerstand R_{term} verwendet werden. Je nach Kanal wird der Widerstand über ein internes Netzwerk hinzugeschaltet. Die Abbildung 20 verdeutlicht die Funktionsweise.

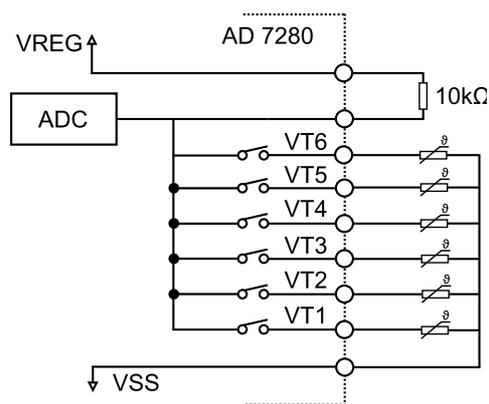


Abbildung 20 Funktionsweise Temperaturmessung (Analog Devices)

Bei einer konstanten Versorgungsspannung von 5 V für den Spannungsteiler kann der veränderliche Widerstand des Temperaturfühlers des Typs NTC mit einem Nennwiderstand von 10 kΩ bei 25 °C bestimmt werden.

Die Temperaturkonstante des Sensors beträgt $B = 4080$.

$$U_T = \frac{5V}{4096} \cdot ADC_{wert} \quad (36)$$

$$R_T = \frac{R_{term}}{1 - U_T} \quad (37)$$

Die Temperatur T_{Kelvin} in Kelvin errechnet sich zu:

$$T_{\text{Kelvin}} = \frac{B \cdot T_N}{B + \ln\left(\frac{R_T}{R_N}\right) \cdot T_N} \quad (38)$$

und

$$T = T_{\text{Kelvin}} - 273,15 \quad (39)$$

für die Temperatur T in °C

Die Kommunikation zwischen dem AD7280 und dem Mikrocontroller basiert auf einem SPI Protokoll, wobei der Mikrocontroller die Rolle des Masters übernimmt. Neben den Datenleitungen, dem Taktsignal und dem Chip-Select stehen drei zusätzliche I/Os zur Verfügung. Der Power Down Pin versetzt die ICs in den Energiesparmodus, dabei werden alle Funktionen abgeschaltet und der Stromverbrauch sinkt auf einen Maximalwert von $4 \mu A$. Der Conversion-Start (CNVST) Pin wird vom Controller gesetzt, um die konfigurierten Messungen der einzelnen Chips zu starten, die ADCs tasten die Signale ab und speichern diese in Register. Über die serielle Schnittstelle können diese Werte nun nacheinander ausgelesen werden. Der Alert Pin ist ein Alarmsignal, das vom AD7280 gesetzt wird, falls eine Zellspannung oder eine Temperatur eine konfigurierbare Schwelle überschreitet. In der Anwendung für den MaxWheel wurden die Grenzwerte für die Spannung auf 2,5 V und 4,2 V gesetzt. Für die Temperatur wurde der Maximalwert auf 65 °C begrenzt.

Das Daisy Chain Interface ermöglicht das Hintereinanderschalten mehrerer ICs, die von einem Controller ausgewertet werden. Durch den Master Pin wird das Daisy Chain aktiviert. Der IC, der am höheren Potential im Batteriepack angeschlossen ist, aktiviert für die sieben Kommunikationsleitungen eine Stromquelle. In Abbildung 22 ist die Funktionsweise für die unterschiedlichen Datenrichtungen dargestellt.

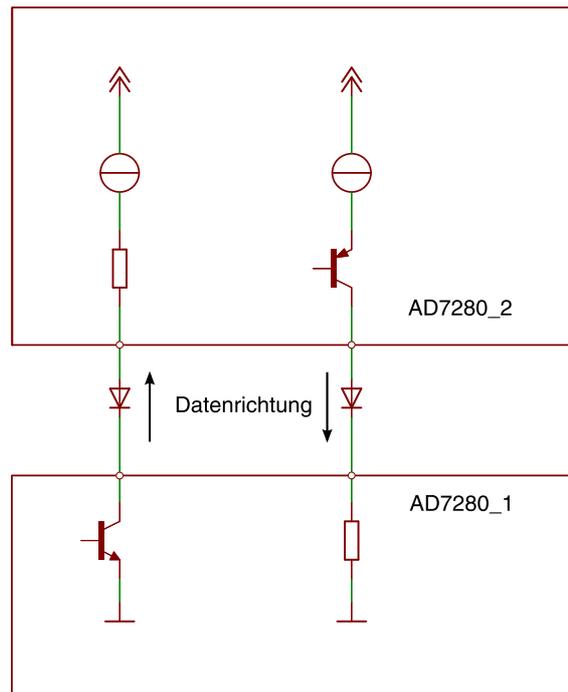


Abbildung 22 Daisy Chain Schnittstelle (Analog Devices)

Die AD7280 werden direkt aus dem Batteriepack versorgt und sind jeweils über sechs Zellen angeschlossen. Zum Schutz vor Kurzschluss der Batterien sind am Eingang der Platine selbst rückstellende Sicherungen vorgesehen. Zur Unterdrückung von hochfrequenten Störungen sind in den Zuleitungen Ferrite verbaut. Tritt ein Fehler in einem Kondensator auf, so wird er mit großer Wahrscheinlichkeit niederohmig. Das würde bedeuten, dass die Batterien kurzgeschlossen werden und aufgrund der Sicherungen das BMS ausfallen würde. Deshalb wurden alle Stützkondensatoren als Serienschaltung von zwei Kondensatoren ausgeführt.

4.2.2. BMS Balancing

Das Balancing Board wird oberhalb der BMS Master-Platine montiert. Die Balancing Ausgänge des AD7280 sind über Stecker und Flachbandkabel mit der Balancing-Platine verbunden und werden über Befehle der Software aktiviert. Unterscheiden sich die Zellspannungen während dem Ladevorgang, so wird parallel zu den Zellen, die bereits eine höhere Spannung erreicht haben, ein Widerstand geschaltet. Unter der Annahme, dass die Zellen im Verlauf einer Ladung und Entladung nicht mehr als drei Prozent auseinander driften, werden bei einer Nennkapazität von 45 Ah maximal 1,35 Ah über die Widerstände abgeführt. Bei der Dimensionierung dieser Platine wurde angenommen, dass der Balancing Vorgang zwischen einer halben Stunde und 45 Minuten dauern soll. Daraus ergibt sich ein Balancing Strom von 2 A.

$$t_{\text{Balancing}} = \frac{3\% \cdot 45\text{Ah}}{2\text{A}} = 0,675\text{h} \sim 40\text{min} \quad (40)$$

Bei Maximalspannung der Zellen ergibt sich die maximal abzuführende Leistung zu:

$$P_{\text{Balancing}} = 4,2\text{V} \cdot 2\text{A} = 8,4\text{W} \quad (41)$$

und demzufolge ein Widerstand $R_{\text{Balancing}}$ von:

$$R_{\text{Balancing}} = \frac{4,2\text{V}}{2\text{A}} = 2,1\Omega \quad (42)$$

Aus platztechnischen Gründen wurden neun 1 W Widerstände zu je 18Ω parallel geschaltet.

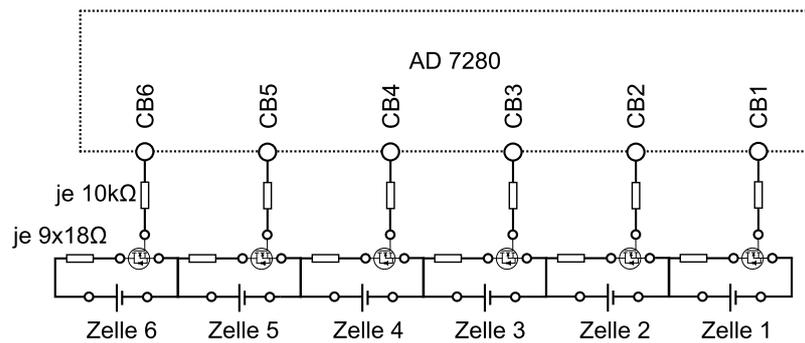


Abbildung 23 Funktionsweise Balancing

Zum Schalten wurden MOSFETs des Typs FDS2672 der Firma FAIRCHILD SEMICONDUCTOR eingesetzt.

4.2.3. BMS Kontroller

Das zentrale Bauteil der BMS Kontroller-Platine ist der Mikrocontroller AT90CAN von Atmel, er wird mit 16 MHz betrieben. Die Spannungsversorgung wird mit einem Spannungsregler aus der Packspannung generiert. Die Platine selbst wird mittels Stiftleisten auf die Master-Platine aufgesteckt. Dadurch werden die Verbindungen für die Kommunikation hergestellt. Die Kommunikation mit der Master-Platine ist über die im Kontroller integrierte SPI Schnittstelle ausgeführt. Da die Schnittstelle in Hardware im Mikrocontroller integriert ist, sind wenig CPU Ressourcen notwendig, die Steuerung und das Timing der Schnittstelle werden durch die Peripherie übernommen. Für die Kommunikation mit dem Rest des Fahrzeugs wird die CAN-Bus Peripherie des Kontrollers verwendet. Die Schnittstelle am Kontroller ist in Logik Pegel zwischen 0 V und 5 V ausgeführt: Mittels eines Transceivers werden die für den CAN-BUS spezifizierten Signalformen erreicht. An dieser Stelle, noch vor dem Transceiver, wird die Potentialtrennung mittels Optokoppler aufgebaut. Hierbei wurden zwei Varianten vorgesehen. Im ISO1050 der Firma Texas Instruments ist sowohl ein Optokoppler als auch der Transceiver integriert. Aufgrund von Lieferschwierigkeiten konnte diese Variante nicht eingesetzt werden. Die zweite Variante setzt sich aus einem ADuM1201 von Analog Devices für die galvanische Trennung und dem CAN-Bus Transceiver MCP2551 der Firma Microchip zusammen. Beide Varianten sind für eine Isolationsspannung von 1000 V ausgelegt.

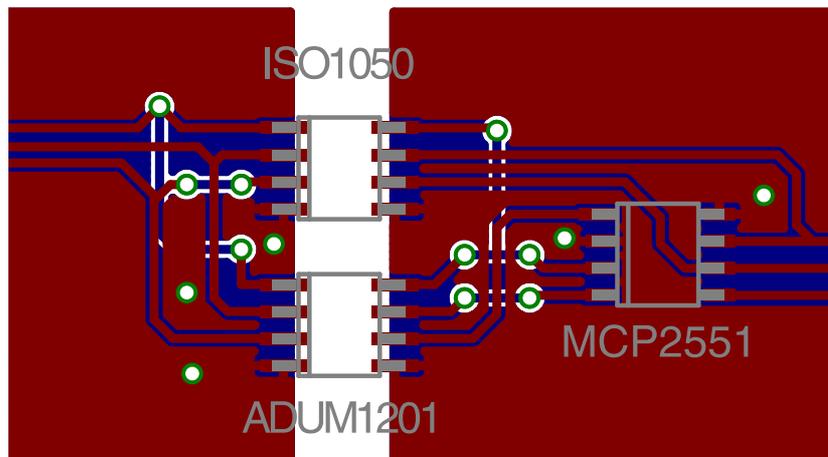


Abbildung 24 Galvanische Trennung CAN-Bus

Die sekundärseitige Versorgung des CAN-Bus Transceivers besteht aus einem isolierten DC/DC Wandler des Typs RSZ-0505 der Firma RECOM. Es besteht auch die Möglichkeit extern mit der Bordspannung des Fahrzeugs diesen Teil der Platine zu speisen.

Für die Identifizierung der Packs sind Lötbrücken vorgesehen, durch diese besitzt jedes Pack eine Basis-ID zur Kommunikation. Dadurch ergibt sich der Vorteil, dass eine einheitliche Software für alle Packs zum Einsatz kommen kann.

Auf der BMS Controller-Platine ist ein analoger Eingang vorgesehen, an den ein Stromsensor der Firma LEM Components angeschlossen werden kann. Da alle Packs in Serie geschaltet sind, fließt durch alle Batterien derselbe Strom. Der Stromsensor wird somit nur in einem Pack verbaut.

4.2.4. Software

Die Software des BMS wird in drei Betriebsmodi unterteilt. Der Energiesparmodus ist immer dann aktiv, wenn weder geladen noch entladen wird. Der Controller schaltet die AD7280 auf der Master-Platine aus und wartet, bis dieser über den CAN-Bus aktiviert wird. Im Entlademodus werden die Spannungen und Temperaturen eingelesen und

über CAN-Bus ans Fahrzeug verschickt. Die Strommessung ist an einem Pack aktiv. Der gemessene Strom wird von diesem Pack über den CAN-Bus ausgesendet. Alle anderen Packs können darauf zugreifen, zusammen mit den Packspannungen wird der SOC der Batterien berechnet. Im Lademodus sind die Batterien ausgebaut. Das BMS erhält vom Ladegerät den Befehl, die Messwerte der Spannungen und Temperaturen auf den CAN-Bus zu legen. Das Ladegerät entscheidet, wann welcher Balancing-Widerstand aktiviert werden soll.

Die Kommunikation zwischen dem AD7280 und dem AT90CAN läuft über die SPI Schnittstelle des Mikrocontrollers. Die Schnittstelle des Controllers ist als Master definiert und auf eine Taktrate von 1MHz konfiguriert. Bei der fallenden Taktflanke muss das gesendete Datenbit gültig anliegen, bei der steigenden Flanke wird das Antwortbit zurückgelesen. Jeder Befehl ist 32 Bit lang und es gibt drei unterschiedlich aufgebaute Befehle.

Mit dem Schreib-Befehl können die Register der ICs beschrieben werden. Die Device Adresse wählt den IC in der Daisy Chain aus, hierbei hat der IC an der SPI Schnittstelle die Adresse 0, der zweite IC auf der BMS Master-Platine die Adresse 1. Da die ICs größtenteils gleich konfiguriert werden kann mit dem Bit D12 derselbe Registerinhalt auf beide ICs geschrieben werden. Mit der Registeradresse wird das Register ausgewählt, in das das Datenbyte geschrieben werden soll. Mit dem 8-bit Cyclic redundancy check (CRC) werden Übertragungsfehler erkannt. Die Antwort auf den Schreib-Befehl besitzt die Form des Register-lesen-Befehls. Bei erfolgreichem Schreibvorgang wird das Bit D10 auf eins gesetzt (Analog Devices).

Bit	Schreib-Befehl	Register lesen	Messwerte lesen	
D31	Device Address	Device Address	Device Address	
D30				
D29				
D28				
D27				
D26	Register Address	Register Address	Channel Address	
D25				
D24				
D23				
D22				
D21	Register Data	Register Data	Conversion Data	
D20				
D19				
D18				
D17				
D16				
D15				
D14				
D13				
D12	Address All Parts	Zero		
D11	Reserved			
D10	8-bit CRC	Write Acknowledge	Write Acknowledge	
D9		8-bit CRC	8-bit CRC	8-bit CRC
D8				
D7				
D6				
D5				
D4				
D3				
D2				
D1	Reserved	Reserved	Reserved	
D0				

Tabelle 30 Protokoll des AD7280 (Analog Devices)

Um die Daten aus einem Register auszulesen, muss in das Read Register die Adresse des gewünschten Registers geschrieben werden. Mit den nächsten 32 Taktzyklen wird der Registerinhalt in der Form Register lesen aus der Tabelle 31 eingelesen (Analog Devices).

Für die Messung der Zellspannungen und Temperaturen muss als erstes in das Readregister die Adresse des ersten Messwertes geschrieben werden. Durch einen Puls auf der Conversion Start Leitung werden die Messwerte digitalisiert. Nach einer Wartezeit von $55 \mu s$ werden vom Kontroller pro Messergebnis (zwölf Spannungen und zwölf Temperaturen) 32 Taktzyklen ausgegeben. Für jeden Messwert kommt in der Form Messwerte-lesen aus Tabelle 31 das Ergebnis zurück (Analog Devices).

Die Register

Die Register der AD7280 sind von 0h bis 1Dh adressiert. Die ersten 13 Register sind für die Messergebnisse vorgesehen und können nur ausgelesen werden. Mit dem CONTROL Register wird der IC konfiguriert. Die Anzahl der Zellen und der Temperatursensoren muss hier angegeben werden und ob der ADC das Messergebnis mitteln soll bevor er es in das jeweilige Register schreibt. Für die Temperaturmessung wird hier der R_{term} aktiviert. Die Dasy Chain wird aktiviert und bei der Initialisierung den ICs ihre Adresse zugeteilt. Mit den folgenden fünf Registern werden die Schwellen für die Grenzwerte der Zellspannung und Temperatur angegeben. Aus dem ALERT Register kann ausgelesen werden welcher Grenzwert überschritten wurde. Falls eine Überschreitung auftritt, wechselt auch das ALERT Signal von 0 V auf 5 V. Im CELL BALANCE Register wird mit einer eins angegeben, welcher Balancing-Widerstand aktiviert werden soll. Die CB TIMER eins bis sechs können beim Ladevorgang verwendet werden, um anzugeben wie lange der Transistor eingeschaltet bleiben soll. Diese Zeit kann in 75 Sekunden Schritte bis zu einer Maximalzeit von 39 Minuten angegeben werden. Mit dem POWER DOWN TIMER Register kann eine Ausschaltverzögerung realisiert werden. In das READ Register wird die Registeradresse geschrieben die beim nächsten Lesezyklus ausgelesen werden soll. Mit dem CONTROL 3 Register kann der Conversion-Start Pin deaktiviert werden (Analog Devices).

Register Name	Register Adresse	Register Daten	lesen / schreiben
CELL VOLTAGE 1	0h	D11 bis D0	lesen
CELL VOLTAGE 2	1h	D11 bis D0	lesen
CELL VOLTAGE 3	2h	D11 bis D0	lesen
CELL VOLTAGE 4	3h	D11 bis D0	lesen
CELL VOLTAGE 5	4h	D11 bis D0	lesen
CELL VOLTAGE 6	5h	D11 bis D0	lesen
CELL TEMP 1	6h	D11 bis D0	lesen
CELL TEMP 2	7h	D11 bis D0	lesen
CELL TEMP 3	8h	D11 bis D0	lesen
CELL TEMP 4	9h	D11 bis D0	lesen
CELL TEMP 5	Ah	D11 bis D0	lesen
CELL TEMP 6	Bh	D11 bis D0	lesen
SELF TEST	Ch	D11 bis D0	lesen
CONTROL	Dh	D15 bis D8	lesen / schreiben
	Eh	D7 bis D0	lesen / schreiben
OVER VOLTAGE	Fh	D7 bis D0	lesen / schreiben
UNDER VOLTAGE	10h	D7 bis D0	lesen / schreiben
OVER TEMP	11h	D7 bis D0	lesen / schreiben
UNDER TEMP	12h	D7 bis D0	lesen / schreiben
ALERT	13h	D7 bis D0	lesen
CELL BALANCE	14h	D7 bis D0	lesen / schreiben
CB TIMER 1	15h	D7 bis D0	lesen / schreiben
CB TIMER 2	16h	D7 bis D0	lesen / schreiben
CB TIMER 3	17h	D7 bis D0	lesen / schreiben
CB TIMER 4	18h	D7 bis D0	lesen / schreiben
CB TIMER 5	19h	D7 bis D0	lesen / schreiben
CB TIMER 6	1Ah	D7 bis D0	lesen / schreiben
PD TIMER	1Bh	D7 bis D0	lesen / schreiben
READ	1Ch	D7 bis D0	lesen / schreiben
CONTROL 3	1Dh	D7 bis D0	lesen / schreiben

Tabelle 31 Register des AD7280 (Analog Devices)

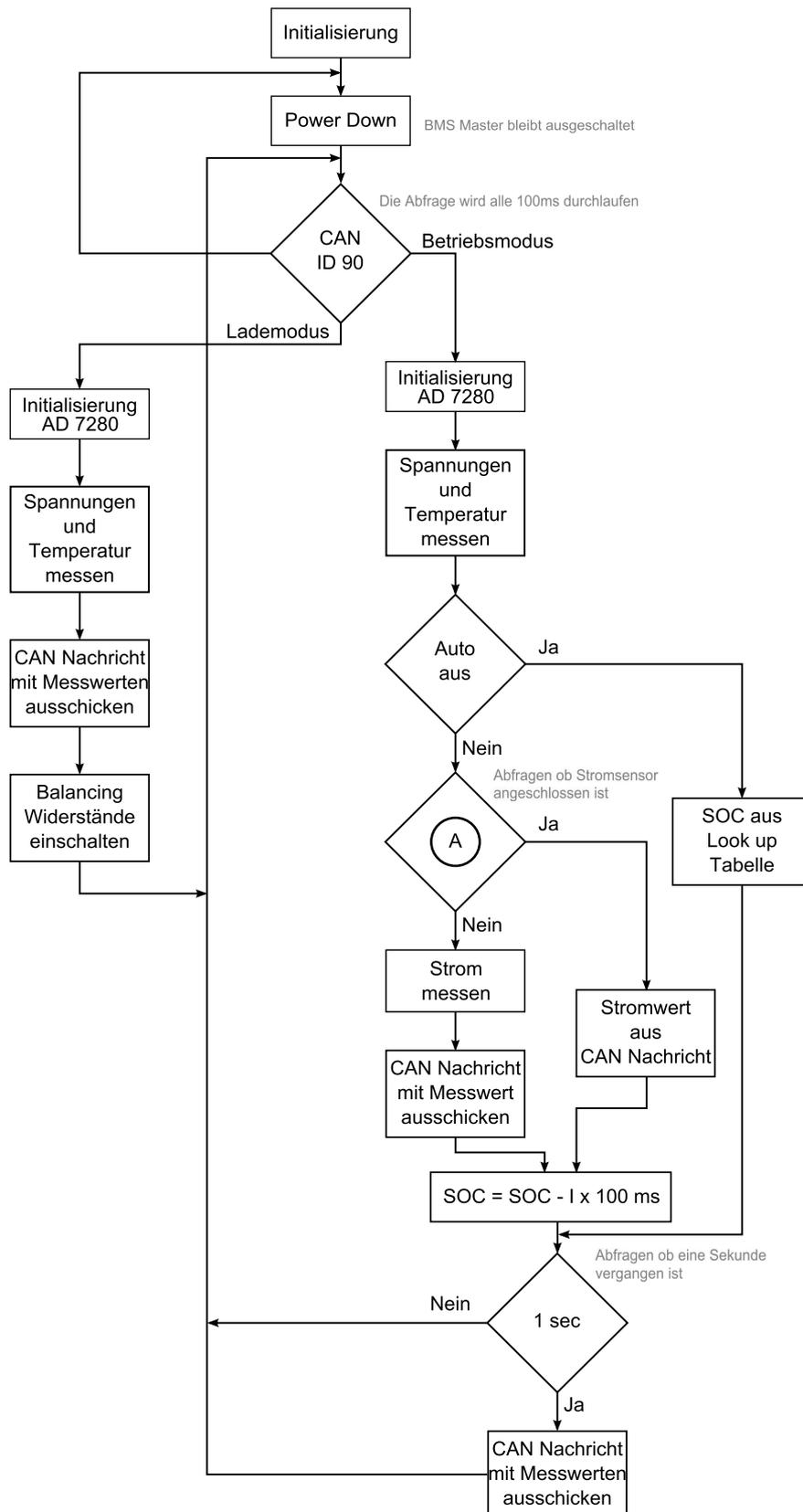


Abbildung 25 Flussdiagramm BMS Software

Ab dem Zeitpunkt, ab dem die Kontroller-Platine mit der Master-Platine verbunden wird, startet der Mikrocontroller und führt als erstes die Initialisierungsroutine aus. Dabei wird die Datenrichtung der I/O Ports festgelegt und die Schnittstellen konfiguriert. Die Jumper Position wird eingelesen und die Packnummer bestimmt. Die Packnummer dient als Basisadresse für die CAN-Bus Messages, die das Pack aussendet. Das erste Pack beginnt mit der Adresse 100. Die Master-Platine bleibt ausgeschaltet, um Strom zu sparen. Jedes Pack wartet im Energiesparmodus, bis auf dem CAN-Bus in der Message mit der ID 90 der Befehl, in den Entlade- oder in den Lademodus zu wechseln, kommt.

Der Entlademodus kann nur vom Zentralrechner aktiviert werden; der Befehl wird 20 Mal in der Sekunde geschickt. Aufgrund von Kommunikationsschwierigkeiten mit den AD7280 wird die Initialisierung bei jedem Schleifendurchlauf neu überschrieben. Im nächsten Schritt werden die Spannungs- und Temperaturmesswerte eingelesen. Falls sich das Auto im fahrbereiten Zustand befindet und die Hochvoltrelais geschlossen sind, wird der SOC aus dem Integral des Stromes berechnet. Solange kein Strom fließt, kann mit der Ruhespannung der SOC aus einer Tabelle entnommen werden. Einmal in der Sekunde werden die Spannungswerte, die Temperaturwerte und der SOC über den CAN-Bus ausgeschickt.

Die Batterien werden nur geladen, wenn sie aus dem Auto ausgebaut sind. Der CAN-Bus wird mit dem Ladegerät und einem Computer verbunden. Das Programm, das am Computer läuft, gibt dem Ladegerät die Sollwerte für Spannung und Strom vor. Im Weiteren aktiviert das Programm den Lademodus der Packs. Nach der Initialisierung der AD7280 werden alle Spannungen und Temperaturen gemessen. Bei jedem Durchlauf der Hauptschleife werden die Messwerte über den CAN-Bus ausgeschickt. Die Balancing Register werden nach der Vorgabe des Ladeprogramms gesetzt.

Im Hintergrund läuft die CAN-Bus Interrupt Routine, in der die Nachrichten empfangen werden und der Inhalt in die jeweiligen Variablen geschrieben wird. Über den Zeitinterrupt wird die 100 ms Basis für die Hauptschleife generiert.

4.3. Elektronik Test

Der erste Prototyp wurde für die Entwicklung der Software und für die Validierung der Beschaltung des AD7280 aufgebaut. Im Laboraufbau wurden aus Sicherheitsgründen anstelle der Batterien Labornetzgeräte verwendet und zwölf unabhängige Spannungsquellen in Serie geschaltet. Dadurch konnten die einzelnen Zellspannungen frei eingestellt und Minimal- und Maximalwerte simuliert werden, ohne an die Grenzen der Zellen selbst zu gehen. Zur Nachbildung der Temperatursensoren kamen Potentiometer zum Einsatz. Mit diesem Laboraufbau wurde als erstes die Kommunikation zwischen dem Mikrocontroller und den AD7280 implementiert. Dabei traten zahlreiche Probleme auf, da die Antwort auf die Befehle, Register zu beschreiben, häufig fehlgeschlagen ist und keine weitere Kommunikation möglich war. Empfängt der AD7280 einen Befehl über SPI, so wird die Nachricht in ein Schieberegister geschrieben und anschließend weiter verarbeitet. Aus ungeklärten Gründen wird teilweise ein Bit zu viel empfangen und nach Beendigung der Übertragung wird das Empfangsregister nicht gelöscht. Aus diesem Grund wurde in die Senderoutine eine Schleife eingebaut, die bei fehlgeschlagener Übertragung ein einzelnes Bit an den AD7280 schickt und anschließend erneut versucht, den Befehl zu senden. Dies wird bis zu 32 mal wiederholt. Schlägt auch dieser Versuch fehl, so muss der AD7280 über die Power Down Leitung neu gestartet werden. Die gesamte Konfiguration muss neu auf den IC geschrieben werden. Die weitere Funktionalität der Software konnte ohne neue Probleme implementiert und mittels des Laboraufbaus problemlos verifiziert werden.

Für das Fahrzeug wurden zwei Batteriesätze zu je sechs Packs aufgebaut. Für die Überprüfung des Zusammenschlusses der 6 Packs wurde der CAN-Bus der einzelnen Packs mit der zentralen Steuereinheit verkabelt. Dank der komfortablen Debugging Funktionalitäten der Micro-Auto-Box konnte am Computer eine grafische Oberfläche erstellt werden, um alle Messwerte und Überwachungssignale darzustellen und zu überprüfen.

4.4. Batterieprüfstand

Der Batterieprüfstand dient in erster Linie dazu, die Eigenschaften der Gesamtbatterie zu bestimmen. Zugleich muss die Batterieelektronik zuverlässig und dauerhaft funktionieren, um die notwendigen Messdaten zu liefern und die einzelnen Zellen zu schützen. Durch die enge Zusammenarbeit mit der Firma AVL List GmbH konnten wir einen Batterietester in der Firma nutzen. Der Batterieprüfstand besteht aus einer Klimakammer, die die Batterien auf eine vorgegebene Temperatur vorkonditioniert. Über die leistungsstarke Elektronik können die Batterien mit bis zu 400 A entladen und geladen werden. Die Spannungsgrenze liegt bei 600 V. Nach zahlreichen Funktionstests der Kommunikation zwischen dem BMS und dem Prüfstand standen drei unterschiedliche Versuche am Programm: die Kapazitätsbestimmung, die Simulation eines Endurance Rennens und die Bestimmung des Innenwiderstandes. Alle Testläufe wurden mehrfach und bei unterschiedlichen Bedingungen durchgeführt. Mittels automatisierter Testläufe konnten Messungen über mehrere Stunden aufgezeichnet werden.

4.4.1. Kapazitätsbestimmung

Bei der Kapazitätsbestimmung werden die Batterien mit konstantem Strom geladen und entladen. Die Grenzen sind jeweils erreicht, wenn eine Zelle beim Laden 4,2 V beziehungsweise beim Entladen 2,5 V erreicht. Da insgesamt 72 Zellen in Serie geschaltet sind, erreicht immer eine Zelle als erstes den Entladegrenzwert, wobei in den anderen noch Energie enthalten ist. Daher können aus dem Gesamtpack nicht die vollen 45 Ah entnommen werden, die jede Zelle haben sollte. Die Bestimmung wurde mit 45 A und mit 135 A durchgeführt. In Abbildung 26 ist ein Ausschnitt über drei Zyklen dargestellt. Aus der Mittelung von zehn Zyklen über das Integral über dem Strom wurde die Kapazität zu 42,5 Ah bestimmt. Trägt man die Spannung über den SOC in einem Diagramm auf, so ist es möglich aus der Ruhespannung den aktuellen SOC abzulesen.

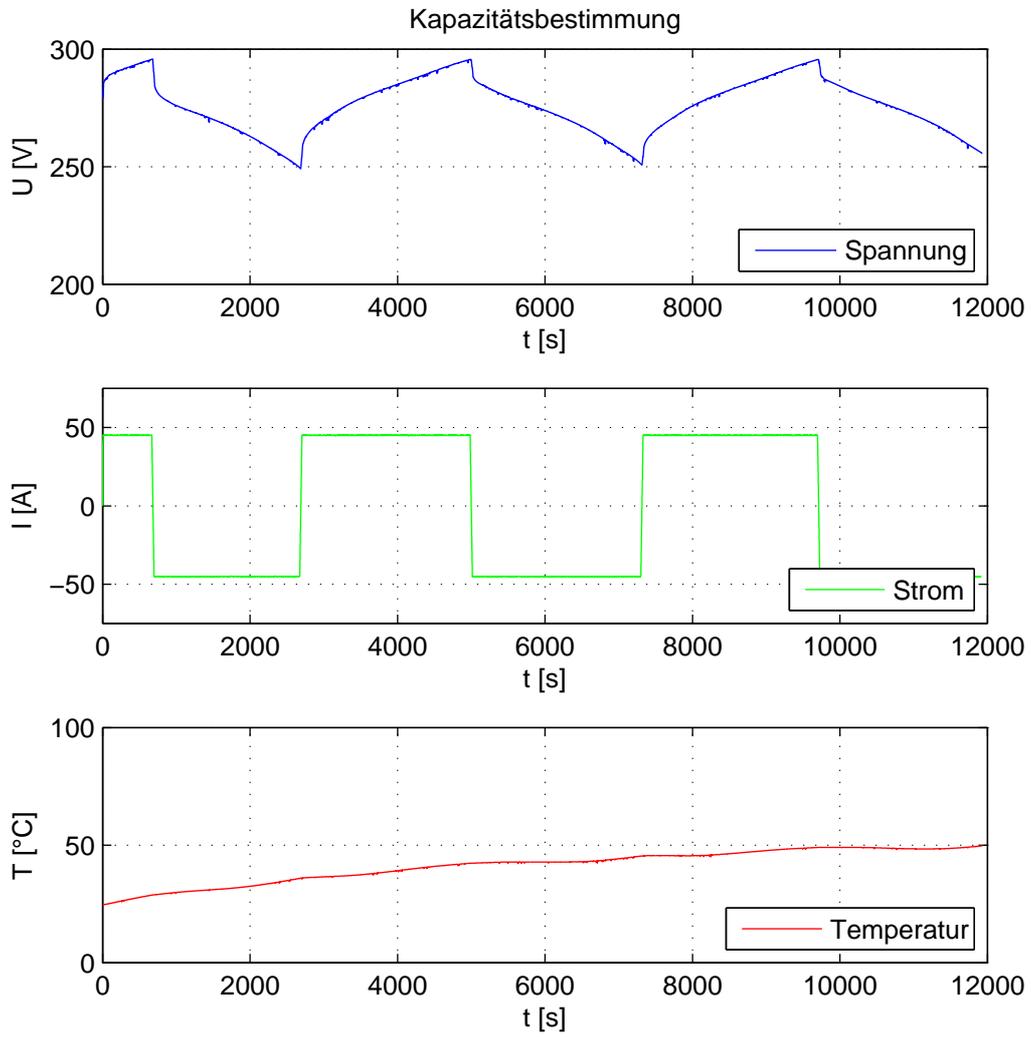


Abbildung 26 Kapazitätsbestimmung

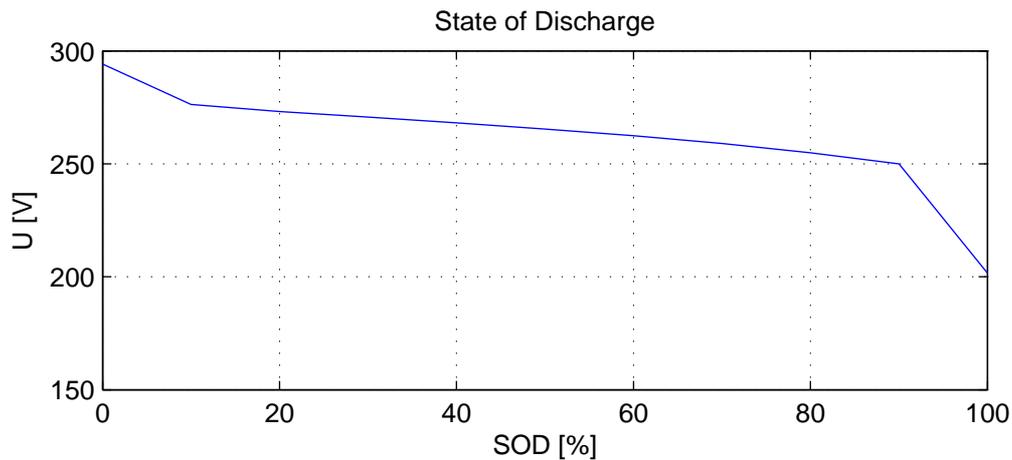


Abbildung 27 State of Discharge

4.4.2. Endurance Test

Im Kapitel 2.3 „Simulation Endurance“ wurde für die Berechnung der benötigten Energie, um ein Endurance Rennen zu fahren, aus dem Geschwindigkeitsprofil ein Leistungsprofil erstellt. Derselbe Leistungsverlauf kann durch Division mit der Nennspannung des Packs in ein Stromprofil umgerechnet werden, welches mit dem Batterietester abgefahren wurde. Ziel dieser Messung ist es, die zu erwartende Erwärmung im Laufe eines Rennens zu ermitteln. Um den schlechtesten Fall anzunehmen, wurden die Batterien vor dem Testlauf auf 35 °C erwärmt, um einen warmen Sommertag vorzusetzen. Die Endtemperatur nach dem 25 Minuten langen Testlauf erreichte 60 °C, was noch deutlich unter der Maximalgrenze liegt. In Abbildung 28 ist ein 10 Sekunden langer Ausschnitt aus den Strom- und Spannungswerten dargestellt.

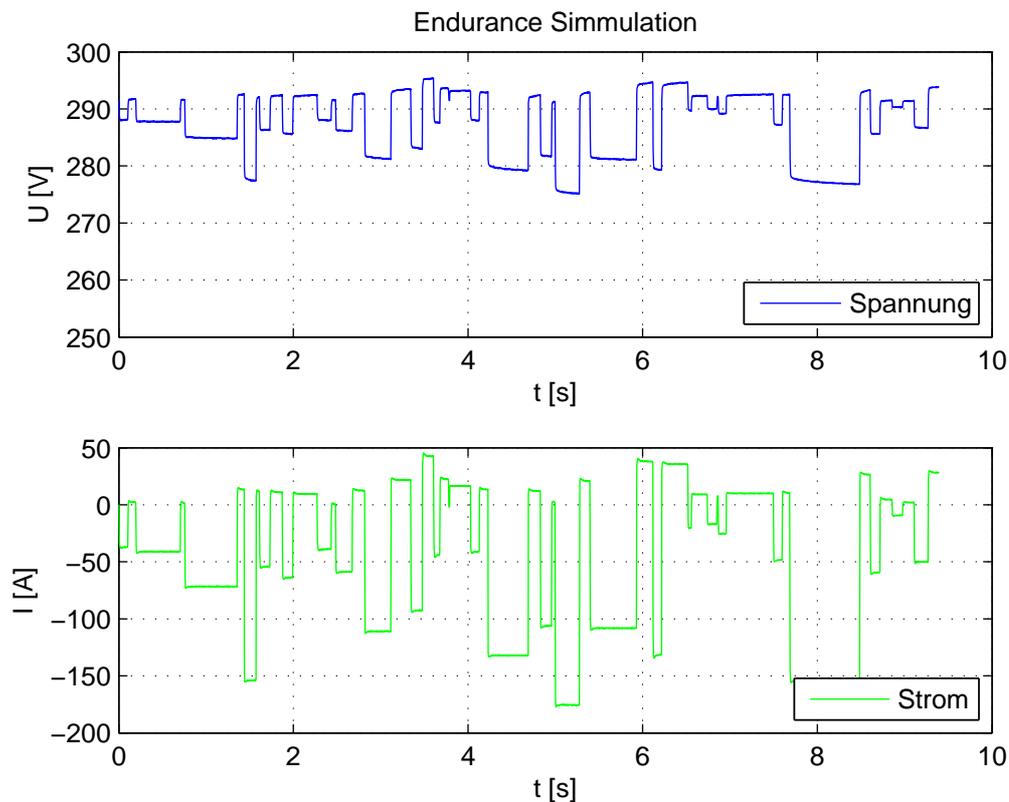


Abbildung 28 Endurance Simulation

4.4.3. Innenwiderstand

Nach Fertigstellung des Fahrzeugs wurden die Inbetriebnahme und die Entwicklung der Regler für den Motor und für das fahrdynamische Verhalten auf einem Hybridprüfstand durchgeführt. Dabei sind beide Hinterräder jeweils mechanisch mit einem Generator gekoppelt, der den Fahrwiderstand und - je nach Fahrbedingung - ein Moment und eine Drehzahl vorgibt, die die Motoren im Fahrzeug aufbringen müssen. Um nicht auf die Batterielaufzeit angewiesen zu sein, kam zusätzlich ein Batteriesimulator zum Einsatz. Die Bestimmung des Innenwiderstandes wurde durchgeführt, um ein einfaches Modell der Batterie zu erstellen. Nach diesem Modell bildet der Batteriesimulator die echte Batterie nach.

Der Innenwiderstand über den SOC ist die wichtigste Größe für die Modellierung einer Batterie. Weitere Einflussgrößen sind der Laststrom und die Temperatur. Aufgrund der begrenzten Testzeit auf dem Batterieprüfstand konnte eine Innenwiderstands-Bestimmung bei 25 °C und bei Lastspitzen von 135 A gemacht werden. Der Testlauf ist in folgende Schritte unterteilt. Als erstes wird die Batterie auf 25 °C konditioniert und auf 100 % SOC aufgeladen. Nach einer Ruhepause von fünf Minuten wird ein Entladestrom von 135 A für fünf Sekunden entnommen. Darauf folgt wieder eine Ruhezeit von 5 Minuten. Im Anschluss daran wird mit einem Strom von 45 A auf 90 % SOC entladen. Nach einer erneuten Ruhezeit wird wieder ein Impuls von 135 A entnommen. Dies wird in Schritten von 10 % des SOC wiederholt. Der Spannungs- und Stromverlauf des Prüfablaufs sind in Abbildung 29 dargestellt. Bei der Messung für 20 % SOC wurden während des Stromimpulses bei einigen Zellen bereits Spannungen unter 2,5 V gemessen. Aus diesem Grund musste der Testlauf abgebrochen werden, um eine Beschädigung der Zellen zu vermeiden.

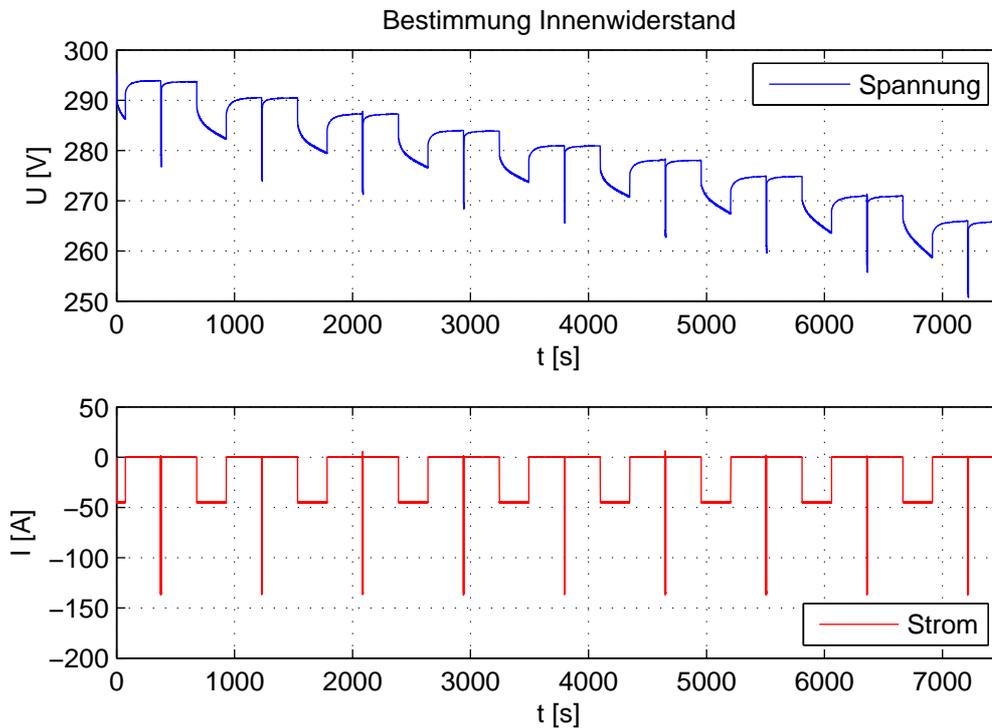


Abbildung 29 Bestimmung Innenwiderstand

Aus der Differenz der Spannung vor dem Strompuls und dem Mittelwert der Spannung während des Strompulses wird der Spannungsabfall am Innenwiderstand berechnet. Mit dem Ohm'schen-Gesetz und dem bekannten Strom von 135 A wird der jeweilige Innenwiderstand berechnet. In Tabelle 32 sind die Innenwiderstände für die verschiedenen SOC's eingetragen.

<i>SOC</i> [%]	<i>R_i</i> [Ω]
100	0.1188
90	0.1155
80	0.1116
70	0.1087
60	0.1075
50	0.1068
40	0.1064
30	0.1057
20	0.1053

Tabelle 32 Innenwiderstand

4.5. Betrieb

In diesem Kapitel wird beschrieben, welche Möglichkeiten das Batteriemanagement-System im Auto und beim Laden bietet und wie diese im MaxWheel eingesetzt werden.

Vor der Fahrt werden die Batteriepacks im Fahrzeug im Accumulator Container montiert und an den CAN-Bus angeschlossen. Beim Einschalten des Autos schickt der zentrale Rechner den Batterien den Befehl, in den Betriebsmodus zu wechseln. Die Batterien schicken ihre Werte aus. Der zentrale Rechner errechnet aus der Summe der Spannungen die Gesamtspannung. Drückt der Fahrer den Startknopf so schaltet - sofern alle anderen Überprüfungen okay sind - der zentrale Rechner das negative Batterierelais und das Pre-Charging Relais ein. Dadurch wird der Zwischenkreis mit einem Serienwiderstand für die Strombegrenzung geladen. Aus der berechneten Gesamtspannung und der gemessenen Spannung am Stromrichter wird bei Erreichen von 90 % der Batteriespannung das positive Relais geschlossen und das Pre-Charging Relais geöffnet.

Im Fahrbetrieb werden vom zentralen Rechner die Maximaltemperatur und die Maximalspannung der Zellen überwacht und gegebenenfalls direkt eine Abschaltung des HV-Systems ausgelöst. Dies ist notwendig, da die Überschreitung der Grenzwerte zum Entgasen und in weiterer Folge zu einem Brand führen könnte. Dies würde ein großes Risiko für den Fahrer darstellen. Wird eine Zelle hingegen unter 2,5 V entladen, besteht kein Risiko für den Fahrer und das Fahrzeug, die Zelle jedoch wird zerstört. Der Fahrer wird sehr wohl am Lenkrad gewarnt, eine Abschaltung ist bei einem Rennen aber nicht vorgesehen, da eine kaputte Zelle im Vergleich zu einem nicht beendeten Rennen in Kauf genommen werden kann.

Während der Fahrt wird der Fahrer über das Display im Lenkrad über die wichtigsten Daten informiert. Neben den Temperaturen des Kühlkreises für die Motoren und den Stromrichter werden die aktuelle Geschwindigkeit und der Mittelwert des SOC in Form eines Balkens grafisch dargestellt.

Für eine schnelle Diagnose und zur Überprüfung des Zustandes des Autos können im Stillstand über ein Menü am Touchscreen des Lenkrades für jedes Gerät Diagnosemeldungen und der aktuelle Zustand abgefragt werden. Im Hauptdiagnosefenster wird für die einzelnen Kommunikationsbusse angezeigt, ob diese einwandfrei arbeiten. Speziell für die Batterien ist ein Untermenü implementiert, in dem die sechs Packs grafisch in der Form einer Batterie dargestellt werden. Der Füllstand der jeweiligen Batterie entspricht den SOC des Packs. Bei Berührung des Batteriesymbols am Display, werden für das jeweilige Pack die Zellspannungen und die Temperaturen angezeigt. In Abbildung 30 sind die Menüpunkte für die Batteriediagnose dargestellt. Damit ist eine schnelle Überprüfung aller Werte, Fehler und Abweichungen leicht erkennbar.

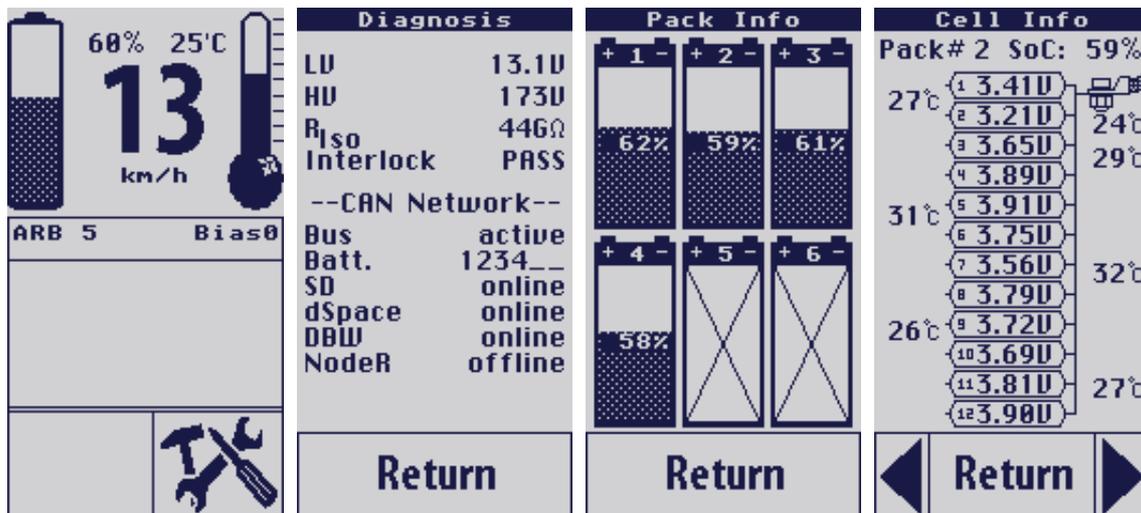


Abbildung 30 Menü Lenkraddisplay

Zum Laden werden die Batterien aus dem Fahrzeug ausgebaut und in einem eigens angefertigten Handwagen verstaut. In dieser Kiste ist auch das Ladegerät untergebracht. Intern werden die Packs untereinander verbunden und am Ladegerät angeschlossen. Auch der CAN-Bus wird mit den Packs und dem Ladegerät verbunden. Das Kabel an der Kiste wird am Stromnetz angeschlossen und versorgt das Ladegerät. Der CAN-Bus wird mit der Micro-Auto-Box von dSPACE verbunden und stellt die Verbindung zum PC her.

Als Ladegerät kommt das NLG 514-SC der Firma Brusa zum Einsatz. Dieses Ladegerät besitzt eine maximale Leistung von 3,3 kW, der Maximalstrom beträgt 25 A und die maximale Spannung 720 V. Die Sollspannung und der Sollstrom, die das Ladegerät liefern soll, können über den CAN-Bus vorgegeben werden.

Prinzipiell werden die Batterien beim Ladevorgang erst mit einem konstanten Strom und dann mit konstanter Spannung geladen. Da das Ladegerät maximal 25 A liefert, kann mit voller Leistung geladen werden bis die erste Zelle die Ladeschlussspannung erreicht. Nach dieser ersten Phase wird eine Pause gemacht, damit die Zellen auf die Ruhespannung kommen. Durch die selektive Aktivierung der Balancing-Widerstände erreichen alle Zellen dasselbe Potential. Da häufig nur wenige Zellen auf einem geringeren Potential bleiben, wurden mit einer zusätzlichen Spannungsquelle die jeweiligen Zellen nachgeladen. Aufgrund nicht genügender Zuverlässigkeitstests wurde der gesamte Ladevorgang stets überwacht. So wurde auch das Balancing nicht automatisiert, sondern manuell bedient. Anschließend wird die Maximalspannung der Batterie vom Ladegerät ausgegeben und der Strom auf 5 A begrenzt. Erreicht eine Zelle die Maximalspannung, wird eine Ruhepause eingelegt und anschließend wieder die Maximalspannung aufgeschaltet. Dieser Vorgang wird einige Male wiederholt.

5. Fahrzeug

5.1. Integration der Komponenten

Die für den elektrischen Antriebsstrang wesentlichen Komponenten: Batterie, Batteriemanagement, Motor, Stromrichter und zentrale Steuereinheit wurden in Kapitel 3 „Auswahl der Komponenten“ beschrieben.

Für das Verständnis der Zusammenhänge und Funktionsweisen des Gesamtfahrzeugs werden noch die folgenden Einheiten definiert.

Die **Drive-by-Wire** Einheit ist im Fahrzeug vor den Pedalen positioniert. Das Gerät erfasst den Fahrerwunsch und gibt ihn an die zentrale Steuerungseinheit weiter. Gemessen werden die Position des Beschleunigungspedals, der hydraulische Druck in den beiden Bremskreisen und der Lenkwinkel. Da es sich bei diesen Messungen um sicherheitsrelevante Werte handelt, die bei einer Fehlfunktion ein unkontrolliertes Verhalten des Autos verursachen können, werden diese Sensoren mehrfach ausgeführt und auf Plausibilität überprüft. Die Position des Beschleunigungspedals und der Winkel der Lenksäule werden einmal mit einem Potentiometer und ein zweites Mal mit einem Winkelsensor, der auf dem Prinzip eines Hallsensors funktioniert, gemessen. Der Bremsdruck wird mit je zwei Absolutdruck-Sensoren ermittelt. Die Sensoren werden auf Kurzschluss und Unterbrechung der Versorgung überprüft. Für ein gültiges Messergebnis müssen sich jeweils beide Sensorwerte in einem Toleranzband befinden. Die Übertragung zum zentralen Rechner erfolgt über zwei getrennte CAN-Busse, die getrennt im Fahrzeug verlegt sind. Die Messergebnisse und der Status der Sensoren werden mit 100 Hz in einer Nachricht übertragen. Zur Überprüfung der Kommunikation wird in jeder Nachricht ein CRC Byte und ein Zählerstand mitgeschickt. Der Zähler wird von der Drive-by-Wire Einheit mit jeder Nachricht inkrementiert. Der zentrale Rechner überprüft die fortlaufende Nummerierung der Nachrichten.

Das **Lenkrad** dient in erster Linie dem Fahrer, das Fahrzeug in eine Richtung zu lenken. Aus elektrotechnischer Sicht sind jedoch die Diagnosefunktionen von großer

Bedeutung. Wie in Kapitel 4.5 „Betrieb“ beschrieben, bietet das Lenkrad mit dem integrierten Display zahlreiche Diagnosemöglichkeiten. Neben der bereits ausführlich behandelten Auslesemöglichkeit der Batteriedaten können über das Lenkraddisplay auch Informationen über die anderen im Auto vorhandenen Komponenten abgerufen sowie Einstellungen vorgenommen werden.

Das „**Safety-Device**“ ist ein vom Team entwickeltes Gerät, das für die Überwachung der elektrischen Sicherheit zuständig ist. Dieses Gerät steuert die HV-Relais an, hat die Leistungsstufe für diese integriert und aktiviert das orange Blinklicht, das auf dem Überrollbügel montiert ist. Dieses wird aktiviert, wenn im Zwischenkreis mehr als 60V gemessen werden. Der Interlockkreis ist eine Leitung, die vom Safety-Device versorgt wird und durchs gesamte Auto führt. An gewissen Stellen kann das Signal durch Schalter getrennt werden. Der Kreis schließt sich wieder beim Safety-Device, das auswertet ob alle Schalter geschlossen sind. Da die Leitung auf Versorgungsspannung liegt, kann auch ein Leitungsbruch erkannt werden. Die Schalter sind vorgesehen: am Hauptschalter, an den drei Notausschaltern, am Deckel des Stromrichters, an den Deckeln des Accumulator-Containers, um zu überprüfen, ob diese geschlossen sind und vor dem Bremspedal, um ein Versagen des Bremssystems zu erkennen. Der wohl wichtigste Sicherheitscheck für das IT-Netz im Fahrzeug ist die Isolationsüberwachung. Hierbei wird mit dem vorgeschriebenen Isolationswächter iso-F1 IR155-2 der Firma Bender laufend der Widerstand zwischen der Hochvoltbatterie und der Fahrzeugkarosserie, die mit der Masse des Kontrollsystems verbunden ist, gemessen. Die Auswertung des Isolationswiderstandes erfolgt am Mikrocontroller im Safety-Device. Der gemessene Widerstandswert wird an den zentralen Rechner geschickt.

In Abbildung 31 ist das elektrische Blockschaltbild des Fahrzeugs dargestellt und zeigt die prinzipielle Funktionsweise und die Datenverbindungen. Die Spannungsversorgung der Geräte im Kontrollsystem und die Signalleitungen zu den Komponenten, die für das Antriebssystem nicht relevant sind, wurden nicht eingezeichnet, um die Abbildung übersichtlich zu halten. Auch die Verschaltung der Batterien beziehungsweise die Komponenten im Accumulator Container wurden nur reduziert dargestellt.

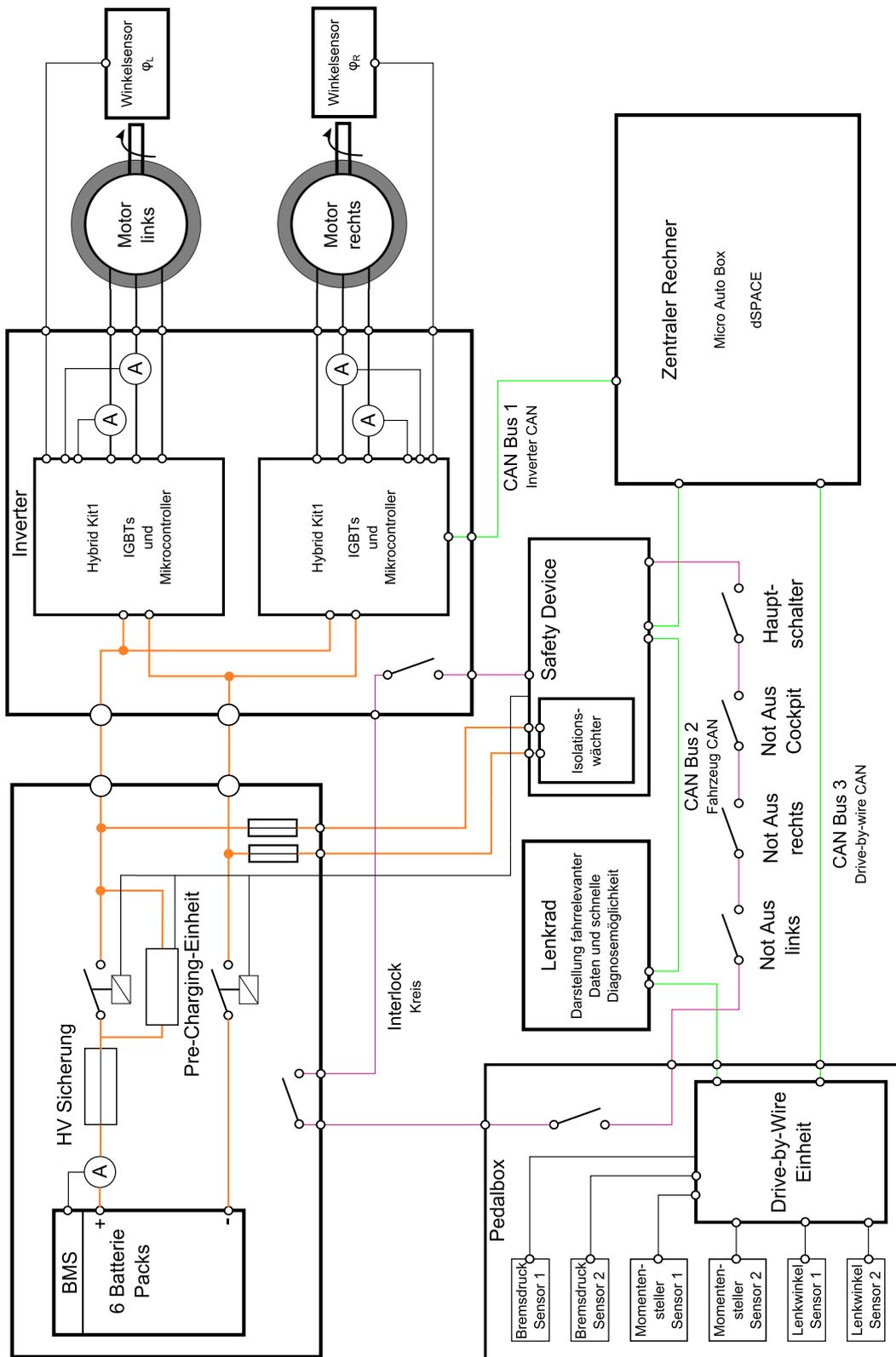


Abbildung 31 Elektrisches Blockschaubild MaxWheel

Mittels der Aktivierungsroutine, die in Kapitel 4.5 „Betrieb“ beschrieben ist, wird das Fahrzeug in den fahrbereiten Zustand gebracht. Ab diesem Zeitpunkt gibt der Fahrer durch Betätigung des Beschleunigungspedals einen Momentenwunsch vor. Die Messwerte der Pedalstellung werden an die zentrale Steuereinheit übermittelt. Hier erfolgt die Auswertung sowie ein weiterer Gültigkeitscheck der beiden empfangenen Werte und die Zuordnung von Pedalstellung zum vorgegebenen Moment. Mittels verschiedener Lookup-Tabellen kann die Charakteristik des Beschleunigungspedals zwischen einem linearen und einem progressiven Verhalten durch den Fahrer am Lenkrad umgeschaltet werden. Aufgrund der fahrdynamischen Bedingungen wird das Moment für den linken und den rechten Motor berechnet und über den CAN-Bus zu den Stromrichtern übertragen. Die Nachrichten, welche 100 Mal in der Sekunde ausgesickt werden, haben ein CRC Byte und einen Zähler. Die Kommunikation funktioniert wie bei der Drive-by-Wire Einheit. Im Inverter läuft die Motorregelung nach dem Prinzip der feldorientierten Regelung von Synchronmotoren.

5.2. Sicherheitstechnische Aspekte

Ein Rennfahrzeug und im Speziellen ein Prototyp, der von Studierenden entwickelt wird, birgt Gefahren. Die Risiken, die aus der mechanischen Konstruktion hervorgehen, sind von den benzinbetriebenen Formula Student Fahrzeugen bekannt. Diese werden durch die langjährige Entwicklung des Reglements bereits sehr streng kontrolliert. Die Hauptaugenmerke, um Unfälle und deren Folge zu minimieren, konnten auf ein crashsicheres Chassis, auf die Komponenten im Bremssystem, auf die Befestigung des Fahrwerks und auf das Kraftstoffsystem gelegt werden. Bis auf die Anforderungen an das Treibstoffsystem werden alle Anforderungen auch bei den Elektroautos übernommen. Neue Gefahrenquellen bilden die Batterien und das elektrische System, in dem Spannungen über dem berührungssicheren Bereich auftreten. Die besondere Gefahr besteht darin, dass sie mit den menschlichen Sinnesorganen nicht wahrgenommen werden können. Von diesen beiden Hauptgefahrenquellen lassen sich drei Unfallgruppen ableiten, die auch im Reglement beschrieben sind und für die Vorsichtsmaßnahmen getroffen werden müssen: Berührung von stromführenden Teilen, Potentialdifferenzen zwischen Bauteilen und eine unkontrollierte chemische Reaktion in den Batterien.

Zum Schutz vor Berührung von stromführenden Teilen muss das HV System isoliert sein. Das System ist so aufgebaut, dass mindestens zwei Fehler auftreten müssen, um eine gefährliche Potentialdifferenz abgreifen zu können. Mit dem Isolationswächter wird der Widerstand aller leitenden Teile, die mit dem Chassis verbunden sind, gemessen. Der Fehlerfall tritt ein sobald der Widerstand zwischen dem HV-System und dem Kontrollsystem zu gering wird. Alle nicht leitenden Gehäuse, in denen HV-Komponenten untergebracht sind, sind doppelt isoliert. Durch das Öffnen eines Gehäuses besteht die Gefahr, dass man stromführende Teile berühren könnte. Aus diesem Grund sind dort die Schalter des Interlock-Kreises angebracht.

Besonders die laufende Überwachung des Isolationswiderstandes ist enorm wichtig. In zwei Situationen ist es im MaxWheel vorgekommen, dass der geforderte Isolationswiderstand unterschritten wurde. Einmal wurde während der Fahrt durch eine scharfe Kante des Motorgehäuses ein Motorkabel aufgescheuert und bildete einen Schluss auf Fahrzeugmasse. Ein weiteres Problem stellten die Gehäuse der Packs dar. Auch hier war mechanische Belastung die Ursache. Beim Montieren des Deckels wurde die Glasfaserschicht durchtrennt. So kam ein Kontakt des Packs mit der Kohlefaser in Berührung. Abhilfe schaffte eine zusätzliche Kunststoffschicht in diesem Bereich.

Da der Isolationswächter nur Gleichstrom als Fehlerstrom erkennt, könnte durch Koppelkapazitäten ein Strom mit der Frequenz des Stromrichters eine Wechsellspannung verursachen, die dem Kontrollsystem überlagert wird. Befinden sich elektrisch leitende Teile in der Nähe von Leitungen des Kontrollsystems, die nicht mit diesem verbunden sind, könnte dort ein Potential auftreten, das bei Berührung von außen eine Gefahrenquelle darstellt. Deshalb wird vom Reglement gefordert, dass alle elektrisch leitende Teile eine gute Verbindung mit der Fahrzeugmasse haben. Kritische Teile sind das Lenkrad, die Radträger und die Felgen. Durch die gute Verkabelung aller Teile traten diesbezüglich keine Probleme auf.

Wie in Kapitel 4.5 „Betrieb“ beschrieben, bestand zu keinem Zeitpunkt die Gefahr, einen Grenzwert der Batterien zu überschreiten, der zu einem Brand führen könnte. Dies ist mit der zuverlässigen Überwachung und der gekoppelten Abschaltung

gewährleistet. Sollte es dennoch zu einem Brand in den Batterien kommen, ist es von großer Bedeutung, dass der Fahrer in den vorgeschriebenen fünf Sekunden aus dem Fahrzeug aussteigen kann und sich in Sicherheit bringt. Das Löschen der Zellen ist nicht einfach möglich, da in den Zellen sowohl der Brennstoff als auch der Sauerstoff für die Verbrennung gespeichert sind. Nur mit ausreichender Kühlung kann die exotherme Reaktion gestoppt werden. Wasser oder andere Feststofflöscher sollten aufgrund der Spannung nicht verwendet werden. Geeignet sind CO₂ Löscher.

Grundsätzlich werden die Batterien in der Ladestation gelagert. Das garantiert, dass am Fahrzeug jeder ohne Gefahr arbeiten kann. Nur für Tests am HV-System beziehungsweise auf der Teststrecke werden die Batterien eingebaut. Nur drei Teammitglieder, die entsprechend eingeschult wurden, dürfen die Batterien ein- und ausbauen. Während dieser Arbeiten sind andere Tätigkeiten am Auto nicht zulässig. Die Arbeiten, um die Verbindungen der Packs im Fahrzeug herzustellen, wurden in einer Checkliste erfasst, um die Schritte in der richtigen Reihenfolge durchzuführen und die Sicherheitsvorkehrungen stets einzuhalten. Isolierte Schutzkleidung und isoliertes Werkzeug sind Pflicht. Erst nachdem der Accumulator-Container geschlossen ist, steigt der Fahrer in das Fahrzeug ein. Sobald alle Systeme im Kontrollsystem laufen werden die HV Sicherung eingesetzt und die Notausschalter gelöst, damit der Fahrer losfahren kann.

6. Ausblick

In der ersten Saison des TU Graz e-Power Racing Teams wurde, von der Idee ausgehend, ein Team aus 25 Studierenden zusammengestellt, die Infrastruktur aufgebaut und die finanziellen Mittel für die Umsetzung dieses Projekts organisiert. Nach dem Bau des Autos konnte an den Wettbewerben erfolgreich teilgenommen werden. Aufgrund der extrem kurzen Entwicklungszeit gibt es einige Bereiche, die aus den gesammelten Erfahrungen dieser Saison verbessert werden könnten. Die verwendeten Komponenten, die in dieser Diplomarbeit behandelt wurden, haben sich für den Einsatz im Rennauto bewährt.

Für den Energiespeicher konnten NMC Batterien eingesetzt werden, die von ihrer Technologie auf dem neuesten Stand der Technik sind. Die Kapazität der Zellen ist zu groß für die benötigte Energie und den eingesetzten Motor. Aufgrund eines Sponsorings dieser Zellen wurden sie dennoch eingesetzt und ein Kompromiss zwischen der installierten Energie und dem Spannungsniveau für den Motor gemacht. Möchte man das Pack für die Nennspannung des Motors auslegen und die benötigten 8 kWh speichern so wären 20 Ah Zellen ideal. Der Vorteil aus den leicht überdimensionierten Batterien ist, dass die Zellen nicht bei jeder Fahrt auf Maximum beansprucht werden und nur selten die Spannungsgrenzen erreicht werden. Ein weiterer Vorteil ist, dass aufgrund der Masse die thermische Verlustenergie in den Batterien über das Rennen gespeichert wird. Somit ist keine zusätzliche aktive Kühlung notwendig.

Das Batteriemangement-System hat alle Anforderungen, die seitens des Reglements und für den Betrieb im Auto gefordert sind, erfüllt. Da der integrierte Schaltkreis von Analog Devices selbst noch in Entwicklung ist, traten zahlreiche Kommunikationsschwierigkeiten mit dem Mikrocontroller auf. Diese konnten mit zusätzlichen Abfragen in der Software gelöst werden. Für den Aufbau des Packs hat sich gezeigt, dass es sinnvoll wäre, wenn die gesamte Elektronik abgenommen werden könnte. Besonders bei einer Fehlersuche auf der BMS Master-Platine musste mit der aktuellen Konfiguration immer unter Spannung gearbeitet werden. Durch eine Umverteilung der

Funktionen der Platinen könnte eine Zellverbindungs-Platine entworfen werden, auf die die Platine mit der gesamten Elektronik montiert und verbunden wird.

Die eingesetzten permanent erregten Synchron-Motoren haben im Vergleich zu anderen Motorprinzipien das beste Leistungsgewicht und die beste Leistungsdichte. Da die Motoren speziell für den Einsatz im MaxWheel gefertigt wurden, passt auch die Nenn- und Maximalleistung genau zu den Anforderungen. Ein Verbesserungspotential liegt in der Konstruktion der Motorgehäuse, wo einiges an Gewicht eingespart werden könnte.

Die Hardware des Stromrichters besteht hauptsächlich aus dem Hybrid Kit1 von Infineon, das sehr zuverlässig funktioniert. Speziell für den Einsatz in einem Prototypen eignet sich dieses System optimal, da der Quellcode der Software, die auf dem Inverter läuft, bekannt ist und Änderungen sowie Modifikationen für die Integration in das Gesamtsystem leicht möglich sind.

Für den zentralen Rechner wurde eine Mikro-Auto-Box von dSPACE eingesetzt. Dieses System ermöglicht eine sehr flexible und einfache Programmierung. Die Schnittstelle zu MatLab Simulink und die automatisierte Programmcode-Erzeugung ermöglicht speziell für Regelungstechniker eine Programmierung mit bereits bekannten Tools.

Das gesamte Auto und die Platzierungen bei den Bewerben kann als voller Erfolg des TU Graz e-Power Racing Teams gewertet werden. Durch die hervorragenden Ergebnisse wurde auch der Grundstein für die aktuelle Saison 2011 gelegt. Der Nachfolger des MaxWheel steckt bereits in der Konstruktion und Fertigung.

Literaturverzeichnis

Analog Devices. "<http://www.analog.com>"

http://www.analog.com/static/imported-files/data_sheets/AD7280A.pdf

(Zugriff am 02.05.2011).

Beuth, Olaf, und Klaus Beuth. Leistungselektronik, Elektronik 9.

Vogel Business Media, 2003.

ISBN: 978-3802318535

Formula Student Electric. Rules and Important Documents. 2010.

<http://www.formulastudentelectric.de/events/event-2010/rules-important-documents/> (Zugriff am 16.03.2011).

Hoffmann, Peter. Hybridfahrzeuge.

Wien: Springer Verlag, 2010.

ISBN: 978-3211891902

Infineon Technologies. „<http://www.infineon.com>.“

http://www.infineon.com/dgdl/AN_Hybrid_Kit_for_HP1_Module_V2_3.pdf

(Zugriff am 12.03.2011).

Institution of Mechanical Engineers. History.

<http://www.formulastudent.com/aboutus/history.aspx>

(Zugriff am 12.03.2011).

Kastens, Mathias. FStotal.

<http://www.fstotal.com/home/history>

(Zugriff am 19.05.2011).

Riefenstahl, Ulrich. Elektrische Antriebssysteme.

Wiesbaden: B.G. Teubner Verlag, 2006.

ISBN: 978-3-8348-1331-2

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 Zeitplan MaxWheel	7
Abbildung 2 Kinematisches Modell	10
Abbildung 3 Geschwindigkeitsvergleich	11
Abbildung 4 Histogramm Geschwindigkeitsvergleich	15
Abbildung 5 Bereich für die elektrischen Komponenten des Antriebs.....	20
Abbildung 6 Leistungshistogramm Vergleich Deutschland und England	23
Abbildung 7 Leistungshistogramm mit verschiedenen Fahrzeugmassen	24
Abbildung 8 Vergleich von Kraftstoffen (Hoffmann 2010).....	28
Abbildung 9 Funktionsweise Batterie (Hoffmann 2010).....	29
Abbildung 10 Maximale Zugkraft eines Fahrzeugs mit Verbrennungsmotor (Hoffmann 2010, 117)	37
Abbildung 11 Antriebskonzept	40
Abbildung 12 Sinusnachbildung.....	42
Abbildung 13 Einsatzbereich der wichtigsten steuerbaren elektronischen Bauelemente (Riefenstahl 2006)	43
Abbildung 14 Blockschaltbild Stromrichter (Infineon Technologies)	44
Abbildung 15 Stromrichter Aufbau	45
Abbildung 16 HV Container.....	50
Abbildung 17 Zellverbindung.....	51
Abbildung 18 Messung der Zellspannungen (Analog Devices)	53
Abbildung 19 Layout: Messung Zellspannung.....	53
Abbildung 20 Funktionsweise Temperaturmessung (Analog Devices)	54
Abbildung 21 Kommunikation BMS.....	56
Abbildung 22 Daisy Chain Schnittstelle (Analog Devices)	57

Abbildung 23 Funktionsweise Balancing	59
Abbildung 24 Galvanische Trennung CAN-Bus.....	60
Abbildung 25 Flussdiagramm BMS Software	65
Abbildung 26 Kapazitätsbestimmung	69
Abbildung 27 State of Discharge.....	70
Abbildung 28 Endurance Simulation	71
Abbildung 29 Bestimmung Innenwiderstand	72
Abbildung 30 Menü Lenkraddisplay	75
Abbildung 31 Elektrisches Blockschaltbild MaxWheel.....	79