



Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg
Hamburg University of Applied Sciences

Bachelorarbeit

Martin Koschitzki
Analyse grundlegender Voraussetzungen
zur erfolgreichen Entwicklung eines
Formula Student Electric Fahrzeuges innerhalb des
Projektes HAWKS Racing e.V. an der HAW Hamburg

*Fakultät Technik und Informatik
Department Fahrzeugtechnik und Flugzeugbau*

*Faculty of Engineering and Computer Science
Department of Automotive and
Aeronautical Engineering*

Zusammenfassung

Martin Koschitzki

Thema der Bachelorthesis

Analyse grundlegender Voraussetzungen zur erfolgreichen Entwicklung eines Formula Student Electric Fahrzeuges innerhalb des Projektes HAWKS Racing e.V. an der HAW Hamburg

Stichworte

Elektromobilität, Elektrofahrzeug im Motorsport, fahrdynamische Einflüsse, Reglement Formula Student Electric, Benchmarking von Mitbewerbern, Konzepterstellung, Konzeptbewertung, Elektrofahrzeug an der HAW, Sicherheitsrichtlinien, Prüfstandsarbeit Elektromotoren und Akkusysteme, Laboreinrichtungen, Sicherheitslehrgänge, Teamstrukturveränderungen beim HAWKS Racing e.V.

Kurzzusammenfassung

Elektromobilität ist in der heutigen Zeit ein wichtiger Faktor in unserer Gesellschaft. Die Schlagwörter Klimawandel, Ressourcenknappheit, Urbanisierung und Mobilität jedes Einzelnen etablieren sich im Sprachgebrauch. Die Automobilindustrie setzt auf Elektromobilität. Gleichzeitig werden durch diese Form der Fahrzeuge neue Probleme aufgeworfen, aber auch neue Technologien vorangetrieben. Das „Ökomobil“ ist überholt und selbst der Rennsport widmet sich dem Thema Elektrofahrzeug. Die Rennserie Formula Student Electric ist ein Konstruktionswettbewerb bei dem rein elektrisch angetriebene Fahrzeug im Gesamtpaket überzeugen müssen. Das HAWKS Racing Team der HAW Hamburg blickt zukunftsweisend auf die Umsetzung solch eines Fahrzeuges. Hierbei dürfen die Mitbewerber nicht aus den Augen verloren werden, um den Erfolg des HAWKS Racing e.V. nicht abrechnen zu lassen. Doch wie kann solch ein Projekt an der HAW Hamburg sicher, nachhaltig und kostengünstig angegangen werden. Es werden Sicherheitsrichtlinien beleuchtet die einzuhalten sind. Möglich Nutzungen von vorhanden Prüfständen werden geprüft und Vorschläge zur Verbesserung gegeben. Außerdem wird die mögliche Umstrukturierung des Teams und die daraus resultierende interdisziplinäre Zusammenarbeit der HAW Hamburg mit dem HAWKS Racing e.V. erfasst.

Abstract

Martin Koschitzki

Title of the paper

Analysis of basic requirements for successful development of a Formula Student Electric Car within the Projekt HAWKS Racing incorporated association at the UAS Hamburg

Keywords

Electrical car, electric racing car, vehicle dynamics, rules Formula Student Electric, benchmarking of competitors, conception, electric car at the UAS Hamburg, safety guidance, test bed electrical engine and batterie, laboratory facilities, safety course, team structure changing HAWKS Racing incorporated association

Abstract

In this day and age electrical cars are an important topic in our society. The keywords climate-change, shortage of resources, urban growth and mobility established in our linguistic usage. The automotive industry forces electrical cars. At the same time this cars produce new problems, but also develop new technologies. The “eco-car” is antiquated and motorsport is interested in electrical race cars, too. The Formula Student Electric is a competition with electrical cars that not only compete in races but also in design, development and marketing. The HAWKS Racing team, of the UAS Hamburg is forward-looking to the usage of an electrical car. But the competitors must not be lost out of sight for further success. This project needs to be safe, sustainable and economic. Some safety guidance, that must be followed, get introduced. Possible usage of test beds and some suggestions for improvements get checked. Furthermore possible changes in the team structure for a resulting interdisciplinary collaboration of the UAS Hamburg and the HAWKS Racing team are given.

Martin Koschitzki

**Analyse grundlegender Voraussetzungen
zur erfolgreichen Entwicklung eines
Formula Student Electric Fahrzeuges
innerhalb des Projektes HAWKS Racing e.V.
an der HAW Hamburg**

Bachelorarbeit eingereicht im Rahmen der Bachelorprüfung
im Studiengang Fahrzeugbau
am Department Fahrzeugtechnik und Flugzeugbau
der Fakultät Technik und Informatik
der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg

in Zusammenarbeit mit:
HAWKS Racing e.V.
Berliner Tor 9
20099 Hamburg

Erstprüfer: Prof. Stefan Bigalke
Zweitprüfer: Prof. Dr. Volkher Weißermel

Abgabedatum: 28.08.2013

Inhalt

1.	Einleitung.....	10
2.	Motivation zur Elektromobilität.....	11
2.1	Elektromobilität.....	12
2.2	Neue Technologien.....	18
2.3	E-Fahrzeug als Rennwagen.....	21
2.4	Motivation zur Formula Student Electric.....	23
3.	Vorgaben der Rennserie.....	24
3.1	Reglement Formula Student electric.....	25
3.2	Fahrdisziplinen und daraus resultierende Eigenschaft des Fahrzeuges.....	29
3.3	notwendige Eigenschaften des Fahrzeuges.....	33
4.	Analyse der Mitbewerber.....	35
4.1	Konzepte.....	36
4.2	Motoren.....	37
4.3	Akkus.....	40
5.	Bewertung von Konzepten.....	41
5.1	Auswahl des Konzeptes.....	41
5.1.1	Varianten 5, 6 und 7.....	42
5.1.2	Antrieb mit einem zentralen Motor (Variante 1).....	43
5.1.3	Antrieb mit zwei Motoren mittig (Variante 2).....	46
5.1.4	Antrieb mit zwei Motoren mittig und zwei Radnabenmotoren vorn (Variante 3).....	48
5.1.5	Antrieb mit vier Radnabenmotoren (Variante 4).....	50
5.2	Akkusystemauswahl.....	51
6.	Umsetzung an der HAW Hamburg.....	58
6.1	Sicherheitsrichtlinien.....	59
6.2	Prüfstände.....	68
6.2.1	Motorenprüfstand.....	69
6.2.2	Batterieprüfstand.....	71
6.2.3	Hydropulser.....	74
6.3	Zugang zu Laboren.....	77

7.	Umsetzung bei HAWKS	78
7.1	Sicherheitsrichtlinien von HAW und intern bei HAWKS.....	78
7.2	Sicherheitslehrgänge.....	79
7.3	Umbaumaßnahmen.....	80
7.4	Wissenstransfer zwischen Hochschule und HAWKS/ Professoren und HAWKS	81
7.5	Umstrukturierung des Teams	82
7.6	Zeitplanung.....	86
8.	Zusammenfassung	88
9.	Literaturverzeichnis	89
	Anhang A.....	A - 1
	Anhang B.....	B - 1
	Anhang C.....	C - 1
	Anhang D.....	D - 1
	Anhang e	E - 1
	Anhang F	F - 1
	Anhang G	G - 1
	Erklärung zur selbstständigen Bearbeitung einer Abschlussarbeit	letzte Seite

Abkürzungsverzeichnis

Kürzel	Erläuterung	Verwendung
AC	engl. Abkürzung für Wechselspannung	S 22, 35, 60
Acc	Acceleration, engl. Beschleunigung	S 30
Auto X	Auto Cross	S 30
CO	Kohlenmonoxid	S 9
CO ₂	Kohlendioxid	S 9, 16f, 17, 29
DC	engl. Abkürzung für Gleichspannung	S 22, 25, 35, 60, 63
e.V.	eingetragener Verein	S 7, 32, 70, 75ff.
FSAE	Formula SAE	S 6, 27
FSG	Formula Student Germany	S 28
H09	9. Formula Student Fahrzeug des HAWKS Racing e.V.	S 54, 80
HAW	Hochschule für Angewandte Wissenschaften	S 1ff., 55f, 68ff.
LED	Licht-emittierende Diode	S 25
NO _x	Stickoxide	S 9
RMS	engl. Abkürzung für Effektivwert	S 22
Rück.	Rückweg	S 30
SAE	Society of Automotive Engineers	S 6
SO _x	Schwefeloxide	S 9
SP	Skid Pad	S 30
TS	tractive system	S 23ff.
VDI	Verein deutsche Ingenieure	S 8

Tabellenverzeichnis

Kürzel	Erläuterung	Verwendung
Tabelle 1	Distanzen bei Disziplinen	S 3
Tabelle 2	Überprüfungsintervalle von ortsveränderlichen elektrischen Betriebsmitteln	S 6
Tabelle 3	Überprüfungsintervalle von elektrischen Hilfsmitteln	S 6
Tabelle 4	ausführbare Arbeiten durch Personen	S 6
Tabelle 5	Vergleich der technischen Daten ausgewählter Teams	C - 1
Tabelle 6	Analyse der prozentualen Mitgliederverteilung unterschiedlicher Formula Student Electric Teams	E - 1

Formelverzeichnis

Gleichung 1: Fahrwiderstand eines Fahrzeuges.....	18
Gleichung 2: Darstellung von Lithiumchlorid aus Lithiumcarbonat.....	19
Gleichung 3: Darstellung von elementarem Lithium aus Lithiumchlorid.....	19
Gleichung 4: Entladezeit Akkumulator.....	52
Gleichung 5: Nennspannung Gesamtfahrzeug.....	55
Gleichung 6: Energiebedarf Gesamtfahrzeug.....	55
Gleichung 7: Beispiel Anzahl Akkuzellen durch Gesamtspannung.....	56
Gleichung 8: Beispiel Anzahl Akkueinheiten.....	56
Gleichung 9: Beispiel errechnete Gesamtspannung.....	56

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Bevölkerungsentwicklung 2006 bis 2025	13
Abbildung 2: Lohner Porsche als Allradversion [WIK11].....	14
Abbildung 3: Henney Renault Dauphine [WIK06].....	15

Abbildung 4: Enfield 8000 [WIK07]	15
Abbildung 5: Witkar-Projekt [WIK111]	15
Abbildung 6: Toyota RAV 4 EV [WIK12]	16
Abbildung 7: Nissan Hypermini [WIK071]	16
Abbildung 8: Honda EV Plus [WIK072]	16
Abbildung 9: GM EV 1 [ELV13]	16
Abbildung 10: Hotzenblitz [WIK08]	16
Abbildung 11: Golf CitySTROMer [HUM13]	16
Abbildung 12: Tesla Roadster [BUN11]	17
Abbildung 13: Renault Twizy [VOP13]	17
Abbildung 14: OPEL Ampera [GER13]	17
Abbildung 15: Toyota TMG EV P002 [DOM12]	21
Abbildung 16: Leistungselektronik und Motoren des Toyota TMG EV P002 [DOM12]	21
Abbildung 17: Begrenzung der Verdeckung der Räder [SAE13]	24
Abbildung 18: FSAE Skip Pad [SAE13]	30
Abbildung 19: beispielhafte Streckenführung und markierungen der Strecke	31
Abbildung 20 Anzahl der Teams Weltweit und Platzierungen HAWKS Racing e.V.	35
Abbildung 21: Elektrofahrzeug des KA-Racelng Teams [KAR13]	38
Abbildung 22: mögliche Motorenkonzepte	41
Abbildung 23: schematischer Aufbau Gehäuse für Differential	45
Abbildung 24: Ragone-Diagramm [DAT131]	52
Abbildung 25: Aufbau Lithiumakkumulator [MAN13]	53
Abbildung 26: Vergleich des Flächeninhaltes bei gleicher Anzahl von Flach- und Rundzellen	54
Abbildung 27: Diagramm Massenverteilung des H09	57
Abbildung 28: Warnhinweisschilder für das Arbeiten an Hochvolt- Fahrzeugen	65
Abbildung 29: Dreistufenmodell für Arbeiten am Hochvolt-Fahrzeug	66
Abbildung 30: Flussdiagramm zur Schulung von Mitarbeitern	67
Abbildung 31: mögliche Position eines Spannungs-umwandlers	70
Abbildung 32: Messergebnisse Typ 18650 Zelle	72
Abbildung 33: Versuchsaufbau	72
Abbildung 34: Einstempelhydropulser im Fahrzeuglabor der HAW Hamburg, mit 8-Punkt Verschraubung	74
Abbildung 35: Diagramm mit Kennlinien des Einstempel-Hydropulsers	75
Abbildung 36: schematischer Aufbau Hydropulser mit Testgestell	76
Abbildung 37: Einteilung der technischen Baugruppen des HAWKS Racing H09	83
Abbildung 38: prozentuale Verteilung der Teammitglieder in den einzelnen Baugruppen	83
Abbildung 39: mögliche Struktur der technischen Baugruppen für ein	84

Abbildung 40: möglich prozentuale Verteilung der Teammitglieder eines Formula Student Electric Teams.....	85
Abbildung 41: schematische Darstellung möglicher Motorenkonzepte.....	D - 1
Abbildung 42: Efficiency Wertung FSE 2013 [FOR13].....	G - 1

1. Einleitung

In der heutigen Zeit haben die Schlagwörter Klimawandel und Ressourcenknappheit bereits Einzug in den Grundwortschatz unserer Gesellschaft gehalten und es wird ihnen allseits große Bedeutung zugemessen. Ein Einfluss auf alle Bereiche des Lebens lässt sich somit nicht von der Hand weisen. Auch die Automobilindustrie ist daran interessiert, die Themen aktiv positiv zu beeinflussen. Es wird auf Elektromobilität gesetzt, da sich auf diese Weise eine Unabhängigkeit von fossilen Brennstoffen in Kombination mit minimalem Schadstoffausstoß realisieren lässt.

Ebenso wie die Automobilindustrie ist auch der Motorsport an dieser Technologie interessiert. Hier erschließt sich ein Forschungsfeld aus hoher Leistung und hohem Wirkungsgrad sowie maximalen Fahreigenschaften, das eine interessante Grundlage für den Serieneinsatz liefert.

In dieser Ausarbeitung werden Möglichkeiten erörtert, die ein rein elektrisch angetriebenes Fahrzeug als Rennwagen der Rennserie Formula Student Electric bietet. Das Reglement der Formula Student Electric sowie die spezielle Art dieser Rennserie und die sich daraus ergebenden Einflussfaktoren sind zu beachten. Zusammen mit einer Mitbewerberanalyse und den Vorgaben werden prinzipielle Konzepte vorgestellt, die eine realisierbare und zielführende Durchführung des Projektes ermöglichen.

Die Rahmenbedingungen, die so entstehen sollen als Grundlage für die Analyse der Möglichkeiten zur Entwicklung, Erprobung und Fertigung eines Formula Student Electric Fahrzeuges an der HAW Hamburg genutzt werden. Hierbei steht die Überprüfung der bereits vorhandenen und noch zu verwirklichenden Modalitäten im Vordergrund. Weiterhin ist der Faktor Sicherheit ein wichtiger Parameter für das weitere Fortbestehen des Projektes. Es wird das zukünftige Zusammenwirken des Projektes HAWKS Racing e.V. und der HAW Hamburg entworfen sowie ein visionärer Ansatz zur Einbindung des HAWKS Racing e.V. in die Lehre gegeben.

2. Motivation zur Elektromobilität

„Elektrische Antriebsmotoren halten Einzug ins Automobil, zuerst zur Unterstützung des Verbrennungsmotors im sogenannten Hybridantrieb, später auch als alleiniger Antrieb eines ‚Nullemissionsfahrzeugs‘, das am Ort der Fortbewegung keine Schadstoffe mehr ausstößt. Der elektrische Antrieb hat zudem den Vorteil, ein großes Drehmoment bereits aus dem Stand generieren zu können, so dass zumindest beim Beschleunigungsverhalten nicht der Eindruck eines ‚Ökomobils‘ mit beschnittener Fahrdynamik aufkommt.“ [VDI08]

Diese Aussage aus der „VDI Studie – Zukunft des Automobils“ aus dem Jahr 2008 bestätigt sich beim Blick auf den heutigen Automobilmarkt. Diese Tendenz wirkt sich auf die komplette Automobilindustrie aus, hält ebenso Einzug bei sportlichen Serienfahrzeugen und in den Motorsport. Ein Fahrzeug, das mit einem Elektromotor angetrieben wird, birgt für den motorsportlichen Einsatz große Vorteile, bringt aber ebenso große Herausforderungen mit sich. Zum einen ist die typische Charakteristik der Elektromotoren, bereits von Beginn des Drehzahlbandes sehr hohe Drehmomente bei sehr hohen Wirkungsgraden zu erzielen, ein großer Vorteil. Zu anderen lassen sich Allrad getriebene Fahrzeuge, zum Beispiel durch Radnabenmotoren, sehr leicht realisieren und durch eine individuelle elektronische Steuerung aktiv in der Fahrdynamik beeinflussen. Jedoch stellt die Speicherung der notwendigen elektrischen Energie heute noch eines der größten Probleme dar, da die derzeitigen Batteriesysteme ein ungünstigeres Verhältnis zwischen Energiespeichervermögen und Masse aufweisen. Im Vergleich zu fossilen, flüssigen Kraftstoffen sind die Energiedichten etwa 50 mal geringer [VDI08]. Dadurch ergibt sich eine höhere Masse des Gesamtfahrzeuges, was im Rennsport nicht erwünscht ist.

Im Gegensatz zur Entwicklung eines verbrennungsmotorgetriebenen Fahrzeuges stellt die Entwicklung eines Fahrzeuges für die Formula Student Electric also eine neue Herausforderung dar. Zum einen kann innovative Technik kennengelernt und verstanden werden. Zum anderen kann ebenfalls bei der Entwicklung dieser neuen Technik mitgearbeitet und gegebenenfalls auch geforscht werden. Das hierdurch erworbene Wissen kann zur weiteren Verbreitung der Elektromobilität genutzt

werden. Es ist, ähnlich wie bei anderen Produkten, denkbar, dass der Motorsport Entwicklungen erprobt aus denen sich Serienproduktionen ableiten lassen.

2.1 Elektromobilität

Elektromobilität ist ein Schlagwort, das in unseren täglichen Sprachgebrauch Einzug gehalten hat. Aber welchen Hintergrund hat es, dass die Gesellschaft nach dieser Form von Mobilität fragt? Es sind weitere Aspekte, die sich ebenfalls in unserem Sprachgebrauch etabliert haben: Ressourcenknappheit, CO₂-Emission, Klimawandel. Dem Automobil steht ein Wandel bevor, denn die Art der Energieumwandlung aus fossilen Brennstoffen in Bewegungsenergie unterliegt einer natürlichen Grenze. Keine Grenze der Physik, sondern der Geologie. Die fossilen Brennstoffe entstehen in Jahrmillionen und lagern tief unter der Erdoberfläche. Die industrielle Nutzung von Erdöl beginnt zum Ende des 19. Jahrhunderts. Erdöl wird nicht nur als Kraftstoff für Verbrennungsmaschinen genutzt, sondern auch zur Herstellung von Elektrizität und Kunststoffen. Der Bedarf all dieser Endprodukte aus Erdöl stieg im 20. Jahrhundert so immens an, dass die Erdölvorkommen auf der Erde schneller extrahiert werden als neues Erdöl entstehen kann, da der Prozess der Erdölentstehung 10.000 bis einige Millionen Jahre [BRE13] dauert. So entsteht eine Knappheit der fossilen Brennstoffe, die mit einer Steigerung der Rohstoff- und Endproduktpreise einhergeht. Viel gravierender ist aber das absehbare Ende der Erdölvorkommen. Der Mensch ist gezwungen nach Alternativen zu suchen [SCH09].

Doch nicht nur die Verknappung des Rohstoffes stellt ein Problem dar, sondern auch die Nutzung. Für die Nutzung als Kraftstoff geht die Energieumwandlung mit einer Verbrennung einher bei der Schadstoffe freigesetzt werden. Diese Schadstoffe sind unter anderem CO, CO₂, NO_x, SO_x und Feinstäube, die dem Menschen und der Umwelt schaden. Im politischen und gesellschaftlichen Fokus stehen derzeit hauptsächlich CO₂ und Feinstaub. CO₂ ist ein sogenanntes Treibhausgas¹ und damit ein Einflussfaktor der globalen Klimaerwärmung. Durch die stetige Erwärmung des

¹ Treibhausgas: „[...] ein natürlicher Bestandteil der Atmosphäre. Ohne seine Treibhauswirkung lägen die Temperaturen unserer Erde nur bei lebensfeindlichen minus 15 °C. Gemeinsam mit dem Wasserdampf und anderen Treibhausgasen sorgt das CO₂ dafür, dass die energiereiche Strahlung von der Sonne den Erdboden erreicht, aber die von diesem reflektierte Wärmestrahlung in der Atmosphäre zurückgehalten wird. [...]“ [SCH09]

Klimas erfolgt ein Abschmelzen des Eises der Erdpole, wodurch der Meeresspiegel kontinuierlich ansteigt und extremere Wetterbedingungen begünstigt werden. Zum einen starke Trockenzeiten, zum anderen heftige Niederschläge und Überschwemmungen.

Des Weiteren werden durch die hohen Schadstoffemissionen in Ballungsgebieten die Lebensbedingungen zunehmend schlechter. Das Thema Urbanisierung ist ebenso bedeutsam, wie die oben genannten Themen. Die Urbanisierung schreitet immer weiter voran. So wird in Abbildung 1 ersichtlich, dass sich die Bevölkerung in den nächsten Jahren immer mehr in die städtischen Ballungsräume verlagert [BER08].

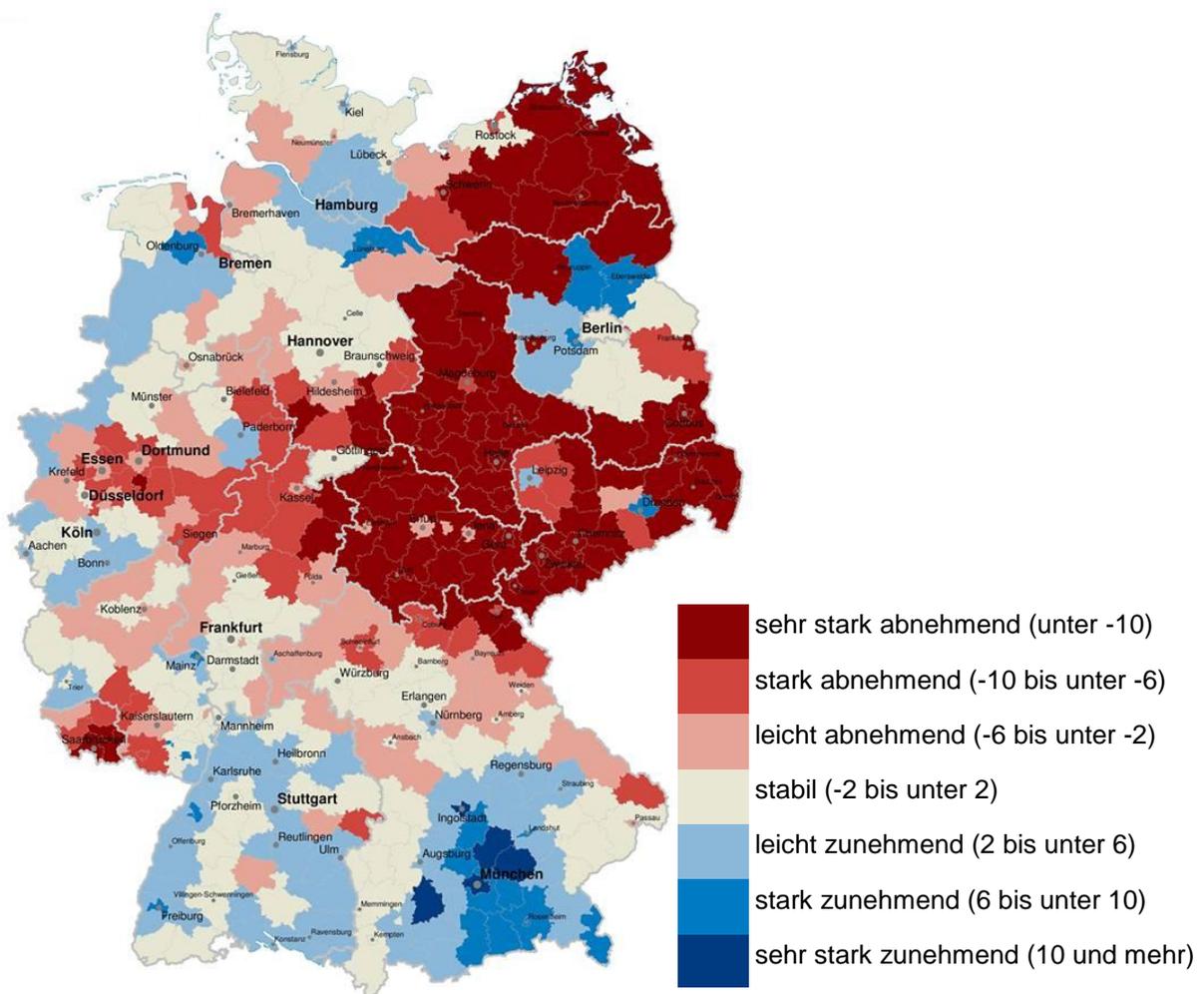


Abbildung 1: Bevölkerungsentwicklung 2006 bis 2025 für Landkreise und kreisfreie Städte (in %)

Die damit einhergehende, steigende Menge an Fahrzeugen in diesen Ballungsräumen wird nicht ausbleiben, da der Wunsch nach Flexibilität und Mobilität bestehen bleibt. Eine Bindung an die öffentlichen Verkehrsmittel, die auch nicht schadstofffrei, allerdings im pro Kopf Verhältnis deutlich besser sind, ist nicht für

jeden erstrebenswert. Abhilfe können rein elektrisch angetriebene Fahrzeuge sein, die lokal keine Schadstoffemission erzeugen. Außerdem begünstigt der urbane Raum eine spezifische Nutzung dieser Elektrofahrzeuge, da die zurückgelegten Distanzen gering sind und die momentan sinnvoll speicherbare Energie der typischen Akkumulatoren genau für diese Nutzung spricht.

Die Idee eines elektrisch angetriebenen Fahrzeuges besteht bereits seit dem 19. Jahrhundert. Zunächst gibt es diverse Entwicklungen von elektrisch betriebenen Lokomotiven, anschließend werden unterschiedliche Dreiräder konstruiert und die ersten Pkw mit Elektroantrieb entstehen zum Ende des 19. Jahrhunderts. 1888 entwickelt die „Coburger Maschinenfabrik A. Flocken“ das erste vierrädrige Fahrzeug zur Personenbeförderung [LAN12]. 1899 konstruiert Ferdinand Porsche für die „k.u.k. Hofwagenfabrik Jakob Lohner & Co“ ein Auto mit Radnabenmotoren an der gelenkten Vorderachse, den „Lohner Porsche“. Im Jahr 1900 präsentiert er dieses bei der Pariser Weltausstellung [POR12]. Abbildung 2 zeigt die „Rennversion“ des Lohner Porsche mit vier Radnabenmotoren. Somit ist es das erste allradgetriebene Fahrzeug [VER13].

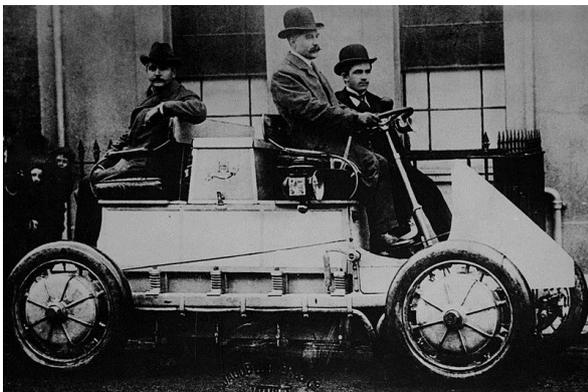


Abbildung 2: Lohner Porsche als
Allradversion [WIK11]

Aufgrund des enormen Gewichts der Bleibatterien und die damit verbundene geringe Reichweite, entwickelt Ferdinand Porsche bereits kurz darauf eine Hybridversion des Lohner Porsches. Ein Benzinmotor generiert den Strom für die Radnabenmotoren [LAN12]. Da die Entwicklung des Automobils zur damaligen Zeit noch nicht weit fortgeschritten ist, denkt niemand an die weite Verbreitung dieses Transportmittels für den Überlandverkehr. Jedoch stellen sich die elektrisch angetriebenen Fahrzeuge für den innerstädtischen Verkehr als vorteilhaft heraus, da die Verbrennungsmotoren die Innenstädte immer mehr verschmutzen und einen hohen Lärmpegel verursachen.

Anfang des 20. Jahrhunderts werden in den USA 40 % der Automobile mit Dampf betrieben, 38 % mit Elektrizität und nur 22 % mit Benzin [ENC13]. Das Elektroauto hat sich hier durchgesetzt. Jedoch gibt es damals die gleichen Probleme wie heute: Die Speichermöglichkeit der Energie in Batterien ist entweder zu gering oder hat ein enormes zusätzliches Gewicht zur Folge. Da fossile, flüssige Kraftstoffe etwa die 50-fache Energiedichte [VDI08] von heutigen Batterien besitzen, ist dies ein enormer Gewichtsvorteil. So setzt sich der Verbrennungsmotor gegenüber dem Elektromotor als Antrieb für Automobile durch, dennoch werden Elektrofahrzeuge weiterhin eingesetzt. So werden in den USA und Großbritannien Elektrofahrzeuge beispielsweise zur Hauslieferung von Milch eingesetzt [ESH12]. Es gibt verschiedene Modelle im Lastkraftwagensektor [ALK13] und als Nischenprodukt im Pkw-Bereich. Hier sind unter anderem der von Henney umgebaute Renault Dauphine Abbildung 3, der Enfield 8000 Abbildung 4 und das Witkar-Projekt Abbildung 5, ein Carsharing Projekt in Amsterdam, zu nennen.



Abbildung 3: Henney Renault Dauphine
[WIK06]



Abbildung 4: Enfield 8000 [WIK07]



Abbildung 5: Witkar-Projekt [WIK111]

Mit Beginn der Ölkrise, ausgelöst durch den Golfkrieg, zu Beginn der 1990er Jahre und dem steigenden Umweltbewusstsein, kommt es zu einer Renaissance des Elektrofahrzeuges. Allerdings beschränkt sich diese auf Kleinserien und Prototypen. So sind hier der der Toyota RAV4 EV Abbildung 6, Nissan Hypermini Abbildung 7, der Honda EV Plus Abbildung 8, der General Motors Electric Vehicle 1 Abbildung 9,



Abbildung 6: Toyota RAV 4 EV [WIK12]



Abbildung 7: Nissan Hypermini [WIK071]



Abbildung 8: Honda EV Plus [WIK072]



Abbildung 9: GM EV 1 [ELV13]



Abbildung 10: Hotzenblitz [WIK08]

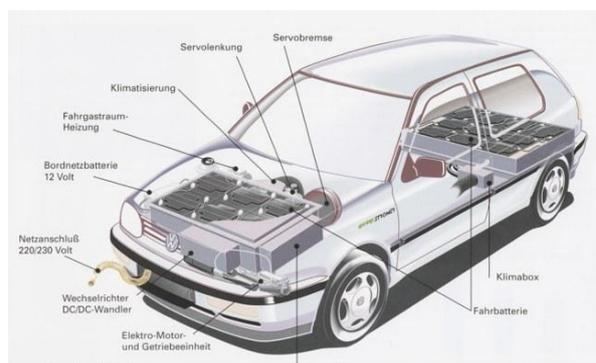


Abbildung 11: Golf CitySTROMer [HUM13]

sowie der Hotzenblitz Abbildung 10 und der Golf CitySTROMer Abbildung 11 zu nennen.

Der Durchbruch in der Vermarktung von Elektrofahrzeugen bleibt jedoch aus.

Nachdem das stetig steigende Umweltbewusstsein sowie politischer Druck zur Senkung des Schadstoffausstoßes und die weiterhin anhaltende Verknappung von Ressourcen und damit einhergehende Preissteigerungen in den letzten Jahren in unsere Gesellschaft beeinflusst, wächst auch die Akzeptanz von alternativen Antriebsmöglichkeiten. Es wird sogar gefordert, dass die Automobilindustrie Fahrzeuge mit Elektroantrieb entwickelt. Hierdurch entstehen zum Beispiel die Fahrzeuge Tesla Roadster Abbildung 12, Renault Twizy Abbildung 13 und OPEL Ampera Abbildung 14.



Abbildung 12: Tesla Roadster [BUN11]



Abbildung 13: Renault Twizy [VOP13]



Abbildung 14: OPEL Ampera [GER13]

Diese drei beispielhaften Vertreter zeigen, dass der Markt umfassend abgedeckt werden kann. So ist der Tesla Roadster ein Sportwagen, der Renault Twizy ein Kleinstfahrzeug für den innerstädtischen Verkehr und der OPEL Ampera ein Mittelklassefahrzeug mit üblichen Abmessungen. Der OPEL Ampera ist noch nicht rein elektrisch, um die Reichweite des Fahrzeuges für den Überlandverkehr zu steigern. Es werden immer mehr Fahrzeuge von fast allen Herstellern entwickelt und zur Serienreife gebracht. So steht dem Kunden die Wahl frei, ein elektrisches Fahrzeug zu fahren und sich daran zu beteiligen, das Verhältnis von Benzin- und Dieselfahrzeugen zu Elektrofahrzeugen ähnlich dem von 1900 in den USA zu verändern.

2.2 Neue Technologien

Die Tatsache, dass die Elektromobilität immer mehr in die Automobilbranche Einzug hält, erfordert eine Bewältigung unterschiedlichster Problemstellungen. Die Fahrzeuge sollen sicher und komfortabel sein, gleichzeitig aber nicht nur wenige Kilometer Reichweite besitzen. Hieraus entwickelt sich ein erster Zielkonflikt für die Elektromobilität und die Lösung dieses Problems ist derart komplex, dass wiederum anderen Zielkonflikte aufgeworfen werden. Das Problem der Reichweite steht in direktem Zusammenhang mit dem Energiespeichervermögen der Batterie, welches wiederum in direktem Zusammenhang mit der Masse der Batterie und somit der Gesamtfahrzeugmasse steht. Betrachtet man nun die Gleichung 1 zur Berechnung des Fahrwiderstandes von Fahrzeugen wird schnell deutlich, dass aus einer Reduktion der Masse auch eine Reduktion des Energiebedarfes resultiert.

Gleichung 1: Fahrwiderstand eines Fahrzeuges

$$F_W = m_F \cdot g \cdot \cos \alpha_{St} + m_F \cdot g \cdot \sin \alpha_{St} + (m_F + c_G \cdot m_{rot}) \cdot a_F + \frac{\rho_L}{2} \cdot v_F^2 \cdot (c_W \cdot A_S)$$

mit:

- F_W : Widerstandskraft
- v_F : Geschwindigkeit des Fahrzeuges
- η_A : Wirkungsgrad des Antriebs
- m_F : Masse des Fahrzeuges
- M_{rot} : rotierende Masse des Antriebes
- α_{St} : Steigungswinkel
- g : Erdbeschleunigung
- a_F : Beschleunigung des Fahrzeuges
- c_G : Getriebewiderstandsbeiwert
- c_W : Luftwiderstandsbeiwert
- ρ_L : Dichte der Luft
- A_S : Stirnfläche des Fahrzeuges

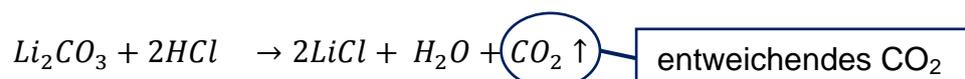
So ist der Ansatz Leichtbau für diese Fahrzeuge ebenso interessant wie die Entwicklung neuer Batteriesysteme. Im Bereich Leichtbau werden bereits seit Jahren Fortschritte verzeichnet. Im Hinblick auf die Vermarktung eines Fahrzeuges ist der Ansatz der Reduzierung von Bauteilen und Komponenten in einem Fahrzeug nicht zielführend, da dieser auch bedeuten würde, dass der Komfort eingeschränkt werden muss. Zusammen mit den üblichen Sicherheitseinrichtungen eines Fahrzeuges entstehen zusätzliche Massen.

Die Umsetzung des Leichtbaus wird hauptsächlich durch hochlegierte, hochfeste Stähle, Aluminiumlegierungen oder faserverstärkte Kunststoffe realisiert. Die Verwendung solcher Werkstoffe bedingt ein hohes Maß an Entwicklung und Berechnung sowie ein anspruchsvolles Qualitätsmanagement. Ebenfalls ist zu beachten, dass der Energieaufwand zur Herstellung sowie zum Ur- und Umformen dieser Werkstoffe höher ist, als bei konventionellen Werkstoffen. Dies schlägt sich in der CO₂-Bilanz und den Kosten des Fahrzeuges nieder. Zwar ist der lokale CO₂-Ausstoß nicht vorhanden aber nur dies zu betrachten ist naiv. Um den CO₂-Ausstoß von Elektrofahrzeugen und Benzinfahrzeugen vergleichen zu können, muss der gesamte Produktlebenszyklus von der Rohstoffgewinnung bis zum Recycling betrachtet werden. So wird zum Beispiel für die Herstellung von Aluminium das Zehnfache der Energiemenge benötigt und somit auch das Zehnfache an CO₂ emittiert [MÜL00]. Durch das Recyceln von Aluminium kann diese Energiebilanz, ohne Einfluss auf die Qualität, auf etwa fünf Prozent verringert werden [INC13]. Die Verwendung von kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffen (Carbon) hat einen weitaus höheren Energieaufwand und somit eine noch höhere CO₂-Emission. Die sehr hohen Temperaturen bei langen Aufwärmzyklen und Haltezeiten [PIE12] sind hier ausschlaggebend. Des Weiteren ist bei der formgebenden Verarbeitung ein hoher Energieaufwand nötig. Durch die sehr guten mechanischen Eigenschaften bei geringer Dichte dieses Werkstoffes ist der Einsatz zur Einsparung der CO₂-Emission am Fahrzeug allerdings sehr interessant.

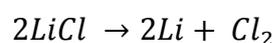
Die CO₂-Neutralität der eingesetzten Akkumulatoren soll im Fahrbetrieb durch regenerative Energiequellen umgesetzt werden. Allerdings sind zur Herstellung der heutigen Batterien seltene Rohstoffe notwendig, die, wie zum Beispiel Lithium, schon direkt bei der Darstellung CO₂ freisetzen und dabei einen hohen Energieaufwand erfordern [TIL12].

Darstellung von elementarem Lithium aus Lithiumcarbonat:

Gleichung 2: Darstellung von Lithiumchlorid aus Lithiumcarbonat



Gleichung 3: Darstellung von elementarem Lithium aus Lithiumchlorid



Die Gewinnung der regenerativen Energiequellen erfolgt durch Maschinen und Anlagen, die selbst häufig wiederum aus Leichtbaumaterialien bestehen, so wird zum Beispiel bei Windkraftanlagen Aluminium für die Masten und Carbon für die Rotorblätter verwendet. Bei der Energiegewinnung durch Solarzellen wird für die Herstellung dieser Silizium benötigt, welches bei der Darstellung wiederum viel Energie (2000 °C) benötigt und Kohlenmonoxid als Reaktionsprodukt emittiert [BEL13].

Dieser Einblick in die Schadstoffbilanz kann noch detaillierter ausgeführt werden und muss selbstverständlich auch in die entgegengesetzte Richtung des Produktlebenszyklus betrachtet werden. Dies wird in dieser Arbeit nicht betrachtet.

Diese Kernprobleme elektrisch betriebener Fahrzeuge können nur durch eine umfassende Betrachtung gelöst werden. Dazu werden neuartige Technologien benötigt und bereits entwickelt. Diese sind ebenfalls ein Antrieb der Elektromobilität. Die neuartigen und verbesserten Technologien werden sich zunehmend etablieren, je mehr Elektrofahrzeuge produziert und gefahren werden. Es müssen neue Batteriesysteme entwickelt und die vorhandenen verbessert werden. Ein deutlich besseres Energiespeicher-Masse-Verhältnis ist anzustreben und unter Berücksichtigung von Nachhaltigkeitsaspekten zu realisieren. Die bereits hohen Wirkungsgrade von Elektromotoren sind weiterhin zu steigern. Die Wirkungsgrade von Antrieben sind ebenfalls zu verbessern. Dies alles in Verbindung mit nachhaltigem, konstruktivem und stofflichem Leichtbau kann der Elektromobilität zum Erfolg verhelfen. Die Studie „Marktpotenziale und CO₂-Bilanz von Elektromobilität“ des Öko-Institut e.V. – Institut für angewandte Ökologie errechnet einen Marktanteil von Elektrofahrzeugen, inklusive Plug-In-Hybrid Fahrzeugen, im Jahr 2030 von 38 % der Neuzulassungen in Deutschland [ÖKO11]. Dies entspricht in etwa einer Million aller neuzugelassenen Fahrzeuge und ist prozentual vergleichbar mit den Zulassungszahlen der USA Anfang des 20. Jahrhunderts.

2.3 E-FAHRZEUG ALS RENNWAGEN

Der Einsatz von elektrischen Antrieben im Motorsport ist in den letzten Jahren gestiegen. Durchaus bekannt ist das KERS System² der Formel 1, welches sich seit Jahren etabliert. Das KERS System generiert beim Bremsvorgang Energie, meist in elektrischer Form und speist diese in einen Speicher, der auf Abruf diese Energie an einen zusätzlichen Antrieb abgeben kann. Somit ist es dem Fahrer möglich während einer Runde die gespeicherte Energie für einen reglementierten Zeitraum und mit einer maximalen Leistung zu nutzen, um zu überholen oder einen Überholversuch abzuwehren. Außerhalb der Formel 1 werden in Langstreckenserien, wie der VLN und der Le Mans Series KERS Systeme eingesetzt. In der Le Mans Series gewinnt 2012 der Audi R18 e-tron quattro als erstes Hybridfahrzeug die 24 Stunden von Le Mans. Toyota ist ebenso in dieser Rennserie mit einem Hybridfahrzeug vertreten und erfolgreich.

Beim Bergrennen Pikes Peak stellt Toyota 2012 mit dem TMG EV P002 Abbildung 15 den Rekord für Elektrofahrzeuge auf. Die Motoren sind bei diesem Fahrzeug mittig an der Hinterachse angeordnet, Abbildung 16. Ein Jahr zuvor stellt dieses Fahrzeug den Rekord für Elektrofahrzeuge auf der Nordschleife ein. Toyota bestreitet gemeinsam mit Mitsubishi und Tajimi diese Klasse.



Abbildung 15: Toyota TMG EV P002
[DOM12]



Abbildung 16: Leistungselektronik und
Motoren des Toyota TMG
EV P002 [DOM12]

² KERS: Kinetic Energy Recovery System, elektrisches oder mechanisches System zur Rückgewinnung von Energie beim Bremsen, das die Energie zur späteren Verfügung speichert, temporärer zusätzlicher Antrieb

Im Bereich des Motorradrennsportes gibt es beim Isle of Man TT Rennen eine Null-Emissions-Klasse, die von verschiedenen Herstellern ausgetragen wird. Diese Motorräder haben einen rein elektrischen Antrieb und der Sieger 2012, Segway Racing MotoCzysz E1pc, erreicht eine durchschnittliche Geschwindigkeit von 167,5 km/h auf der 60,725 km langen Strecke [ISL131]. Das schnellste Motorrad mit Verbrennungsmotor erreicht über sechs Runden, also 364,35 km, eine Durchschnittsgeschwindigkeit von 207,5 km/h [ISL13]. Des Weiteren werden seit 2008 in der FIM eRoad Racing World Cup internationale Rennen mit Elektromotorrädern ausgetragen [FIM13]. Diese Motorräder haben ein Leergewicht von 200 bis 250 kg und sind für Strecken zwischen 20 und 60 km entwickelt. Die Hersteller geben jedoch deutlich größere Reichweiten an, wie zum Beispiel die MÜNCH Racing GmbH. Für das TTE2 wird eine Reichweite von ca. 200 km angegeben sowie eine Höchstgeschwindigkeit von 240 km/h und eine Beschleunigung von 0 auf 100 km/h in 3,9 s [MÜN11].

Im Formelsport wird seit mehreren Jahren an der Formula E gearbeitet und ab 2014 sollen verteilt über die ganze Welt, Rennen auf Stadtkursen ausgetragen werden. Die Fahrzeuge der Formula E basieren auf einem Einheitschassis mit einem Mindestgewicht inklusive Fahrer von 800 kg. Die Leistung ist begrenzt auf 133 kW mit der Option auf 200 kW im „Push-to-Pass“ Modus [FIA13], zum Überholen. So kann ein Formula E Fahrzeug in ca. 3 s auf 100 km/h beschleunigen und Spitzengeschwindigkeiten von ca. 240 km/h erreichen. Der niedrige Geräuschpegel der Fahrzeuge ermöglicht die Austragung der Rennen in Städten. Testfahrten, Qualifikation und Rennen sind an einem Tag, sodass die Stadt in der gefahren wird, nicht zu stark im Verkehr beeinflusst wird. Außerdem sind die Rennen mit mehreren Fahrzeugen pro Fahrer und einem Zwangsfahrzeugwechsel, inklusive 100 m Sprint des Fahrers von Fahrzeug zu Fahrzeug vorgesehen [FIA13].

In der Rennserie Formula Student Electric werden seit 2010 weltweit Rennen gefahren. Es gibt mittlerweile ca. 60 Teams, die sich an dieser Rennserie beteiligen. Die Fahrzeuge sind für eine Renndistanz von 22 km mit einem Pflichtfahrerwechsel nach der Hälfte der Distanz ausgelegt. Die Fahrzeuggewichte liegen je nach Konzept zwischen 150 und 250 kg. Das Regelwerk ist grundlegend an das Formula Student Regelwerk angeglichen, hat aber für die speziellen Anforderungen, die sich aus dem rein elektrischen Antrieb ergeben, umfangreiche Ergänzungen.

2.4 Motivation zur Formula Student Electric

Die Motivation an der Formula Student Electric teilzunehmen ist durch unterschiedlichste Faktoren geprägt. Damit hier ein breites Spektrum an Motivationsgründen abgebildet werden kann, wurde ein Fragebogen erstellt, der von mehreren Teams beantwortet wurde. Den Fragebogen und die Antworten der Teams befinden sich im Anhang B und Anhang C.

Die Motivationsgründe liegen eindeutig im Kennenlernen neuer Technologien. Die Herausforderungen einen völlig neuen Weg zu gehen und die damit einhergehenden Schwierigkeiten zu bewältigen. Die Rennserie Formula Student bietet hierfür genau die richtige Plattform und die angehenden Ingenieure den entsprechenden Willen.

Ein weiterer Grund den Schritt zum elektrisch angetriebenen Fahrzeug zu wagen, ist die mögliche Fahrdynamik dieser Fahrzeuge: Die aktive Beeinflussung bei einem Allradfahrzeug mit vier unabhängigen Motoren, die zudem noch mit einem Energierückgewinnungssystem ausgestattet sind.

Selbstverständlich spielt bei einem Umstieg auch die finanzielle Komponente eine Rolle, denn es ist durch die politische und gesellschaftliche Hervorhebung der Elektromobilität, für Elektrofahrzeuge deutlich einfacher Sponsoren zu gewinnen. Dies kann für das Marketing der Sponsoren interessant sein und somit engagieren sich diese auch vermehrt. Ebenso werden die Sponsoren Teil der Elektromobilität und können ihr Unternehmen mit dem Thema vertraut machen, um zum Beispiel zu einem Zulieferer zu werden.

Die Motivation ein Elektrofahrzeug zu entwickeln, sollte nicht politische oder materielle Hintergründe besitzen, denn diese Motivation verblasst im Laufe der Zeit. Vielmehr muss der Gedanke an das ultimative Fahrzeug den Drang bestärken ein Fahrzeug zu entwickeln, das alle, alles und jeden in den Schatten stellt, ohne Krach und Benzingeruch.

3. Vorgaben der Rennserie

Die Formula Student wird, wie alle offiziellen Rennserien, nach einem eindeutigen Regelwerk veranstaltet. Dieses Regelwerk wird kontinuierlich aktualisiert und weiterentwickelt. Es handelt sich um ein sehr offenes Regelwerk, welches unterschiedlichste Konzepte ermöglicht. Die Fahrzeuge und Rahmenbedingungen der Teams sollen allerdings vergleichbar bleiben. Es sind die Hauptmaße und die Gestalt der Fahrzeuge abgegrenzt. Alle Fahrzeuge, ungeachtet der Antriebsart, müssen einsitzig und zweispurig sein. Die Räder dürfen, wie in Abbildung 17 dargestellt, durch die Außenhaut, Aerodynamik oder andere Bauteile nicht verdeckt sein.

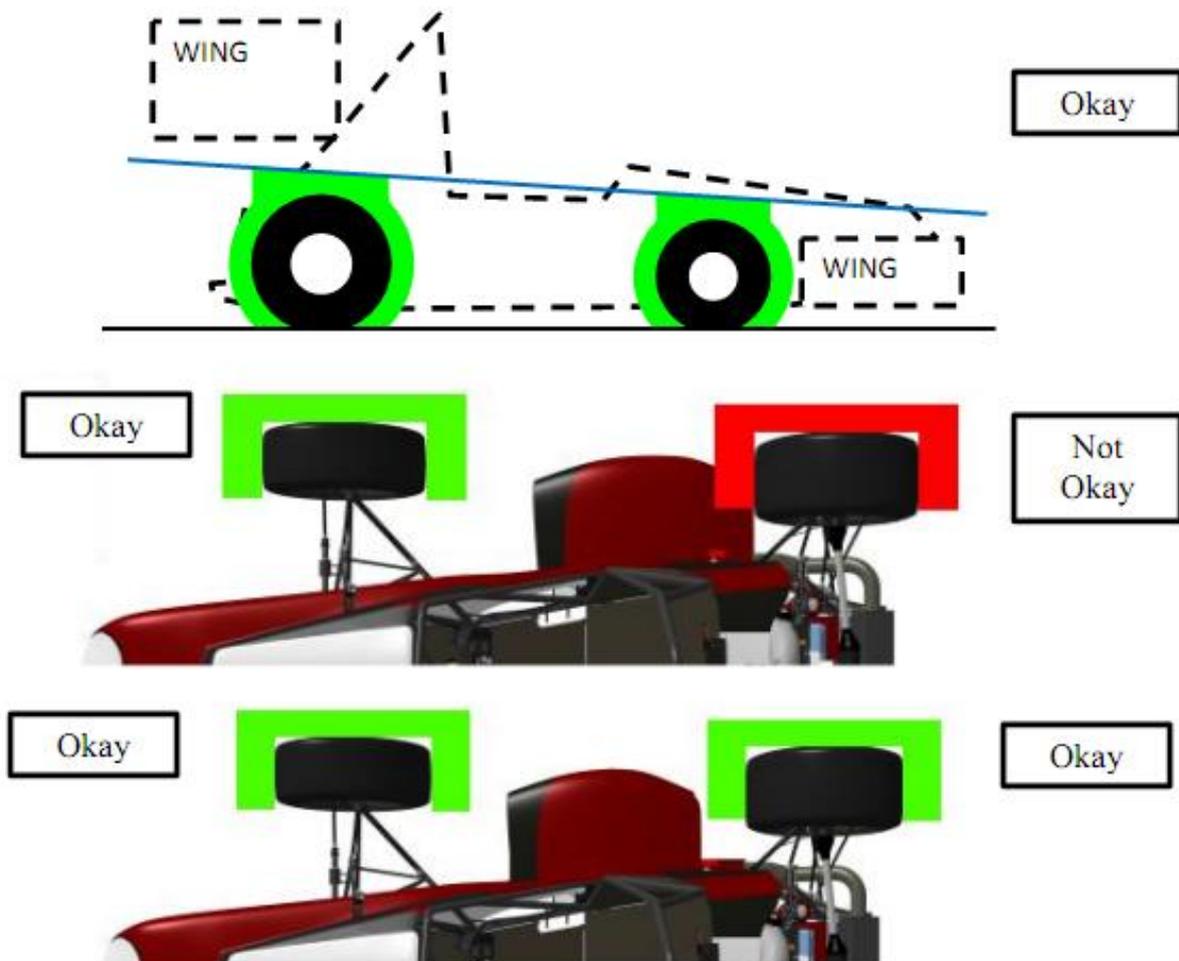


Abbildung 17: Begrenzung der Verdeckung der Räder [SAE13]

Die Fahrzeuge müssen einen Radstand von mindestens 1525 mm besitzen und die Spurbreiten der Achsen dürfen sich lediglich um ein Viertel der breiteren Spur

unterscheiden. Die weiteren Regeln für alle Fahrzeuge dienen der Sicherheit der Fahrer, der Teams und des Publikums. Es sind Front- und Seitenaufprallschutzzonen definiert sowie Überrollbügel. Diverse Fahrzeugkomponenten müssen in bestimmten Positionen des Fahrzeuges verbaut sein, um Beschädigungen bei Unfällen zu verhindern. Des Weiteren sind Schutzmaßnahmen genau vorgegeben, um ein Versagen zu verhindern oder beim Versagen den Schaden zu begrenzen. Diese Bestimmungen sind im Regelwerk im Abschnitt T [SAE13] geregelt und werden strikt kontrolliert.

Ebenfalls werden bei den unterschiedlichen Antriebsarten die Leistungen direkt oder indirekt begrenzt. So wird die Leistung der Fahrzeuge mit Verbrennungsmotoren über die Art des Motors³, den Hubraum⁴, die Kraftstoffart⁵ und einen Ansaugluftbegrenzer⁶ indirekt begrenzt. Bei den elektrisch angetriebenen Fahrzeugen gibt es einen direkt vorgeschriebenen Wert der maximalen Leistung und in welchem Intervall dieser überschritten werden kann, siehe Abschnitt 3.1.

3.1 Reglement Formula Student electric

Das Regelwerk der Formula Student Electric ist ergänzend zu den, für alle Fahrzeuge vorgeschriebenen, in Abschnitt 3 beschriebenen Vorgaben. Federführend bei der Entwicklung dieses Regelwerkes sind die Formula Student gemeinsam mit der Formula Student Germany⁷. Außerdem wurden Elemente der Formula Hybrid mit aufgenommen. Diese speziellen Regeln sind im Regelwerk im Abschnitt EV ab Seite 86 festgehalten. Einige maßgebliche Regeln zur grundsätzlichen Entwicklung eines Formula Student Electric Fahrzeuges werden im Folgenden beschrieben.

Per definitionem ist für die Formula Student Electric eine Spannung $U > 40 \text{ V DC}$ oder $U > 25 \text{ V AC RMS}$ als Hochvoltspannung festgelegt. Alle Spannungen die unter diesen Werten liegen, gelten als Niedrigvoltspannungen. Die maximal benutzbare Spannung ist auf 600 V DC begrenzt. Als Energiespeicher können Batterien oder Superkondensatoren⁸ benutzt werden. Die verwendeten Energiespeicher auf einer

³ Art des Motor: Viertakt-Hubkolbenmotor; vgl. [SAE13] – IC1.1.1 Seite 76

⁴ Hubraum: max. 610 cm^3 ; vgl. [SAE13] – IC1.1.1 Seite 76

⁵ Kraftstoffart: Benzin 93..100 ROZ oder E85; vgl. [SAE13] – IC1.6.3

⁶ Ansaugluftmengenbegrenzer: bei Benzin $\varnothing 20 \text{ mm}$; bei E85 $\varnothing 19 \text{ mm}$; vgl. [SAE13] – IC1.6.3

⁷ Formula Student Germany: Veranstaltung der Formula Student in Deutschland seit 2006

⁸ „Superkondensatoren [...] sind elektrochemische Kondensatoren [...]. Sie besitzen im Gegensatz zu Keramik-, Folien- und Elektrolytkondensatoren kein Dielektrikum im herkömmlichen Sinne. Die

Veranstaltung, wenn zum Beispiel ein Wechselakkumulator verwendet wird, müssen die gleichen Abmaße, Bestandteile, Sicherheitsbestimmungen und Gewichte aufweisen. Der Antrieb ist ausschließlich mit Elektromotoren zu realisieren, es können alle Arten und eine frei wählbare Anzahl von Elektromotoren verwendet werden. Die maximale Leistung ist auf 85 kW beschränkt und wird durch ein Energiemanagementsystem protokolliert. Dieses Energiemanagementsystem zeichnet während des Betriebes die abgerufene Energie auf und wird nach jeder Fahrt überprüft. Als Grenzwerte für die Überschreitung der maximalen Leistung sind 100 ms konstant oder 500 ms im Mittel zugelassen. Werden diese Werte überschritten wird das Team für die jeweilige Disziplin disqualifiziert. Wird zum Beispiel bei einem einzelnen Accelerationlauf eine Überschreitung der maximalen Leistung festgestellt, wird das Team für die komplette Disziplin disqualifiziert.

Batterie, Motor und die Verbindung dieser ist als „tractive Sytem“ - Antriebsstrang deklariert. Im Folgenden wird das „tractive system“ mit TS abgekürzt. Das TS muss im Fahrzeug so verbaut sein, dass es vollständig isoliert ist. Zudem ist das TS in der primären Rahmenstruktur zu positionieren. Ist dies nicht möglich, muss eine umgebende, zur primären Rahmenstruktur äquivalente Struktur entwickelt werden, damit bei möglichen Unfällen oder Überschlägen das TS geschützt ist. Der Fahrer ist durch eine isolierende oder kratzfest isolierend beschichtete Abschirmung vom TS zu trennen. Diese Abschirmung ist zudem auch als Schutz vor Feuer oder umherfliegenden Teilen bei einem Antriebsschaden vorgesehen und muss dementsprechend dimensioniert sein. Sind außerhalb der Rahmenstruktur Motoren verbaut, zum Beispiel als Radnabenmotoren, ist ein Schutzschalter pro Motor vorgeschrieben, der im Falle eines Versagens des Fahrwerkes das TS abschaltet.

Es ist darauf zu achten, dass auch das Niedrigvoltsystem vollständig vom TS abgeschirmt ist. Hierzu müssen Isolatoren zwischen den Systemen verwendet werden. Auf Platinen, die mit beiden Systemen arbeiten sind definierte Abstände der beiden Systeme zueinander einzuhalten und der jeweilige Kreislauf deutlich zu markieren. Das Niedrigvoltsystem muss geerdet sein.

Kapazitätswerte dieser Kondensatoren ergeben sich aus der Summe zweier hochkapazitiver Speicherprinzipien:

- aus der statischen Speicherung elektrischer Energie durch Ladungstrennung [...]
- aus der elektrochemischen Speicherung elektrischer Energie [...]“ [WIK13]

Weiterhin werden im Regelwerk zusätzliche und substituierende Sicherheitsmaßnahmen angegeben. Die Betätigung der Steuerung der Elektromotoren muss durch ein Fußhebelwerk erfolgen, hierzu sind mindestens zwei Sensoren am Hebelwerk notwendig die unabhängig voneinander den Pedalweg aufnehmen. Ergibt sich eine Abweichung der beiden Sensoren von $> 10\%$, so muss der Stromkreis des TS unterbrochen werden, sodass das Fahrzeug keinen Vortrieb mehr erzeugen kann. Das Bremspedal verfügt ebenfalls über einen solchen Sensor, der ein gleichzeitiges Bremsen und Antreiben verhindern soll. Außerdem ist ein Schalter verbaut, der das TS sofort abschaltet, sollte ein Schaden am Bremssystem erfolgen und das Bremspedal weiter als normal durchgetreten werden. Dieser Schalter ist äquivalent in Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor verbaut.

Als eindeutige Indikatoren, dass das Fahrzeug fahrbereit und das Hochvoltsystem eingeschaltet ist, sind eine rot blinkende Warnleuchte, die deutlich aus allen Positionen sichtbar sein muss und am hinteren Überrollbügel anzubringen ist sowie ein mindestens 70 dBA lautes Einschaltgeräusch, das die Fahrbereitschaft signalisiert.

Das Fahrzeug benötigt zwei unabhängige Hauptschalter, einen für das Niedrigvoltsystem und einen für das Hochvoltsystem. Der Hauptschalter für das Hochvoltsystem ist im ausgeschalteten Zustand abschließbar auszuführen. Zum Ausschalten des Fahrzeuges sind drei Schalter vorgesehen, einer im Cockpit des Fahrers und jeweils einer an jeder Seite des hinteren Überrollbügels. Diese Schalter sind gut zugänglich anzubringen, sodass im Falle eines Unfalles das Fahrzeug von außen abzuschalten ist. Die Hauptschalter und Schalter zum Ausschalten müssen fest mit dem Fahrzeug verbunden sein und dürfen zum Beispiel nicht an der Außenhaut montiert sein.

Für den Fall, dass das Fahrzeug einen Unfall hat, muss durch einen Beschleunigungssensor das TS ausgeschaltet werden. Die hierfür zugrunde gelegte Beschleunigung im Falle eines Aufpralls ist zwischen 6 und 11 g. Dieser Beschleunigungssensor ist im Fahrzeug so zu verbauen, dass dieser während der technischen Abnahme ausgebaut und durch Schütteln überprüft werden kann.

Da die Fahrzeuge der Formula Student Electric mit sehr hohen Spannungen betrieben werden, ist ein Schutzschaltungssystem vorgesehen, das das komplette Fahrzeug einschließt. Sobald dieses System einen Fehler in der Isolierung des TS

feststellt oder einen Fehler im eigenen System, wird das TS ausgeschaltet. Die gesamte Außenfläche des Fahrzeuges ist mit diesem System zu verbinden, sodass ein Stromschlag auf Personen, die das Fahrzeug anfassen nicht zustande kommen kann. Des Weiteren müssen alle Oberflächen die elektrisch leitend sein könnten geerdet sein und einen elektrischen Widerstand von 5Ω unterschreiten. Hierbei ist es besonders wichtig die Fahrzeugbauteile, die aus kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffen gefertigt sind mit Hilfsstoffen zu versehen, die die elektrische Leitfähigkeit erhöhen oder durch andere Werkstoffe zu ersetzen. Für die Exterieurbauteile kann zum Beispiel ein feines Kupfernetz mit in das Bauteil einlaminiert werden.

Der Energiespeicher des Fahrzeuges ist als separates System zu betrachten, das besonderen Schutz erfordert. Der Energiespeicher ist in einzelne Bausteine unterteilt, die bei LiFePO₄ Zellen eine Spannung von 120 V DC oder eine Energie von 12 MJ nicht überschreiten dürfen. Alle anderen Zellen dürfen eine Spannung von 120 V DC oder eine Energie von 6 MJ nicht überschreiten.

Diese einzelnen Bausteine sind in Gehäusen zu verbauen. Die Verbindung der einzelnen Bausteine darf nicht gelötet werden, sondern muss durch entsprechend isolierte Steckverbindungen realisiert werden. Außerdem sind die Bausteine voneinander durch isolierende Schichten zu trennen und fest im Gehäuse einzubauen. Die Gehäuse müssen ebenfalls isoliert sein und fest mit der Rahmenstruktur des Fahrzeuges verbunden werden. Die Verbindungen von Zellenbausteinen zum Gehäuse und vom Gehäuse zum Rahmen müssen Quer- und Längsbeschleunigungen von 20 g sowie Vertikalbeschleunigungen von 10 g standhalten. Die Gehäuse dürfen keine Löcher aufweisen und benötigen ein Entlüftungsventil. Bei Batteriezellen, die ein explosives Gas erzeugen können, muss eine aktive, angemessene Ventilation vorgesehen sein.

An jedem Gehäuse muss ein Batteriemanagementsystem verbaut sein, das die Spannungen der einzelnen Zellen überwacht und beim Laden der Zellen reguliert. Weiterhin muss die Temperatur der Zellen überwacht werden. Weichen die Temperaturen oder Spannungen der Zellen von den vom Hersteller empfohlenen Werten ab, muss dieses System das TS sofort ausschalten und im Cockpit muss eine eindeutig gekennzeichnete rote LED aufleuchten. Das Batteriemanagementsystem muss zudem die anliegende Spannung des

Energiespeichers immer ersichtlich machen, auch wenn der Energiespeicher außerhalb des Fahrzeuges, zum Beispiel zum Aufladen ist.

3.2 Fahrdisziplinen und daraus resultierende Eigenschaft des Fahrzeuges

Die Formula Student Electric ist, wie die Formula Student, eine Rennserie in der Studenten ein Formelfahrzeug entwickeln, fertigen und bei Rennveranstaltungen einsetzen. Hierbei sind nicht nur die Fahrdisziplinen ausschlaggebend für den Erfolg, sondern ebenso die Präsentation und Vermarktung des Fahrzeuges.

Während einer Rennveranstaltung werden mehrere unterschiedliche Fahrdisziplinen ausgetragen. Es gibt vier Fahrdisziplinen, die jeweils von zwei Fahrern gefahren werden sollten. Die Disziplinen sind Acceleration, Skid Pad, Auto Cross und Endurance. Bei diesen Disziplinen können zusammen maximal 575 Punkte von insgesamt 1000 Punkten pro Event erreicht werden. Außerdem zählt zu den dynamischen Disziplinen auch die Efficiency mit maximal 100 Punkten. Die dynamischen Disziplinen müssen von mindestens vier Fahrern absolviert werden, wobei jeder Fahrer nur an drei unterschiedlichen Disziplinen teilnehmen darf. Die Efficiency zählt auch als eine Disziplin. Somit ergibt sich, dass die Fahrer des Endurance gleichzeitig auch die Efficiency bestreiten und nur noch eine weitere Disziplin fahren dürfen. Die Strecken der unterschiedlichen Disziplinen sind jeweils mit Leitkegeln begrenzt. Werden diese Leitkegel während der Disziplin durch Berührung des Fahrzeuges umgestoßen oder versetzt wird eine Strafzeit zur jeweils gefahrenen Zeit addiert.

Das Beschleunigungsrennen, Acceleration, hat eine erreichbare Maximalpunktzahl von 75 Punkten. Hierbei muss eine 75 m lange, gerade Strecke mit stehendem Start so schnell wie möglich absolviert werden. Es dürfen zwei Fahrer mit je zwei Versuchen an den Start gehen. Der schnellste Versuch wird gewertet. Die Strecke ist 4,9 m breit und das Fahrzeug muss mit dem vordersten Punkt 0,3 m hinter der Startlinie starten. Die Manipulation der Reifen zur erhöhten Griffigkeit ist ebenso wie

Burnouts⁹ nicht erlaubt. Die Strecke ist mit Leitkegeln im Abstand von ca. 4 m abgesteckt. Umgefahrene Leitkegel werden mit 2 s Strafzeit pro Leitkegel geahndet.

Der „Skid Pad“ ist eine kurze Strecke, in der zwei nebeneinanderliegende Kreise jeweils zweimal durchfahren werden müssen. Zuerst wird der, von der Einfahrt rechtsliegende Kreis und anschließend der linksliegende Kreis durchfahren. Pro umgefahrenen Leitkegel werden 0,25 s zur Zeit des Versuches addiert.

Wie aus Abbildung 18 abzuleiten ist, ergibt sich eine Streckenlänge mit Ein- und Ausfahrt von ca. 250 m. Das Regelwerk sieht vor, dass zwei Fahrer diese Disziplin fahren, jeder Fahrer hat zwei Versuche. Der beste Versuch beider Fahrer wird in die Wertung gerechnet und kann mit maximal 75 Punkten bewertet werden.

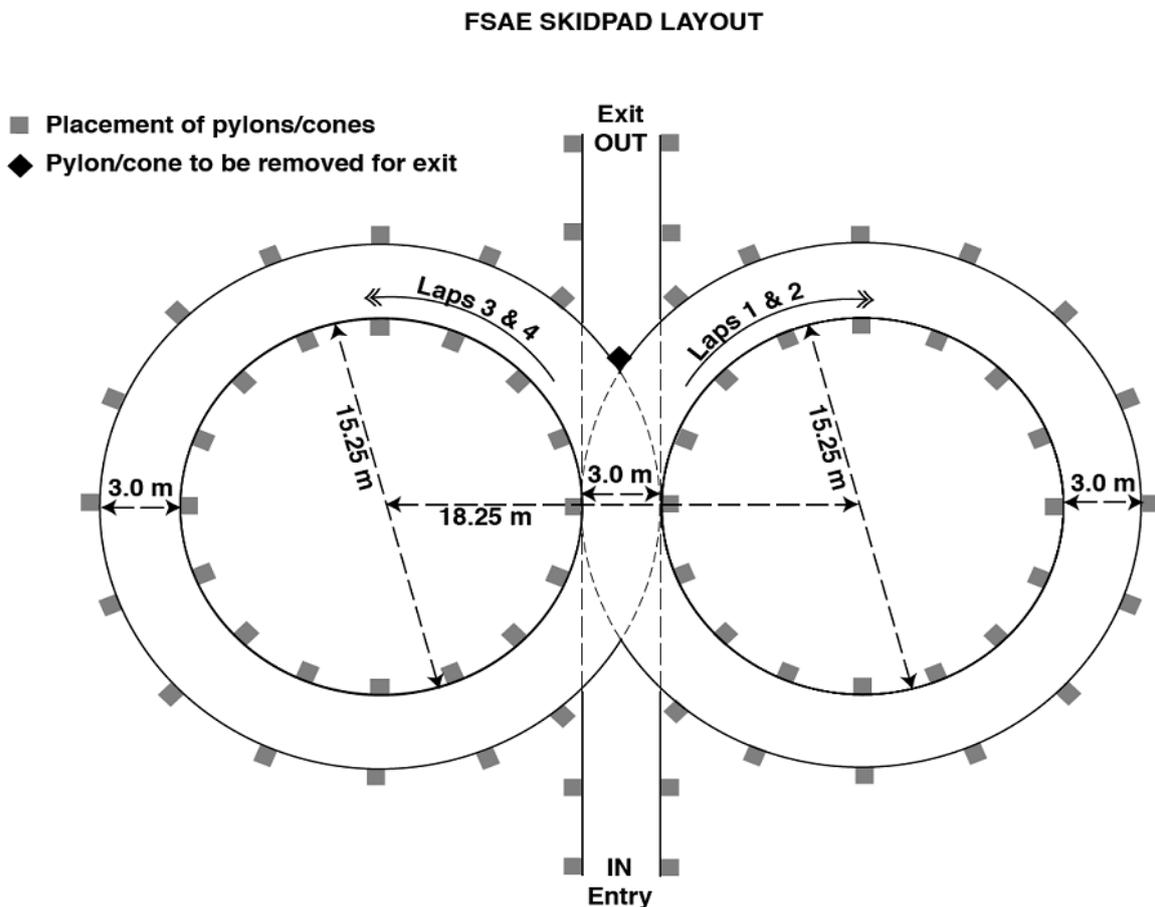


Abbildung 18: FSAE Skip Pad [SAE13]

Der Auto Cross ist ein Rundkurs der ähnlich dem Endurancekurs ist. Diese Disziplin dient zur Ermittlung der Startreihenfolge im Endurance und es sind maximal

⁹ Burnout: Im Motorsport umgangssprachlich für das Durchdrehen der angetriebenen Achse beim Stillstand des Fahrzeuges zur Erhitzung von Reifen und die daraus resultierende Steigerung der Griffigkeit von Reifen.

100 Punkte zu erzielen. So kann sichergestellt werden, dass immer in etwa gleich schnelle Fahrzeuge im Endurance auf der Strecke sind und sich nicht gegenseitig behindern. Wie bei den vorher genannten Disziplinen haben auch hier wieder zwei Fahrer die Möglichkeit in je zwei Versuchen die schnellste Zeit herauszufahren. Die Strecke soll etwa eine halbe Meile, also ca. 800 m betragen und ist mit Streckenmarkierungen und Leitkegeln begrenzt, Abbildung 19.



Abbildung 19: beispielhafte Streckenführung und markierungen der Strecke

Die Streckenführung soll eine Durchschnittsgeschwindigkeit zwischen 40 und 48 km/h zulassen, mit maximal 60 m langen Geraden, vielen unterschiedlichen Kurven und Slaloms, vgl. [SAE13] - D7.2.1, Abbildung 19. Die Fahrzeuge starten 6 m vor der Zeiterfassung. Das Umfahren von Leitkegeln wird mit 2 s Strafzeit geahndet, das Auslassen von Slaloms wird als Verlassen der Strecke gewertet. Das Verlassen der Strecke mit mehr als zwei Rädern wird, wenn das Fahrzeug nicht wieder am selben oder an einem vorherigen Punkt die Strecke befährt mit einer Strafzeit von 20 s geahndet. Der bereinigte, schnellste Versuch wird gewertet. Die daraus resultierende Startaufstellung kann in normaler oder umgekehrter Reihenfolge für den Endurance genommen werden, dies obliegt dem Veranstalter.

Der Endurance ist das abschließende Ereignis der Rennveranstaltung. Zusammen mit der Efficiency ergibt sich eine Maximalpunktzahl von 425 Punkten, womit diese Disziplin die punktreichste der Veranstaltung ist. Der Endurance ist ein ca. 1 km

langer Rundkurs, der so oft umfahren werden muss, bis etwa 22 km absolviert sind. Es gibt einen Pflichtfahrerwechsel zur Mitte der Distanz. Hierbei muss das elektrische System vom Energiespeicher durch die beiden Hauptschalter getrennt werden. Nach dem maximal 3 min dauernden Fahrerwechsel muss das Fahrzeug selbstständig wieder starten und fahrbereit sein. Ist dies nicht innerhalb der 3 min möglich wird die zusätzlich benötigte Zeit auf die Fahrzeit addiert. Die maximale Standzeit des Fahrzeugs beträgt 5 min, danach wird das Fahrzeug als beschädigt betrachtet und kann somit den Endurance nicht zu Ende fahren. Während des Fahrerwechsels sind keine Reparaturen und Einstellungen am Fahrzeug oder ein Aufladen des Energiespeichers möglich, lediglich Anpassungen des Fahrzeuges an den jeweiligen Fahrer sind erlaubt. Die Streckenführung ist sehr ähnlich der des Auto Cross, allerdings soll sie so sein, dass die durchschnittlichen Geschwindigkeiten etwa 8 bis 10 km/h höher sind, vgl. [SAE13] - D8.6.2. Umgefahrene Leitkegel, ausgelassene Slaloms und ein Verlassen der Strecke werden mit den gleichen Strafzeiten geahndet, wie beim Auto Cross. Während des Rennens soll es keine Rad an Rad Rennen zwischen den unterschiedlichen Teams geben, sodass diverse Überholzonen eingerichtet sind. Langsamere Fahrzeuge werden mit der blauen Flagge darauf hingewiesen, in diese Überholzonen zu fahren und dort zu warten, bis das schnellere Fahrzeug sie passiert hat. Danach wird das wartende Fahrzeug durch eine grüne Flagge wieder auf die Strecke gelassen. Ein Missachten von Flaggen wird mit einer Strafzeit von 1 min geahndet. Bei Berührung von zwei Fahrzeugen erfolgt eine Strafzeit von 2 min.

Zur Bestimmung der Efficiency muss jedes Fahrzeug ein Energy Meter besitzen, ein Energiemanagementsystem, dass die benötigte Energiemenge protokolliert. Die Datenaufzeichnung wird vor Beginn des Endurance auf Null gesetzt und nach dem Rennen im Parc Fermé ausgelesen. Der aufgezeichnete Verbrauch an Energie wird in theoretisch emittiertes CO₂ umgerechnet, eine kWh entspricht laut dem Regelwerk 0,65 kg CO₂. In Verbindung mit der gefahrenen Strecke und den Rundenzeiten ergeben sich die Punkte für diese Wertung. Fahrzeuge die langsamer als 145 % der schnellsten Runde während des Endurance sind, werden mit null Punkten gewertet. Fahrzeuge die umgerechnet mehr als 60,06 kg CO₂ / 100 km emittiert haben, werden ebenfalls mit null Punkten gewertet. Die durch Energierückgewinnung eingespeiste Energie wird mit einem Faktor von 0,9 von der verbrauchten Energie abgezogen.

3.3 notwendige Eigenschaften des Fahrzeuges

Die aus den unterschiedlichen Disziplinen entstehenden Eigenschaften des Fahrzeuges sind sehr umfangreich. Es kann kein direktes Einsatzfeld beschrieben werden. So ist für die Planung des elektrischen Antriebes der Unterschied zwischen dem Acceleration mit 75 m Länge und dem Endurance mit 22 km sehr groß. Es muss also ein Kompromiss aus minimalem Gewicht und maximaler Reichweite gefunden werden. Für den Acceleration wird ein leichtes, schnell zu beschleunigendes Fahrzeug benötigt, das mit einer Batterieladung die vier Läufe sowie die Hin- und Rückwege bewältigen kann. Dies bedeutet, dass die Batterie minimal klein ist. Für den Skid Pad ist ebenfalls eine kleine Batterie von Vorteil. Die Distanz beim Auto Cross ist ebenfalls mit einer relativ kleinen Batterie zu absolvieren, doch die Distanz des Endurance von 22 km benötigt eine größere Batterie mit deutlich größerem Energiespeichervermögen. Da die Disziplinen Acceleration und Skid Pad meist an einem Tag stattfinden und von Veranstaltung zu Veranstaltung am selben Tag auch noch der Auto Cross abgehalten wird, wird die mögliche minimale Größe der Batterie wieder etwas aufgehoben. Werden diese drei Disziplinen mit jeweils vorherigen Test- und Einstellungsfahrten berücksichtigt, kann eine geschätzte Distanz von 10 km angenommen werden. Diese setzt sich nach Tabelle 1 zusammen.

Tabelle 1: Distanzen bei Disziplinen

Fahrer/Versuch	Acc.	Rück.	SP	Rück.	Auto X	Rück.	Testen
1/1	75	100	250	50	1000	50	1000
1/2	75	100	250	50	1000	50	1000
2/1	75	100	250	50	1000	50	1000
2/2	75	-	250	-	1000	-	1000
Σ	300	300	1000	150	4000	150	4000
Gesamtsumme in m					9900		

Hierbei sind die jeweiligen Rückfahrten zur Startlinie, in der Tabelle mit „Rück.“ gelistet. Die Testfahrten sind als Einstellungsfahrten für die jeweiligen Fahrer und die jeweiligen Versuche vorgesehen, ebenso für die Einstellungen zum Endurance. Durch die zeitliche Beschränkung der einzelnen Disziplinen und die teilweise

zeitgleiche Austragung der Disziplinen ist ein zwischenzeitliches Laden der Batterie schwierig, da dies auch nur in bestimmten Bereichen des Veranstaltungsgeländes möglich ist. Ein Tausch von Batterien ist zwar möglich, allerdings vom Regelwerk untersagt, siehe Abschnitt 3.1.

Die Distanz dieser drei Disziplinen beläuft sich auf etwa 50 % der Distanz des Endurance. Somit ist es, unter Berücksichtigung der Kosten sinnvoll eine Batterie zu verwenden, die zwar für drei Disziplinen, auch für drei Disziplinen in Summe, zu groß ist, aber die Distanz des Endurance bewältigen kann. Der Endurance zusammen mit der Efficiency hat die meisten erreichbaren Punkte, selbst wenn man die Disziplinen Acceleration, Skid Pad und Auto Cross zusammen zählt. So kann eine etwas schlechtere Leistung im Acceleration, Skid Pad und Auto Cross mit guten Leistungen im Endurance und Efficiency kompensiert werden.

4. Analyse der Mitbewerber

Die Formula Student Electric hat seit ihrem Beginn 2010 eine stetig steigende Anzahl an Teams. Der Erfolg der Teams ist jedoch unterschiedlich, vergleichbar mit der Entwicklung bei der Formula Student. Weltweit sind etwa 60 Teams gelistet, die sich auf elektrisch angetriebene Fahrzeuge in dieser Rennserie spezialisiert haben.

Um ein Fahrzeug in dieser Klasse entwickeln zu können, muss eine eingehende Analyse der Mitbewerber erfolgen. Dazu ist es wichtig zu erfassen in welches Mitbewerberfeld sich der HAWKS Racing e.V. eingliedern möchte. Die Entwicklung des Teams ist seit der Gründung stetig verbessert worden und das Team bewegt sich seit 2007 unter den besten 15 % der Weltrangliste [MAZ13].

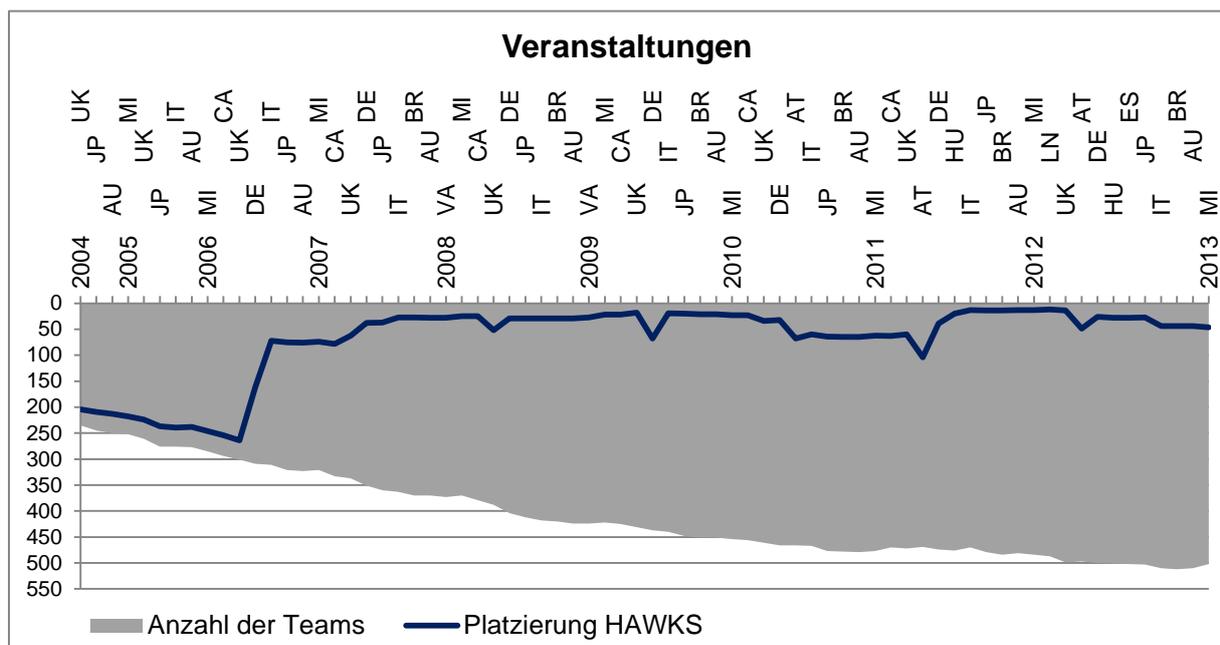


Abbildung 20 Anzahl der Teams Weltweit und Platzierungen HAWKS Racing e.V.

Die Abbildung 20 zeigt den Anstieg der teilnehmenden Teams und im Vergleich die Verbesserung der Platzierung in der Weltrangliste. Es wird deutlich, dass sich der HAWKS Racing e.V. im vorderen Feld der Weltrangliste bewegt und dies selbstverständlich auch so beibehalten möchte. Die Weltrangliste der elektrisch angetriebenen Fahrzeuge listet deutlich weniger Teams. Trotzdem sollte sich der Anspruch unter den besten 15 % zu sein nicht verringern. Es werden beispielhaft vier

Teams der ersten 15 % der Weltrangliste betrachtet. Die betrachteten Teams sind so gewählt, dass auch eine Entwicklung über mehrere Fahrzeuge auszuwerten ist.

Tabelle 5 im Anhang C zeigt die Teams die für den Vergleich herangezogen werden.

Der Vergleich erfolgt ab dem Zeitpunkt der ersten Veranstaltung in Hockenheim. Es werden also Daten seit 2010 erhoben. Die Daten sind von der jeweiligen Homepage des Teams entnommen und, soweit es angegeben ist, vergleichbar, da nicht jedes Team die gleichen Daten veröffentlicht. Die vergleichbaren Daten sind die Anzahl der entwickelten elektrisch angetriebenen Fahrzeuge, die Wahl des Akku-Systems, die Kapazität des Akkus, die Spannung des Akkus sowie die Konfiguration, das Motorkonzept, das Drehmoment in Nm, die Leistung in kW, das Fahrzeuggewicht und ein daraus errechnetes Leistungsgewicht. Zudem wird das jeweilige Konzept der Fahrzeuge analysiert.

4.1 Konzepte

In der Formula Student haben sich zwei Fahrzeugkonzepte durchgesetzt. Diese Konzepte unterscheiden sich hauptsächlich in den Abmaßen der Fahrzeuge. Es gibt aufgrund der verfügbaren Reifen, ein Konzept mit 10 Zoll Felgen und eins mit 13 Zoll Felgen. Dadurch unterscheiden sich die Fahrzeuge meist auch im Radstand. Die Fahrzeuge mit 10 Zoll Felgen haben in der Regel einen kurzen Radstand, die mit 13 Zoll Felgen einen größeren Radstand.

Das Package¹⁰ unterscheidet sich maßgeblich in der Anordnung des Energiespeichers. Es gibt Fahrzeuge, die einen zentral hinter dem Fahrer angeordneten Energiespeicher aufweisen und Fahrzeuge, die einen geteilten beidseitig neben dem Fahrer angeordneten Energiespeicher besitzen. Es kann auch sinnvoll sein eine Mischform dieser beiden Varianten zu entwickeln. Des Weiteren ist die Art des Antriebes maßgeblich für das Konzept. Die unterschiedlichen Fahrzeugkonzepte unterscheiden sich in der Wahl zwischen einem Elektromotor, zwei Elektromotoren oder vier Elektromotoren, wobei bei vier Elektromotoren beide Achsen angetrieben werden. Dementsprechend unterscheiden sich auch die spezifischen Anforderungen an die Elektromotoren.

¹⁰ Package: beschreibt die Positionierung der einzelnen Fahrzeugkomponenten im Fahrzeug

So sind zum Beispiel die Fahrzeuge der Technischen Universität Delft vom Grundprinzip gleich. Sie sind alle mit 10 Zoll Felgen ausgestattet, unterscheiden sich allerdings in der Wahl der Anzahl der Motoren und der Anordnung des Energiespeichers. Das erste Fahrzeug wird durch zwei zentrale Motoren an der Hinterachse angetrieben und besitzt einen dreigeteilten Energiespeicher. Das zweite Fahrzeug wird durch vier Motoren an den Radnaben angetrieben und hat einen zweigeteilten Energiespeicher. Das dritte Fahrzeug ähnelt, mit dem Allradantrieb und den zwei seitlichen Energiespeichern vom Aufbau sehr dem zweiten, ist jedoch auf die aerodynamischen Hilfsmittel hin konzipiert. Auch die anderen betrachteten Teams haben solche Entwicklungen durchlaufen. Es ist zu beobachten, dass in der Saison 2013 alle Fahrzeuge mit Allradantrieb fahren und auf aerodynamische Hilfsmittel setzen.

Mit der Verwendung eines rein elektrischen Antriebes sind viele unterschiedliche Packagekonzepte möglich. Diese Konzepte werden im Abschnitt 5 näher erläutert und bewertet.

4.2 Motoren

Bei der Wahl der Motoren ist die Wahl des jeweiligen Konzeptes entscheidend. Wird das Fahrzeug durch einen, zwei oder vier Motoren angetrieben? Dementsprechend kann die maximale Leistung von 85 kW auf die Motoren verteilt werden.

Bei nur einem verbauten Motor kann es sinnvoll sein, die maximale Leistung nicht vollständig auszunutzen, um Bauraum und Masse einzusparen. Dies hat das KA-RaceIng Team aus Karlsruhe bei seinem ersten Elektrofahrzeug gezeigt. Das KA-RaceIng Team hat einen 55 kW Motor verbaut und so den Verbrennungsmotor substituiert. Die Leistungsdaten von Fahrzeugen mit Verbrennungsmotoren in der Formula Student liegen etwa zwischen 50 kW und 75 kW. Das Fahrzeug mit Verbrennungsmotor des KA-RaceIng Teams hat ebenfalls eine Leistung 55 kW, jedoch besitzt der Elektromotor das 1,8-fache Drehmoment. Das KA-RaceIng Team entwickelt seine elektrisch angetriebenen Fahrzeuge mit permanenten Synchronmaschinen. Die dritte Generation des Fahrzeuges weist bereits zwei Motoren an der Hinterachse auf. In der vierten Generation wurden vier Motoren verbaut. Diese sind allerdings nicht in den Radnaben verbaut, sondern vorne und

hinten seitlich am Fahrzeug, siehe Abbildung 21. Die Kraftübertragung erfolgt mittels Antriebswellen.

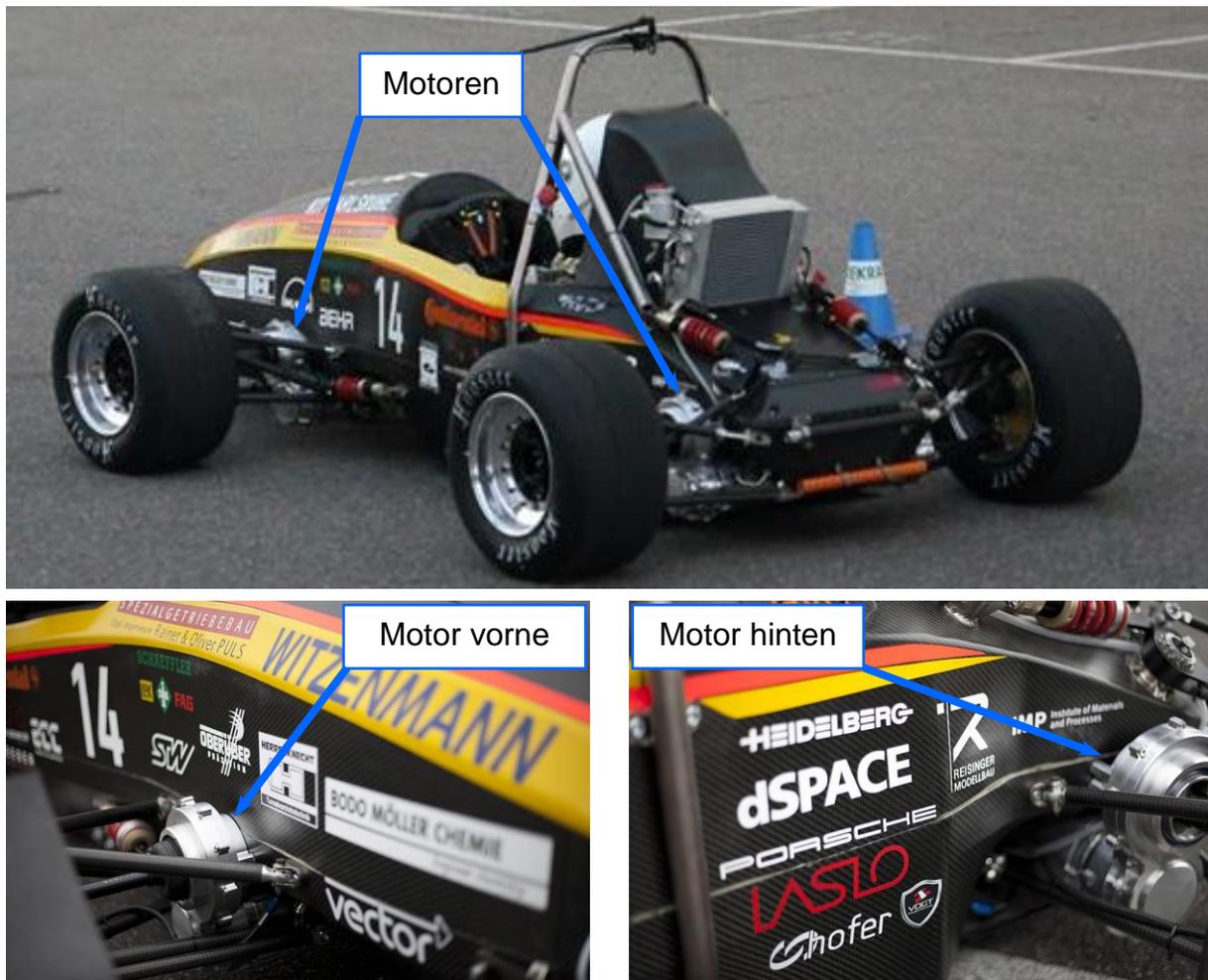


Abbildung 21: Elektrofahrzeug des KA-Racing Teams [KAR13]

Das Team der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich, AMZ Racing verwendet bei seinen ersten drei Fahrzeugen zwei Motoren an der Hinterachse, das vierte Fahrzeug verfügt über einen Allradantrieb. Das erste Fahrzeug wurde mit zwei AGNI 95R DC-Motoren mittig an der Hinterachse angetrieben. Diese Motoren erzeugen bei einer Versorgungsspannung von 84 V eine Spitzenleistung von 30 kW. Bei der Betriebsleistung von 18 kW wird ein Drehmoment von 91 Nm erzeugt [AGN13].

Das zweite Fahrzeug von AMZ Racing ist mit selbstentwickelten AMZ AC-Motoren ausgestattet. Allerdings hat das Team die Leistung der Motoren auf 2 x 35 kW gesteigert. Die Energie für den Antrieb wird in einer U-förmigen Akku-Box gespeichert. Das dritte Fahrzeug ist mit bürstenlosen Permanentmagnetmotoren ausgestattet, die jeweils eine Leistung von 40 kW aufweisen. Betrieben werden diese

Motoren mit einer Versorgungsspannung von 150 V, die wie beim Vorgänger in einer U-förmigen Akku-Box gespeichert wird. Das vierte Fahrzeug wird mit vier Permanentmagnetsynchronmotoren angetrieben. Hierbei weisen alle Motoren eine maximale Leistung von jeweils 35 kW auf und werden mit 480 V gespeist. Die Akku-Box ist bei diesem Fahrzeug mittig hinter dem Fahrer angeordnet.

Die Teams Greenteam Stuttgart, von der Universität Stuttgart sowie DUT Racing, von der Technischen Universität Delft verwenden für ihre Fahrzeuge ausschließlich Elektromotoren der Firma AMK Arnold Müller GmbH & Co. KG. Diese Firma produziert seit vier Jahrzehnten Elektromotoren und ist weltweit in diesem Marktsegment vertreten.

Das Greenteam Stuttgart nutzt beim ersten Fahrzeug zwei mittig positionierte Elektromotoren, die einzeln die Hinterräder antreiben. Die maximale Versorgungsspannung beträgt 597 V und damit wird eine Leistung von insgesamt 94 kW erreicht. Die zweite Generation ist mit zwei noch leistungstärkeren Motoren an der Hinterachse ausgestattet. In diesem Fahrzeug werden mit 588 V insgesamt 100 kW Leistung erzielt. Die Leistung ist im dritten Fahrzeug auf insgesamt 112 kW, bei einer Versorgungsspannung von 600 V, gestiegen. Das vierte Fahrzeug des Greenteam Stuttgart ist erstmals mit einem Allradantrieb ausgestattet. An der Vorderachse sind zwei Radnabenmotoren mit je 20 kW und an der Hinterachse zwei mittig angeordnete 26 kW Motoren. Die Motoren werden mit 600 V betrieben.

Das DUT Racing Team der TU Delft hat sein erstes Fahrzeug mit zwei mittig an der Hinterachse positionierten 28 kW Motoren ausgestattet, die mit 355 V betrieben werden. Im zweiten Fahrzeug sind vier gleiche Radnabenmotoren mit jeweils 24 kW verbaut. Die Spannung des Akkumulators beträgt 600 V. Das dritte Fahrzeug des Teams aus Delft ist mit vier 27 kW Radnabenmotoren ausgestattet, die mit einem 600 V Akkumulator betrieben werden. Die höhere Leistung dieses Konzeptes ist durch die Aerodynamik bedingt.

Es zeigt sich, dass diese vier beispielhaften Teams sehr unterschiedliche Motorenkonzepte, auch in der Entwicklung der Fahrzeuggenerationen verfolgen. Da diese Teams alle an der Spitze der Formula Student Electric sind, ist kein herausragendes Motorenkonzept zu erkennen. Welches Konzept zu verfolgen ist, hängt somit von den Möglichkeiten des Teams ab. Es ist so zu wählen, dass das Gesamtpackage als Einheit funktioniert.

4.3 Akkus

Wie bei der Auswahl der Motoren ist auch die Wahl des Energiespeichers mit dem jeweiligem Konzept zu vereinbaren. Bei den betrachteten Teams werden nur Akkumulatoren und keine Superkondensatoren verwendet. Die Akkumulatoren unterscheiden sich, nach den offiziellen Angaben, bei den Teams Greenteam Stuttgart, DUT Racing Delft und AMZ Racing Zürich nicht. Diese drei Teams verwenden Lithium-Polymer-Akkumulatoren. Das Team KA-Racing aus Karlsruhe verwendet Lithium-Eisenphosphat-Akkumulatoren.

Die verwendeten Akkumulatoren unterscheiden sich von Team zu Team in der Spannung. So ist das 2010er Fahrzeug von AMZ Racing mit 126 V betrieben, die Teams aus Delft und Stuttgart haben Fahrzeuge mit 600 V Spannung. Dazwischen sind diverse Abstufungen vorhanden. Außer beim Greenteam Stuttgart ist keine Tendenz zu einer einheitlichen Spannung in den Teams zu beobachten.

Die Kapazitäten der einzelnen Fahrzeuge sind ebenfalls sehr unterschiedlich und reichen von 4,2 kWh bis 8,7 kWh. Hierbei ist jedoch auch zu beachten, dass die zugeordneten Gewichte der Fahrzeuge sehr unterschiedlich sind. So ist das 2012er Fahrzeug aus Delft mit 4,2 kWh und einem Gewicht von 148 kg, im Vergleich zum 2010er Fahrzeug aus Zürich mit 8,7 kWh und einem Gewicht von 227 kg, etwa 80 kg leichter und verbraucht dementsprechend weniger Energie. Die Tendenz zu vielen aerodynamischen Hilfsmitteln, wie Frontflügel, Heckflügel und Diffusor ermöglicht höhere Kurvengeschwindigkeiten, erzeugt aber gleichzeitig auch einen höheren Energiebedarf. Das Verhältnis von Akkumulatorkapazität und Fahrzeuggewicht steigt bei allen Teams mit der Verwendung von Aerodynamik.

Beim Aufbau der Akkumulatoren müssen diese, dem Regelwerk entsprechend, in 120 V oder 12 MJ, beziehungsweise 6 MJ Einheiten aufgeteilt sein. Für die Bereitstellung der genannten Spannungen werden mehrere Akkumulatorzellen benötigt. So sind zum Beispiel beim 2010er Fahrzeug von KA-Racing 96 einzelne Zellen mit insgesamt 400 V verbaut. Das 2013er Fahrzeug von AMZ Racing besitzt 336 einzelne Zellen mit insgesamt 480 V. Die entstehenden Zelleneinheiten können in unterschiedlichen räumlichen Anordnungen verbaut werden. So sind teilweise Einheiten mittig hinter dem Fahrer positioniert, teilweise zweigeteilt oder U-förmig, als Mischform der vorhergehenden Möglichkeiten.

5. Bewertung von Konzepten

Bei der Bewertung der Konzepte wird die grundlegende Idee des Fahrzeuges betrachtet. Weitere Überlegungen, wie zum Beispiel ein Aerodynamikpaket sind optional und werden der Übersichtlichkeit halber nicht betrachtet.

Doch welche Probleme ergeben sich bei den unterschiedlichsten Antriebskonzepten? Welcher Akkumulator ist der richtige?

Diese Fragen müssen im Vorfeld der Entwicklung geklärt werden und können meist nur im Zusammenhang mit der jeweiligen Situation des Formula Student Teams, seiner Fertigungsmöglichkeiten, Testmöglichkeiten und dem individuellen Wissen, betrachtet werden. Weiterführend zu den Analysen von Mitbewerbern der Formula Student Electric werden die unterschiedlichen Antriebskonzepte nochmals detailliert beleuchtet.

5.1 Auswahl des Konzeptes

Die Wahl des zu entwickelnden Antriebskonzeptes stellt eine der größten Herausforderungen in der frühen Entwurfsphase dar. Es ist abzuwägen, welche Antriebsvariante in Kombination mit den gegebenen Möglichkeiten des Teams umzusetzen ist. Einen Überblick über sinnvolle Antriebskonzepte gibt der anschließende Abschnitt, hierbei werden Antriebskonzepte mit längs liegenden Kardanwellen nicht berücksichtigt. Die Kraftleitung von einem Motor an mehrere Fahrzeugachsen erscheint bei der Verwendung von Elektromotoren nicht sinnvoll, da diese gut einzeln positionierbar sind. Aus rein kombinatorischer Sicht sind so 16 unterschiedliche Antriebskonzepte möglich, Abbildung 22.

		hinten			
		Anzahl & Position	0	1 mittig	2 mittig
vorne	0	16	●	●	●
	1 mittig	●	●	●	●
	2 mittig	●	●	●	●
	2 nabenseitig	●	●	●	●
		6	7	3	4

Abbildung 22: mögliche Motorenkonzepte

Diese Vielzahl der Möglichkeiten wird durch logische sowie fahrzeugspezifische Überlegungen begrenzt. Hierdurch ergeben sich insgesamt sieben unterschiedliche Konzepte, die zu überlegen sind. Technische Überlegungen und Vergleiche zu ähnlichen Fahrzeugen der Rennserie schränken die Anzahl der Konzepte weiter ein, sodass vier Varianten größere Beachtung finden. Jedoch ist ein konsequentes Vernachlässigen der restlichen, durch die erste Beschränkung gefundenen Varianten nicht zu empfehlen, da hierdurch eine große Einschränkung der Gedankenvielfalt entsteht.

Die Darstellung der sinnvollen Variationen wird zur besseren Übersichtlichkeit in fünf Abschnitte unterteilt. Hierbei werden zunächst die Varianten 5, 6 und 7 zusammengefasst betrachtet. Anschließend werden die Varianten 1, 2, 3 und 4 einzeln betrachtet. Die ausgewählten Varianten 1 bis 4 sind im Anhang D schematisch dargestellt.

5.1.1 Varianten 5, 6 und 7

Die Varianten 5, 6 und 7 werden zusammengefasst betrachtet, da diese Varianten jeweils zwei Radnabenmotoren besitzen. Der Aufwand diese zwei Radnabenmotoren auf vier zu erweitern sollte sich in Grenzen halten. Deshalb werden diese Varianten höchstwahrscheinlich wenig Beachtung finden.

Die Variante 5 besitzt zwei Radnabenmotoren an der Hinterachse. So können die Hinterräder unabhängig voneinander angetrieben werden. Diese Variante erfordert ein Stirnrad- oder Kegelradgetriebe oder ein Umlaufgetriebe an jedem Rad. Da die beiden Räder gleich angetrieben werden sollen, müssen die Motoren gleich sein. Die Getriebe-Motor-Einheit ist spiegelsymmetrisch oder als Gleichteil bei Umlaufgetrieben auszuführen. Die Versorgung mit Energie und Kühlung, beziehungsweise das Abführen von zurückgewonnener Energie erfolgt über bewegliche Bauteile und muss dementsprechend entwickelt werden. Da die Entwicklung solcher Radnabenmotoren und die entsprechenden Zu- und Ableitungen für die Hinterachse vorgenommen wird, sollte die Umsetzung eines Allradfahrzeuges einen kaum größeren Aufwand bedeuten, jedoch die Fahreigenschaften des Fahrzeuges verbessern. Werden die gleichen Motoren auch an der Vorderachse eingesetzt kann das Fahrzeug aktiver in der Fahrdynamik beeinflusst werden. Dies entspricht dann der Variante 4, Abschnitt 5.1.5 und ist zu bevorzugen.

Bei der Variante 6 werden ebenfalls zwei Radnabenmotoren verwendet, allerdings werden diese an der Vorderachse verbaut. Die Bewertungskriterien sind die gleichen, wie bei der vorherigen Variante 5 und mit eben so wenig Aufwand in ein Allradkonzept umzudenken.

Bei der Variante 7 wird das Fahrzeug durch zwei Radnabenmotoren an der Vorderachse und einen mittig positionierten Elektromotor an der Hinterachse angetrieben. Hierbei entstehen zwei signifikante Probleme. Zum einen muss das Fahrzeug durch zwei unterschiedliche Motorentypen angetrieben werden, was mehr Konstruktionsaufwand und Prüfstandsarbeit bedeutet. Zum anderen muss an der Hinterachse ein Ausgleichsgetriebe verbaut werden, um die unterschiedlichen Drehzahlen der Hinterräder bei Kurvenfahrt zu kompensieren. Hierdurch wird gleichzeitig die aktive Beeinflussung der Fahrdynamik, welches ein sehr großer Vorteil von elektrisch angetriebenen Fahrzeugen ist, zumindest an der Hinterachse in eine passive Beeinflussung der Fahrdynamik gewandelt. Somit erscheint der Vorteil von Elektromotoren, die frei positionierbar sind, gegenüber dem Verbrennungsmotor zerschlagen. Weitere Problemstellungen von einem mittigen Elektromotor an der Hinterachse werden in Variante 1, Abschnitt 5.1.2 aufgezeigt

5.1.2 Antrieb mit einem zentralen Motor (Variante 1)

Nach Abschätzung der Gesamtmasse des Fahrzeuges können vorhandene Bauteile in Festigkeit und Steifigkeit überprüft und angepasst werden. Somit ist der Konstruktionsaufwand auf ein Minimum reduzierbar, um ein Fahrzeug der Klasse Formula Student Combustion für die Formula Student Electric umzurüsten.

Die Wahl eines Konzeptes mit einem zentral angeordneten Motor an der Hinterachse scheint die einfachste Variante der Umsetzung eines elektrisch angetriebenen Fahrzeuges zu sein. Der Elektromotor befindet sich hinter dem Fahrer und annähernd in der XZ-Ebene. Es bietet sich an, dieses Konzept zu verfolgen, wenn ein bereits vorhandenes Fahrzeug mit einem Verbrennungsmotor auf einen rein elektrischen Antrieb umgerüstet werden soll. Hierbei wird der Verbrennungsmotor durch einen Elektromotor ersetzt. Die Kraftübertragung vom Motor zu den angetriebenen Rädern erfolgt in gleicher oder ähnlicher Weise. Dies bedeutet, dass zwischen der Motorausgangswelle das Drehmoment über ein Getriebe an die angetriebene Achse übertragen wird. Die Steuer- und Regeleinheiten werden

passend im Fahrzeug positioniert. Ein System zur Kühlung des Elektromotors und der Leistungselektronik muss vorgesehen werden. Die Aufnahmen für Motor, Kühlung, Elektronik sowie Steuer- und Regeleinheiten müssen in einem entsprechenden Chassis eingebunden werden.

Des Weiteren sollte die angetriebene Achse über ein einstellbares Differentialgetriebe verfügen, um zum Beispiel bei Kurvenfahrt unterschiedliche Raddrehzahlen der Räder auszugleichen. Dies ist bei der Kurvenfahrt wichtig, da das kurvenäußere Rad aufgrund des größeren Kurvenradius einen größeren Weg zurücklegen muss. Diese Wegdifferenz kann nur durch einen Drehzahlunterschied kompensiert werden, sind nun das äußere und innere Rad starr miteinander verbunden beginnt das kurveninnere Rad an durchzudrehen. Hierdurch verliert das durchdrehende Rad an Seitenführungskraft, die maximale Kurvengeschwindigkeit wird reduziert.

Als mögliche Primärgetriebe sind Ketten- und Riemengetriebe sowie Stirnrad- und Kegelradgetriebe zu betrachten. Umlaufgetriebe werden als Stirnradgetriebe angesehen. Ketten- und Riemengetriebe sind einfach in der Handhabung, können aufgrund ihrer Flexibilität Toleranzen sehr gut ausgleichen, besitzen einen hohen Wirkungsgrad und bedürfen in der Regel keiner Einhausung. Somit bietet sich diese Art der Kraftübertragung für das Ersetzen eines Verbrennungsmotors an, da diese Antriebsart bei Fahrzeugen mit Verbrennungsmotoren meist als Sekundärübersetzung verwendet wird. Jedoch ist zu beachten, dass die Übersetzung eingeschränkt ist. Die Drehzahl des Elektromotors darf nicht zu sehr von der Drehzahl der angetriebenen Achse abweichen. Dies schränkt die Auswahl der möglichen Elektromotoren ein.

Mit Stirnrad- und Kegelradgetrieben ist die Übersetzung sehr variabel und die Drehzahlunterschiede können entsprechend kompensiert werden. Stirnrad- und Kegelradgetriebe weisen ebenfalls einen sehr hohen Wirkungsgrad auf, jedoch benötigen sie meist einer Einhausung mit definierten Achspositionen und integrierter Schmierung, dies kann jedoch als Erweiterung des benötigten Gehäuses für den Elektromotor ausgeführt werden. Bei zugekauften Differentialgetrieben, die bereits optimal auf die Rennserie angepasst sind, stellt die Position der Krafteinleitung ein Hindernis zur einfachen Integration in das Gehäuse des Primärgetriebes dar. Am Beispiel des für die Formula Student entwickelten Differentialgetriebes der Drexler

Motorsport GmbH wird in Abbildung 23 deutlich, dass die Integration diverse konstruktive Problemstellen aufweist.

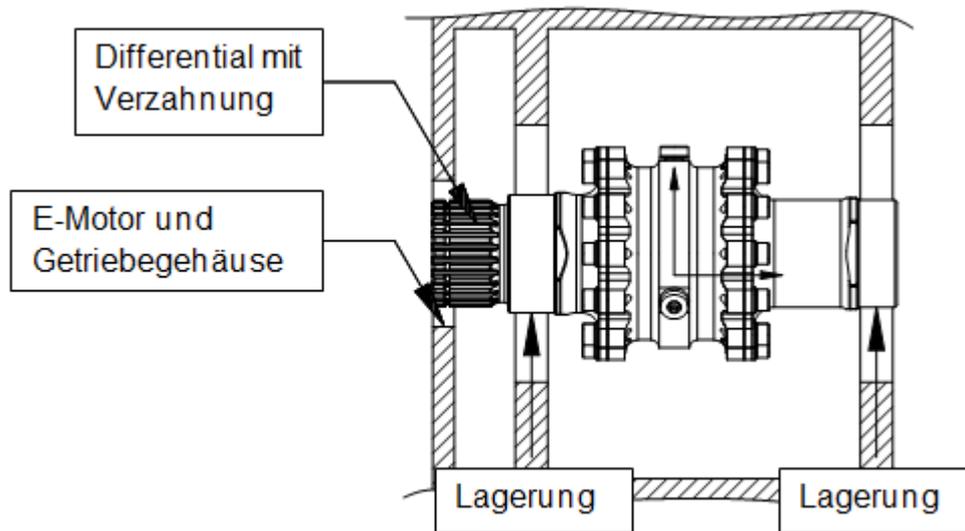


Abbildung 23: schematischer Aufbau Gehäuse für Differential

Die Verzahnung der Kettenradaufnahme ist mit normalen Wellendichtungen kaum zu realisieren und bedarf einer Umarbeitung des zugekauften Differentialgehäuses. Die Neuentwicklung eines Differentialgetriebes oder die Weiterentwicklung eines zukaufbaren Differentialgetriebes bedeutet einen erhöhten Konstruktionsaufwand, der die Zeit und Konstruktionsarbeit in anderen Bereichen des Fahrzeuges beeinträchtigt. Bei der Entwicklung eines rein elektrisch getriebenen Fahrzeuges sollte diese Entwicklungsarbeit und –zeit in anderen Bereichen sinnvoll genutzt werden.

Die Substitution eines Verbrennungsmotors durch einen Elektromotor ist mit dieser Variante relativ einfach, wirft aber ebenfalls einige Probleme auf. Da bei der Entwicklung eines rein elektrisch getriebenen Fahrzeuges ebenfalls viel Entwicklung in die Regelung und Steuerung des Elektromotors investiert werden muss, ist diese Variante als bedingt zielführend zu beurteilen. Aufgrund der Möglichkeit mit Elektromotoren die Fahrdynamik aktiv zu beeinflussen stellt sich die Frage, ob die Wahl nur eines Motors mit einem Differentialgetriebe sinnvoll ist. Wenn der Ausgleich der unterschiedlichen Raddrehzahlen auf der kurveninneren und –äußeren Seite aktiv beeinflusst werden kann, ist dies ein enormer Vorteil. Dadurch lässt sich aktiv in die gesamte Fahrdynamik des Fahrzeuges eingreifen und verbessern. Der Regelungs- und Steuerungsaufwand ist eine Erweiterung der bereits für den einzelnen Motoren vorhandenen Systeme.

5.1.3 Antrieb mit zwei Motoren mittig (Variante 2)

Die Variante 2 besteht aus zwei Elektromotoren, die mittig an der Hinterachse verbaut sind. Jeweils ein Motor treibt über eine Antriebswelle ein Rad der Hinterachse an.

Die zwei unabhängigen Elektromotoren sind im hinteren Bereich des Fahrzeuges positioniert. Sie sollten symmetrisch zur XZ-Ebene und möglichst nah zu dieser angeordnet sein. Die Kraftübertragung an die Hinterräder erfolgt jeweils über ein Getriebe. Ketten- und Riementriebe sollten vermieden werden, da sich die zwei unabhängigen Elektromotoren so positionieren lassen, dass sie zentrisch zu den Antriebswellen sind. Außerdem wird bei dieser Variante kein Differential benötigt, da sich die Räder unabhängig schnell voneinander drehen können. Dies ist ebenfalls ein Grund für die Wahl von Stirnrad- oder Kegelradgetrieben. Aufgrund der Bauform von Elektromotoren und der Positionierungsmöglichkeit sind besonders Umlaufgetriebe für die Kraftübertragung bei dieser Variante interessant. Die Steuer- und Regeleinheiten können frei positioniert werden, sollten sich aber nicht zu weit entfernt von den Motoren befinden, da so weniger Fehlerquellen eingebaut werden und durch kürzere Leiterwege auch Masse eingespart werden kann. Die Kühlung der Motoren und der Leistungselektronik erfolgt über ein Kühlsystem.

Die Konstruktion eines durch zwei Elektromotoren angetriebenen Fahrzeuges unterscheidet sich von der einfachen Substitution des Verbrennungsmotors. Es wird kein Differential mehr benötigt, was dem Konstrukteur mehr Freiheiten lässt.

Wie bereits in Abschnitt 5.1.2 beschrieben ist der Einsatz von zwei Elektromotoren, die mittig im hinteren Teil des Fahrzeugs verbaut werden, eines einzelnen Motors vorzuziehen. Nähere Betrachtungen zeigen folgende Vorteile. Zwei Motoren lassen sich einzeln ansteuern und somit auch die jeweils einzeln angetriebenen Räder. Hierdurch kann die Fahrdynamik des Fahrzeugs aktiv beeinflusst werden. So ist es möglich mit einer entsprechenden Sensorik und Regelung unterschiedliche Zustände der Räder zu kontrollieren. Dies ist besonders bei Kurvenfahrt interessant, allerdings kann so auch beim Beschleunigen eine Traktionskontrolle besser realisiert werden. Vereinfacht kann davon ausgegangen werden, dass die nicht angetriebenen Vorderräder, während des jeweiligen Fahrzustandes, nicht durchdrehen. Hieraus resultiert eine Raddrehzahl der Vorderräder, die proportional zur Drehzahl der

Hinterräder stehen muss, um eine maximale Traktion zu haben. Durch die Sensorik werden die einzelnen Raddrehzahlen erfasst und über die Regelung angeglichen ohne den Kraftfluss vom Motor zu den Reifen umzulenken oder zu unterbrechen. Dies erfordert eine ausgewogene Regelung und eine zuverlässige Sensorik, zudem ist ein umfassendes Wissen über die Fahrdynamik des Fahrzeuges wichtig.

Durch den Einsatz von zwei separaten Motoren ist es möglich die erforderliche Leistung je Motor zu reduzieren. Hieraus ergeben sich reduzierte elektrische Spannungen und Stromstärken, die in den elektrischen Bauteilen kleinere Leiterquerschnitte zur Folge haben. Dies kann bei der Betrachtung der Gesamtmasse des Systems zu Vorteilen führen.

Die Aufteilung des Antriebes in zwei Stränge erzeugt ein System, bei dem ein Motor versagen und das Fahrzeug trotzdem noch bewegt werden kann, wenn die Motorensteuerung und Regelung dies ermöglicht. Jedoch ist ebenso zu beachten, dass auch doppelt so viele Teile versagen können.

Da im Motorsport nicht nur die Massen des Fahrzeuges, sondern auch die Verteilung dieser von großer Bedeutung ist, bietet sich die mittige Position der Motoren an. Hierdurch lassen sich die ungefederten Massen klein halten. Außerdem werden die Massen der Motoren näher an das Gierzentrum des Fahrzeugs gelegen, ein agileres Fahrzeug ist die Folge. Nachteilig ist der erhöhte Aufwand der Kraftübertragung von den Motoren zu den Rädern. Es werden Antriebswellen benötigt. Hieraus resultierende Verluste, durch Reibung und Verformung der einzelnen Bauteile sind nachteilig. Um die Drehzahlen der Motoren und der angetriebenen Räder auf einander abzustimmen werden zusätzlich Getriebe benötigt. Die Recherche der Mitbewerber ergibt ein Übersetzungsverhältnis zwischen 1:4 und 1:14, Anhang C. Das entsprechende Übersetzungsverhältnis muss für die gewählten Elektromotoren und das Fahrzeugkonzept ermittelt werden. Die Position der Elektromotoren entlang der X-Achse und die gewählte Art des Getriebes mit der entsprechenden Übersetzung liefert die Gestalt der Einhausung des Antriebsstranges. Es ergibt sich also ein ähnliches Problem wie in Abschnitt 5.1.2 Absatz 6, allerdings ist die Abdichtung des Gehäuses mit weniger Aufwand verbunden. Ein weiterer Vorteil der mittigen Anordnung ist die Versorgung der Elektromotoren mit Energie und Kühlung über starre Verbindungen. Dies erfordert keine Untersuchung der Versorgung über bewegliche Komponenten und schließt eine weitere Fehlerquelle aus.

5.1.4 Antrieb mit zwei Motoren mittig und zwei Radnabenmotoren vorn (Variante 3)

Variante 3 besteht aus zwei Elektromotoren an der Hinterachse und zwei zusätzlichen Elektromotoren an den Vorderrädern. Es werden alle vier Räder unabhängig voneinander angetrieben.

An der Vorderachse befinden sich zwei Radnabenmotoren, die je ein Rad antreiben. An der Hinterachse sind zwei mittig verbaute Elektromotoren vorgesehen. Die Radnabenmotoren übertragen die Antriebskräfte jeweils über Stirnrad- oder Umlaufgetriebe zu den Vorderrädern. An der Hinterachse erfolgt die Kraftübertragung jeweils über ein Getriebe und eine Antriebswelle zu den Rädern. Es handelt sich um eine Erweiterung der Variante 2 um zwei Radnabenmotoren an der Vorderachse. Hieraus resultiert ein vermehrter Aufwand in der Positionierung der Steuerungs- und Regelungseinheiten, da nun nicht nur die Hinterachse gesteuert werden muss, sondern auch die Vorderachse. Weiterhin muss ein System zur Kühlung der vier Motoren und der Leistungselektronik vorgesehen werden.

Ein Fahrzeug mit Allradantrieb zu entwickeln bringt einige große Vorteile. So können alle vier Räder zur Kraftübertragung genutzt und die Antriebskräfte je nach Anforderung auf alle vier Räder verteilt werden. Jedoch muss bei einem Allradfahrzeug mit vier einzelnen Elektromotoren die Kraftübertragung nicht verteilt werden, sondern kann im Gegensatz zu mechanischen Allradantrieben effizienter genutzt werden. Bei mechanischen Allradfahrzeugen, die die Kraft von einem Triebwerk aus, an alle vier Räder mit diversen Wellen und Getrieben verteilen, summieren sich auch Verluste auf. Diese Verluste können durch die flexible Anordnung der Elektromotoren reduziert werden.

Weiterhin kann durch eine intelligente Regelung der Motoren die Fahrdynamik des Fahrzeuges, besonders in den kritischen Punkten des Einlenkens und Auslenkens bei einer Kurve, beeinflusst werden.

Die Radnabenmotoren an der Vorderachse wirken sich nachteilig auf die Verteilung der ungefederten Massen sowie auf die Energiezu- und abführung aus. Diese Konzeptvariante beinhaltet einen größeren konstruktiven Aufwand, da die Vorderachse besonders im Bereich der Radträger völlig neu entwickelt werden muss.

So muss ein Radträger entwickelt werden, der den Elektromotor aufnimmt und gleichzeitig die weiteren Baugruppen, Radnabe, Lagerungen, Bremse, Lenkungs- und Fahrwerksanbindung, integriert. Ebenfalls zu beachten, ist das benötigte Getriebe zwischen dem Elektromotor und der Radnabe, es muss sehr klein und effizient gestaltet werden. Hierzu bieten sich Umlaufgetriebe an, die möglichst in den Radträger integriert sein sollten.

Das Zu- und Abführen von Energie und Signalen ist ebenfalls ein konstruktives Problem und darf die Bewegung der Räder, beim Einfedern oder Lenken, nicht beeinträchtigen. Die Regelungs- und Messelektronik stellt hierbei das geringere Problem dar. Die Kabel zur Versorgung des Motors mit elektrischer Energie weisen große Querschnitte und starke Isolationsschichten auf und besitzen dadurch eine Eigensteifigkeit, die zu untersuchen ist. Die Kühlung der Elektromotoren ist ein weiterer Aspekt bei der Betrachtung von Radnabenmotoren. Besonders an der gelenkten, meist vorderen Achse ist hier ein besonderes Augenmerk auf die Flexibilität zu legen. Die Kühlung der Motoren bedarf meist einer Flüssigkeitskühlung. Das Formula Student Reglement schreibt eine Kühlung mit Wasser ohne Additiven vor. Somit ergibt sich eine Kühlung mit Wasser, wenn die reine Luftkühlung zu gering ist. Dabei wird die Wärmeenergie der Elektromotoren an einen Wasserkreislauf abgegeben, der das erhitzte Wasser in einem Luft/Wasser Wärmetauscher herunterkühlen soll. Die Verbindung zwischen dem Radnabenmotor und dem Luft/Wasser Wärmetauscher ist hierbei hochflexibel und gedichtet auszuführen. Eine Möglichkeit ist es das Kühlwasser durch Schläuche zu transportieren.

Bei einem Allradfahrzeug ist abzuwägen ob sich der konstruktive Aufwand und das mögliche Mehrgewicht zu den verbesserten Fahreigenschaften aufrechnen lassen. Hierbei ist auch zu beachten, dass der Energiespeicher kleiner gehalten werden kann, wenn durch die vier Motoren Energie durch Rekuperation wieder zurückgewonnen werden kann. Dabei können auch die Bremsen entlastet werden.

Der Aufwand der Regelungstechnik bei einem Allradfahrzeug wird sich im Vergleich zu einem mit zwei Motoren angetriebenem Fahrzeug zwar erhöhen, jedoch ist kein exponentieller Anstieg des Aufwandes zu erwarten. Bei der Implementierung der Rekuperation wird ein weiterer Steuer- und Programmieraufwand nötig.

Die Verwendung von gleichen Motoren an der Vorder- und Hinterachse ist zu empfehlen, da sich hieraus eine verminderte Prüfstandsarbeit ergibt und die Anzahl der Ersatzteile geringer bleibt.

5.1.5 Antrieb mit vier Radnabenmotoren (Variante 4)

Die Variante 4 zeichnet sich durch vier Elektromotoren aus, die an je einem Rad verbaut sind. Die Kraftübertragung erfolgt jeweils über ein Stirnrad- oder Umlaufgetriebe an das Rad. Somit sind alle vier Räder unabhängig voneinander angetrieben. Je nach Auslegung der Elektromotoren können alle vier gleich sein und somit auch die Kraftübertragung an das jeweilige Rad.

Das Konzept alle Räder einzeln anzutreiben hat zudem den Vorteil, dass die Motor-Getriebe-Einheiten als Gleichteile ausgeführt werden können. Allerdings sollten bei nichtkonzentrischen Motor-Getriebe-Einheiten spiegelsymmetrische Versionen entwickelt werden. Somit ist es zu bevorzugen an der Vorder- und Hinterachse Motoren mit gleichen Eigenschaften zu verwenden. Dies mindert den Aufwand bei der Erprobung der Motoren auf dem Prüfstand. Wenn an der Vorder- und Hinterachse unterschiedliche Motoren verwendet werden, müssen diese jeweils auf dem Prüfstand getestet werden. Hierdurch wird der Umfang der Prüfstandsarbeit verlängert.

Nachteilig wirkt sich das Prinzip der Radnabenmotoren auf die Vertikaldynamik des jeweiligen Rades aus. Die ungefederten Massen vergrößern sich. Das Gierverhalten des Fahrzeuges wird durch die außenliegenden Massen ebenfalls negativ beeinflusst, jedoch kann dies durch die aktive Steuerung der einzelnen Räder kompensiert oder sogar verbessert werden.

Die Steuerungs- und Regeleinheiten für die vier Motoren müssen günstig im Fahrzeug platziert werden, um unnötige Kabelwege zu vermeiden. Jedoch sollten die Steuerungs- und Regeleinheiten mit einander kommunizieren können, um eine aktive Beeinflussung der Fahrdynamik sicherzustellen.

Da die Motoren bei dieser Variante an der äußersten Punkten des Fahrzeuges gelegen sind stellt die Versorgung dieser mit elektrischer Energie, Steuerungs- und Regelungssignalen, Kühlung sowie Speisung von zurückgewonnener Energie ein Problem dar. Die Motoren sind nur über bewegliche Bauteile zu erreichen und die Leitungen dorthin müssen dementsprechend konzipiert werden. Es entstehen aber auch sehr lange Wege die sich negativ in der Gesamtfahrzeuggewichtsbilanz niederschlagen.

Allerdings bietet diese Variante einen hohen Grad an Freiheit bezüglich des Packages, da die Motoren nicht mehr als Vorgabe für den hinteren Teil des Fahrzeuges anzusehen sind. Es wird viel Platz im Inneren des Fahrzeuges gewonnen, der sinnvoll für die Gewichtsverteilung und die optimale Funktion der restlichen Bauteile genutzt werden kann.

5.2 Akkussystemauswahl

Bei der Wahl des Akkusystems sind mehrere Gesichtspunkte ausschlaggebend. Zum einen muss der Akkumulator die erforderliche Leistung zur Verfügung stellen. Hierbei ist es wichtig, dass der Akkumulator die erforderliche Energiemenge für die, mit angemessener Geschwindigkeit zu fahrende Strecke speichern kann. Es ist wenig sinnvoll einen Akkumulator zu verwenden, der das Fahrzeug zwar über die Distanz bringt, allerdings nur mit gedrosselter Geschwindigkeit.

Zum anderen sollte der Akkumulator aber auch nicht unverhältnismäßig groß sein oder zu schwer. Denn je schwerer das Gesamtfahrzeug, desto höher ist auch der Energieverbrauch. Dadurch vergrößert sich ebenfalls der Akkumulator. Es ergibt sich eine Iterationsschleife. Es ist eine maximale Leistung bei minimalem Gewicht anzustreben.

Akkumulatoren speichern elektrische Energie mit Hilfe von galvanischen Elementen. Als Medium werden unterschiedliche chemische Zusammensetzungen eingesetzt. Bleiakumulatoren sind bereits seit vielen Jahren im Einsatz und werden häufig als Starterbatterie für Kraftfahrzeuge eingesetzt. Jedoch sind diese Batterien durch ihre große Masse und somit niedrige Energiedichte unvorteilhaft für den Rennsport.

Bei vielen elektronischen Kleingeräten sind Batterien verbaut, die als Basis Lithium aufweisen. Dieser Batterietyp besitzt eine hohe Energiedichte. Der Oberbegriff Lithiumbatterie beherbergt unterschiedliche Arten von chemischen Zusammensetzungen. Unter den Lithiumbatterien zählen die Lithiumionenbatterien, die Lithiumeisenphosphatbatterien sowie die Lithiumpolymerbatterien zu denen, die die höchst Energiedichte aufweisen. In der vorhergehenden Mitbewerberanalyse, Abschnitt 4.3, hat sich gezeigt, dass eben diese Lithiumbatterien von anderen Teams genutzt werden.

Es gibt noch weitere Batterietypen die zum Beispiel auf Nickel, Natrium oder Zink basieren.

Die Energiedichten der einzelnen Typen sind sehr anschaulich im Ragone-Diagramm dargestellt, Abbildung 24.

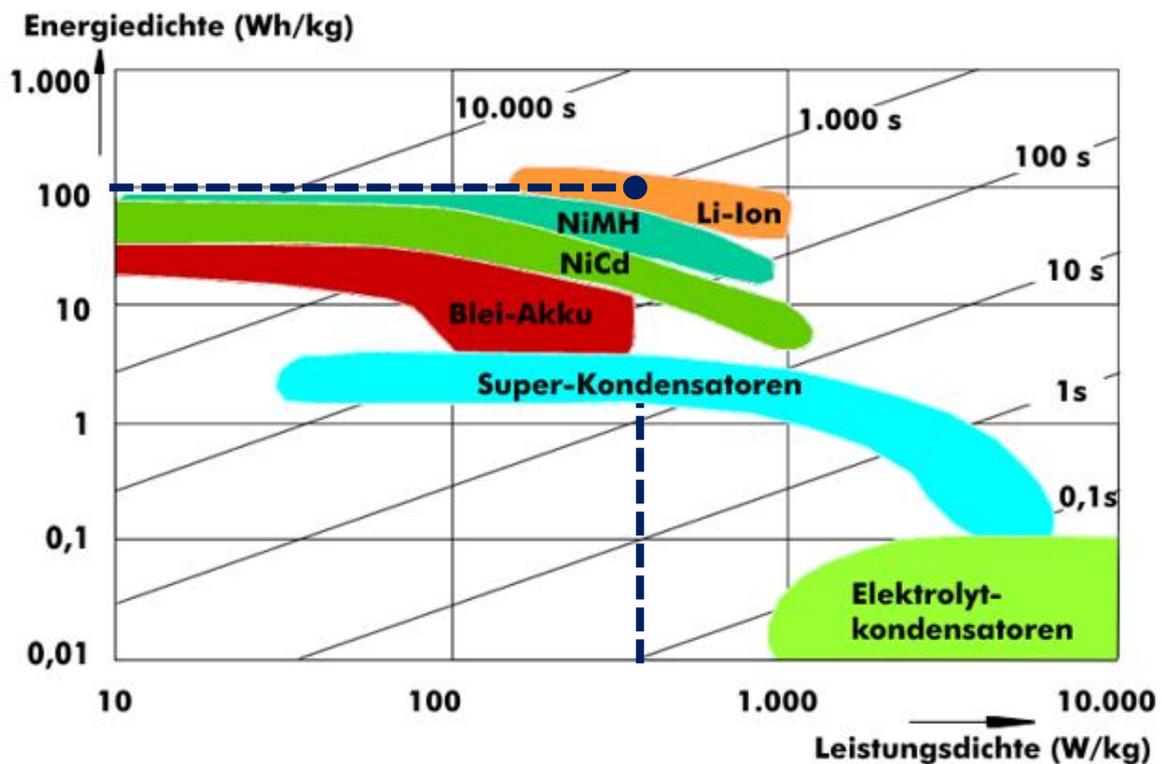


Abbildung 24: Ragone-Diagramm [DAT131]

Es wird die Energiedichte über die Leistungsdichte dargestellt. Die diagonalen Isochronen stellen die Zeit dar, in der eine vollständig Entladung erfolgt. Diese Isochronen ergeben sich durch Division der spezifischen Energie und der spezifischen Leistung. Im Diagramm ist beispielhaft ein Lithiumionenakkumulator eingezeichnet, der eine Energiedichte von 100 Wh/kg und eine Leistungsdichte von 360 W/kg aufweist. Hieraus ergibt sich eine Zeit von 1.000 s für die vollständige Entladung.

Gleichung 4: Entladezeit Akkumulator

$$t_{Ent} = \frac{\omega}{\Phi} = \frac{100 \text{ Wh/kg}}{360 \text{ W/kg}} \cdot 3600 \text{ s} = 0,277 \text{ h} \cdot 3600 \text{ s} = 1.000 \text{ s}$$

mit t_{Ent} ; ω ; $\Phi \in R$

t_{Ent} : Entladungszeit in s

ω : Energiedichte in Wh/kg

Φ : Leistungsdichte in W/kg

Es zeigt sich, dass die Lithium basierten Batterien das größte Verhältnis aus Energiedichte und Leistungsdichte besitzen. Hieraus ergibt sich ein, für den Renneinsatz, sehr gutes Verhältnis aus Leistung und Gewicht.

Die erforderlichen Einzelzellen des Energiespeichers müssen in ihrer Beschaffenheit so gewählt werden, dass die erforderlichen Ansprüche erfüllt werden und durch weitere Anforderungen ergänzt werden. So ist die Beschaffung und die damit einhergehende Kostenfrage ein wichtiges Kriterium. Des Weiteren sollten die Zellen sicher und einfach kombinierbar und zu verbauen sein, sodass die Gefahren die mit diesen hohen Spannungen einhergehen minimiert werden. Die äußere Gestalt der Zellen ist so zu wählen, dass eine größtmögliche Packungsdichte zu erzielen ist. Dagegen spricht eine möglicherweise erforderliche Umströmung der Zellen zur Ventilation oder Kühlung der Akkumulatoreinheiten. Dies ist im Vorfeld mit dem Hersteller abzusprechen und dem entsprechend zu verwirklichen.

Der Aufbau von Lithiumakkumulatoren besteht aus mehreren Schichten. Die Lithiumverbindungen sind durch eine Separatorschicht von den Grafitverbindungen getrennt. Dabei bilden die Lithiumverbindungen die Kathode und die Grafitverbindungen die Anode, Abbildung 25. Das Elektrolyt muss eine hohe chemische Beständigkeit und Löslichkeit der Lithiumsalze aufweisen [MAN13].

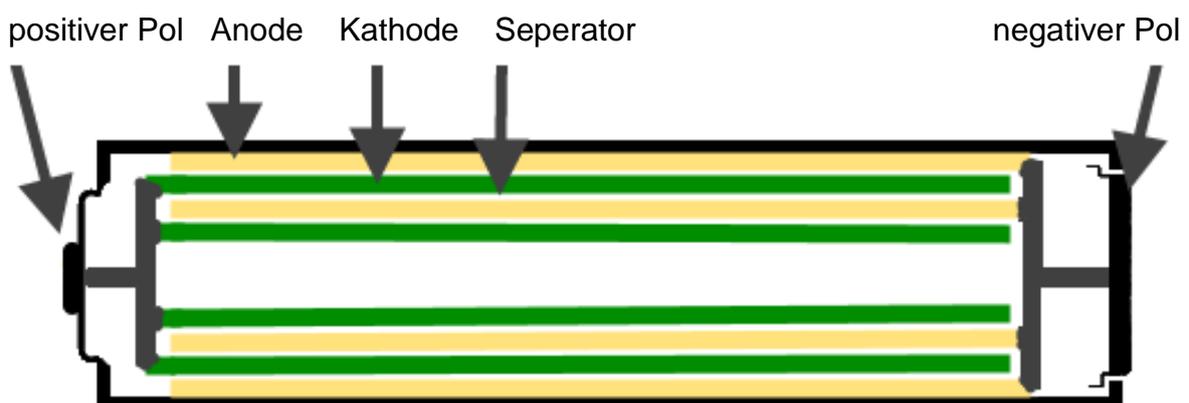


Abbildung 25: Aufbau Lithiumakkumulator [MAN13]

Dieser Aufbau ist in zylindrischer und prismatischer Form oder als „Coffee-Bag-Zellen“ möglich. Bei prismatischen Formen, hierzu zählen auch die „Coffee-Bag-Zellen“, ist der Aufbau ähnlich der zylindrischen Form nur nicht aufgewickelt, sondern eben. Es ist abzuwägen welche Bauform für den Einsatz in einem Formula Student Electric Fahrzeug sinnvoll ist. So bieten die prismatischen Bauformen, auch Flachzellen genannt, den Vorteil, dass kaum Zwischenräume entstehen. Die zylindrischen Zellen weisen immer Zwischenräume auf. Der Vergleich in Abbildung 26 zeigt dieses Problem.

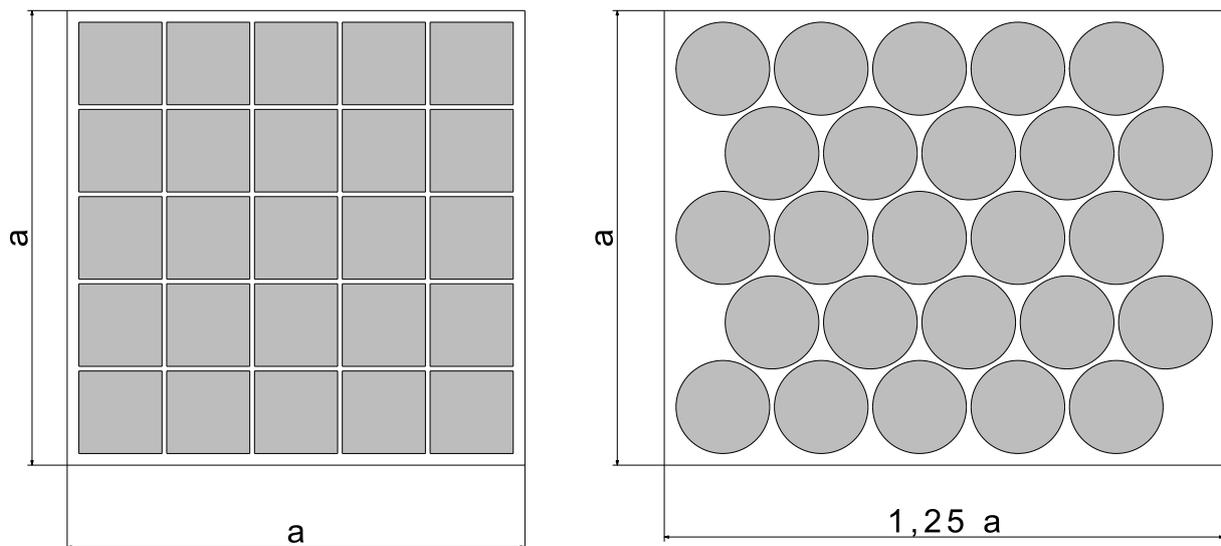


Abbildung 26: Vergleich des Flächeninhaltes bei gleicher Anzahl von Flach- und Rundzellen

Die Anordnung wurde beispielhaft gewählt und besteht jeweils aus 25 Einzelzellen. Zwischen den Zellen wurde ein gleicher Betrag an Zwischenräumen gelassen, um die Sichtbarkeit zu verstärken. Bei äquivalentem Flächeninhalt der Einzelzellen ergibt sich auch bei dichtester Packung der zylindrischen Zellen eine größere Gesamtfläche. Gerade im Randbereich kann viel Raum nicht genutzt werden, da dort keine halben Zellen positioniert werden können. Als erste Folgerung ist daher ein System aus Flachzellen zu bevorzugen. Es ist jedoch zu betrachten, ob es Zellen dieser Gestalt mit den notwendigen Spezifikationen gibt.

Bei der Berechnung der Anzahl der benötigten Zellen sind die Spannungen der Einzelzellen heranzuziehen. Ausgehend von der angestrebten Betriebsspannung des Fahrzeuges muss diese durch die Nennspannung der Einzelzellen geteilt werden. Hierbei sind in der Regel Lithium-Ionen-Akkumulatoren mit einer Nennspannung von 3,6 V [DAT13] und Lithium-Polymer-Akkumulatoren mit einer Nennspannung von

3,7 V [MAN131] einzurechnen. Die Spannungen können je nach Typ und Hersteller etwas schwanken. Die genaue Spannung der Zellen ist beim Hersteller zu erfragen. Weiterhin ist zu beachten, dass die einzelnen Einheiten, die vom Regelwerk vorgeschriebene Spannung und Energie nicht überschreiten. Unter Berücksichtigung der Gleichheit der einzelnen Zelleinheiten, ergeben sich folgende Gleichungen zur ersten Abschätzung der notwendigen Anzahl an Akkuzellen. Diese Gleichungen sind parallel Randbedingungen für die Anzahl der verwendeten Zellen.

Aus der Nennspannung des Gesamtfahrzeuges ergibt sich mit Gleichung 5 die Anzahl:

Gleichung 5: Nennspannung Gesamtfahrzeug

$$n_{ges} = \left\lceil \frac{U_{ges_{gew}}}{U_{zel}} \right\rceil \leq k \cdot \left\lceil \frac{120 V}{U_{zel}} \right\rceil$$

mit:

n_{ges} : Anzahl der Einzelzellen; $n \in N$

$U_{ges_{gew}}$: Nennspannung des Gesamtfahrzeuges; $U_{ges} \in R$

U_{zel} : Nennspannung der Einzelzelle; $U_{zel} \in R$

k : Anzahl der Zelleinheiten; $k \in N$

Bei der Betrachtung der Energie des Gesamtfahrzeuges ergibt sich mit Gleichung 6 die Anzahl:

Gleichung 6: Energiebedarf Gesamtfahrzeug

$$n_{ges} = \left\lceil \frac{E_{ges_{gew}}}{E_{zel}} \right\rceil \leq k \cdot \left\lceil \frac{E_{max}}{E_{zel}} \right\rceil$$

mit:

n_{ges} : Anzahl der Einzelzellen; $n \in N$

$E_{ges_{gew}}$: gewählte Energie des Gesamtfahrzeuges; $E_{ges} \in R$

E_{max} : maximale Energie pro Zellenbaustein; $E_{max} \leq 6MJ$ oder $E_{max} \leq 12MJ$

E_{zel} : Energie der Einzelzelle; $E_{zel} \in R$

k : Anzahl der Zelleinheiten; $k \in N$

Durch den Zusammenhang beider Gleichungen über n und k lassen sich aus den vorab gewählten Werten nutzbare Werte berechnen. Das Beispiel 1 verdeutlicht dieses Vorgehen.

Beispiel 1:

gewählt:
 $U_{ges_{gew}} = 600 V$

gegeben:
 $U_{Zel} = 3,6 V$
 $E_{Zel} = 0,072 MJ$

Gleichung 7: Beispiel Anzahl Akkuzellen durch Gesamtspannung

$$n_{ges} = \left\lfloor \frac{U_{ges_{gew}}}{U_{Zel}} \right\rfloor = \left\lfloor \frac{600 V}{3,6 V} \right\rfloor = [166, \overline{66}] = 166 \text{ Zellen}$$

Gleichung 8: Beispiel Anzahl Akkueinheiten

$$n_{ges} = k \cdot \left\lfloor \frac{120 V}{U_{Zel}} \right\rfloor \text{ mit } k = \left\lfloor \frac{n_{ges}}{\left\lfloor \frac{120 V}{3,6 V} \right\rfloor} \right\rfloor = \left\lfloor \frac{166}{33} \right\rfloor = 5$$

$$n_{ges} = 165$$

Gleichung 9: Beispiel errechnete Gesamtspannung

$$U_{ges} = n_{ges} \cdot U_{Zel} = 165 \cdot 3,6 V = 594 V$$

Unter Betrachtung der erforderlichen Energie ergibt sich nach Analyse der Verbrauchswerte bei der Formula Student Germany 2013, Abbildung 42 Anhang G ein Wert von $\sim 5 \text{ kWh}$. Dies entspricht dem Energiebedarf des DUT Racing Teams der TU Delft im Jahr 2013 und ist mit Renngeschwindigkeit gefahren worden. 5 kWh entsprechen 18 MJ . Mit einem 30 %-tigem Toleranzfenster ergibt sich eine benötigte Energiemenge von $23,5 \text{ MJ}$. Mit Gleichung 6 und den vorherigen Überlegungen ergibt sich ein neues n_{ges} :

gegeben:

$$k = 5$$

$$E_{Zel} = 0,072 MJ$$

Lithiom Ionen Zellen

Gleichung 6': Beispiel Anzahl Akkuzellen durch Gesamtenergie

$$n_{ges} = \left\lfloor \frac{E_{ges_{gew}}}{E_{Zel}} \right\rfloor \leq k \cdot \left\lfloor \frac{6 MJ}{E_{Zel}} \right\rfloor$$

$$n_{ges_E} = \left\lfloor \frac{E_{ges_{gew}}}{E_{Zel}} \right\rfloor = \left\lfloor \frac{23,5 MJ}{0,072 MJ} \right\rfloor = 326$$

$$n_{ges_P} \approx 2 \cdot n_{ges}$$

und

$$\frac{n_{ges}}{k} \cdot E_{Zel} \leq 6 MJ \rightarrow \frac{326}{5} \cdot 0,072 MJ = 4,6944 MJ \leq 6 MJ$$

Somit können durch Serien- und Parallelschaltungen die erforderlichen Werte erreicht werden. Die gesamte Batterieeinheit kann in fünf Bausteine untergliedert werden, die mit jeweils 33·2 Zellen ausgestattet sind. Dabei ist die maximale Energie der einzelnen Bausteine mit 4,69 MJ und einer Spannung von 118,8 V unter den vom Regelwerk vorgegebenen Maximalwerten. Die Kombination von unterschiedlichen Zellen ist in diversen Anordnungen möglich.

Die Spannung des Akkumulators muss für den Betrieb der Motoren durch eine Leistungselektronik geregelt und gesteuert werden. Die Leistungselektronik wandelt die Spannung, den Strom oder die Frequenz. Entsprechend der Anforderungen wird mit der Stromstärke und der Frequenz der Elektromotor angesteuert. Die Continental AG hat eine Leistungselektronik entwickelt, die für eine Dauerleistung von 20 kW ausgelegt ist, diese Leistungselektronik wiegt 8 kg und benötigt einen Bauraum von 5 L [ABO12]. Das Team der Westsächsischen Hochschule Zwickau fährt im Jahr 2012 mit einer Leistungselektronik die ebenfalls um die 8 kg wiegt Anhang B Leistungselektroniken haben je nach Ausführung typischerweise einen Wirkungsgrad von >95 %. Die Verlustleistung wird fast ausschließlich in Wärme umgewandelt und erhitzt das Bauteil sehr stark [FAM09]. Somit ist es notwendig, auch die Leistungselektronik entsprechend zu kühlen.

Die Masse für den Akkumulator und das Gehäuse kann zusammen auf ca. 60 kg, vgl. Anhang B, festgelegt werden. Die Kosten belaufen sich auf etwa 10.000 €. Hinzu kommen die Leistungselektronik mit etwa 10 kg sowie die Getriebe, Versorgungsleitungen und Motoren, mit etwa 60 kg. Damit wird sich eine ähnliche prozentuale Massenverteilung wie im aktuellen Fahrzeug des HAWKS Racing Teams, dem H09 Saison 2012/2013 einstellen, Abbildung 27.

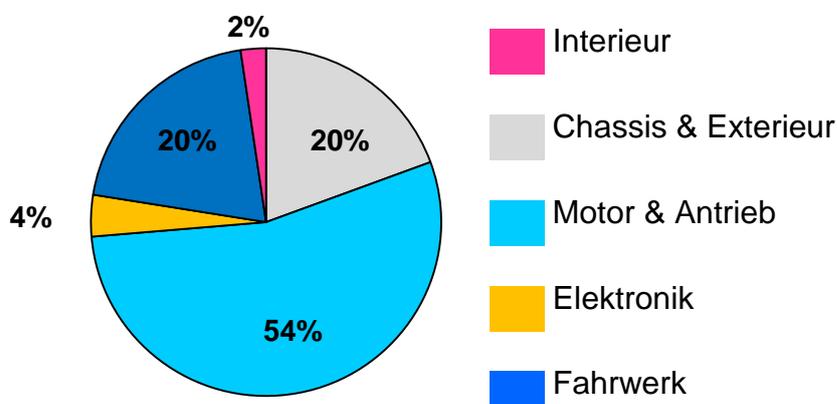


Abbildung 27: Diagramm Massenverteilung des H09

6. Umsetzung an der HAW Hamburg

Bei der Umsetzung eines Formula Student Electric Fahrzeuges sind neben den konzeptionellen Überlegungen, die Verwirklichung dieses Projektes an der Hochschule grundlegende Voraussetzungen, da das Projekt rein studentisch ist. Hierbei ist es wichtig, dass an der Hochschule alle Möglichkeiten geprüft und genutzt werden. Die HAW Hamburg mit den unterschiedlichen Departments der Fakultät Technik und Informatik weist eine umfangreiche Auswahl auf. So ist es notwendig die Interdisziplinarität des Teams auch auf die Zusammenarbeit der Departments auszuweiten. So können alle Laboreinrichtungen optimal bei der Umsetzung eines Formula Student Electric Fahrzeuges genutzt werden. Abgesehen von der Vermarktung und Finanzierung des Fahrzeuges sind hierbei die Departments Fahrzeugtechnik und Flugzeugbau, Informatik, Informations- und Elektrotechnik sowie das Department Maschinenbau und Produktion notwendig. Die einzelnen Departments besitzen für ihren Kompetenzbereich diverse Labore und Spezialisten, die bei der Umsetzung des Fahrzeuges behilflich sein können.

Zudem müssen in enger Zusammenarbeit mit der Hochschule Richtlinien für den Umgang mit elektrischen Systemen im Hochvoltbereich erarbeitet werden. Hierbei steht die Sicherheit der Teammitglieder, der Professoren, der Hochschulmitarbeiter und teamfremden Studierenden an erster Stelle. Dafür müssen bereits bestehende allgemeine Sicherheitsrichtlinien mit den HAW Sicherheitsrichtlinien kombiniert werden. Hierzu sind auch die Sicherheitsbestimmungen aus dem Formula Student Electric Regelwerk hilfreich und ergänzend.

Mit den in den vorherigen Abschnitten 4 und 5 ermittelten Anforderungen kann geprüft werden welche Labore notwendig sind und gegebenenfalls genutzt werden können. Hierbei ist es wichtig die gesetzlichen Bestimmungen zusammen mit den Richtlinien der Hochschule zu beachten.

Um die Gesamtheit der möglichen Konzeptlösungen nicht zu beschränken werden nicht alle Konzepte überprüft. Die Betrachtung beschränkt sich auf die vom Regelwerk der Formula Student Electric vorgegebenen Maximalwerte. So wird für die Spannungsversorgung ein Wert von $U = 600 \text{ V}$, die maximale Leistung $P = 85 \text{ kW}$ und die Energie des Akkumulators, nach Abschnitt 5.2 und Tabelle 5 Anhang C auf $E = 27 \text{ MJ} = 7,5 \text{ kWh}$ festgelegt.

6.1 Sicherheitsrichtlinien

Beim Umgang mit Elektrizität ist es, wie in allen anderen Bereichen, wichtig den Menschen vor Unfällen und Verletzungen zu schützen, da bei einem elektrisch angetriebenen Fahrzeug mit Spannungen im Hochvoltbereich gearbeitet wird.

In einem Gespräch mit dem Beauftragten für Arbeitsschutz-, Konflikt- und Umweltmanagement der HAW Hamburg, Herrn Michael Haselsberger stellte sich heraus, dass für diese speziellen Anforderungen in der Hochschule noch keine konkreten Sicherheitsrichtlinien existieren. Hieraus ergibt sich eine komplette Neuarbeitung solcher Richtlinien. Dabei muss im Vorfeld bekannt sein welche Rahmenbedingungen dieses Projekt haben wird. Danach muss ein Umsetzungsplan erstellt werden, der dann zusammen mit den Abteilungen der Hochschule detailliert wird. Sind alle offenen Fragen geklärt und die Ergebnisse dokumentiert sind Anträge zur Realisierung der Maßnahmen nötig. Als Grundlage der HAW Hamburg Sicherheitsrichtlinien für den Umgang mit Hochvoltssystemen an einem Formula Student Electric Fahrzeug können die BGV A3 (Berufsgenossenschaftliche Vorschrift für Sicherheit und Gesundheit bei der Arbeit A3 – Elektrische Anlagen) [BER97] sowie die BGI/GUV – 8686 (Berufsgenossenschaftlichen Informationen/ Gesetzliche Unfallversicherung 8686) [DEU12] dienen. Damit die zusammen mit der HAW Hamburg erarbeiteten Richtlinien nicht ständig angepasst werden müssen, empfiehlt es sich die maximal möglichen Werte des Regelwerkes zu nutzen und gleichzeitig mit der HAW Hamburg zu erarbeiten, in welchem Umfang die Richtlinien bei einer Unterschreitung der Maximalwerte abgewandelt werden können.

Die BGV A3 beschreibt die Unfallverhütungsvorschriften für elektrische Anlagen und Betriebsmittel sowie für die nichtelektrotechnischen Arbeiten in der Nähe solcher Anlagen, BGV A3 §1. Für die Umsetzung eines Formula Student Electric Fahrzeuges an der HAW Hamburg ist diese Richtlinie zu empfehlen, besonders die folgenden Ausführungen dieser Richtlinie sollten eingehalten werden.

Beim Arbeiten mit elektrischen Bauteilen ist besonders auf die angemessene und vollständige Isolierung gegen direktes Berühren zu achten, §4 Abs. 4. Hierdurch wird die Gefahr eines Stromdurchflusses oder Blitzschlages durch den menschlichen Körper reduziert. Es ist zum Beispiel auch hilfreich den Arbeitsbereich mit Isolationsmatte auszulegen und beim Arbeiten Sicherheitshandschuhe zu tragen

[VDI113]. Zudem muss beim Umgang mit den elektrischen Bauteilen sichergestellt sein, dass diese spannungsfrei sind, BGV A3 §4 Abs. 5. Hierzu ist es erforderlich ein Sichern gegen Wiedereinschalten zu ermöglichen, dazu zählen zum Beispiel abschließbare Schalter, deren Schlüssel an einem für Unbefugte unzugänglichen Ort aufbewahrt werden können. Bei ferngesteuerten Anlagen, zum Beispiel einem Motorenprüfstand, müssen Kennzeichnungen, Hinweise und Anweisungen so gestaltet sein, dass der Schaltzustand der Anlage und die Zuständigkeit eindeutig erkennbar ist, BGV A3 Durchführungsanweisung zu §4 Abs. 7. Dies muss ohne Gefährdung, zum Beispiel Körperdurchströmung oder Lichtbogenbildung möglich sein, BGV A3 §4 Abs. 7. Zusätzlich ist es notwendig die elektrische Anlage so zu schützen, dass auch bei indirektem Berühren keine gefährliche Berührungsspannung vorhanden ist. Um die Sicherheit zu gewährleisten ist vor Inbetriebnahme und in bestimmten Intervallen der Zustand der Anlage zu prüfen, BGV A3 §5 Abs. 1. Die Überprüfung vor Inbetriebnahme ist nicht notwendig, wenn die Anlage durch einen Hersteller oder Errichter entsprechend der BGV A3 beschaffen ist, BGV A3 §5 Abs. 4. Dies ist in diesem Projekt nicht zu ermöglichen, da zum Beispiel bei der Benutzung eines Prüfstandes für die Elektromotoren ein ständiger Auf- und Abbau erfolgt. Diese Umrüstarbeiten sind notwendig, um zum Beispiel verschlissene oder defekte Bauteile zu ersetzen oder die Durchführung von Laborversuchen im Rahmen des Studiums nicht zu behindern. Die Überprüfungsintervalle der elektrischen Betriebsmittel und Sicherheitseinrichtungen entsprechen somit denen von „Ortsveränderlichen elektrischen Betriebsmitteln“, BGV A3 §5 Durchführungsanweisung Abs. 1 Nr. 2. Eine Auflistung der Sicherheitsintervalle geben die folgenden Tabelle 2 und Tabelle 3 [BER97].

Tabelle 2: Überprüfungsintervalle von ortsveränderlichen elektrischen Betriebsmitteln

Anlage / Betriebsmittel	Prüffrist Richt- und Maximalwerte	Art der Prüfung	Prüfer
Ortsveränderliche elektrische Betriebsmittel (soweit benutzt)	Richtwert 6 Monate, auf Baustellen 3 Monate*)	auf ordnungsgemäßen Zustand	Elektrofachkraft, bei Verwendung geeigneter Mess- und Prüfgeräte auch elektronisch unterwiesene Person
Verlängerungs- und Geräteanschlussleitungen mit Steckvorrichtungen	Maximalwerte: Auf Baustellen, in Fertigungsstätten und Werkstätten oder unter ähnlichen Bedingungen ein Jahr		
Anschlussleitungen mit Stecker			
bewegliche Leitungen mit Stecker und Festanschluss	in Büros oder ähnlichen Bedingungen zwei Jahre		

*) Konkretisierung siehe BG-Information „Auswahl und Betrieb elektrischer Anlagen und Betriebsmittel auf Baustellen“ (BGI 608)

Tabelle 3: Überprüfungsintervalle von elektrischen Hilfsmitteln

Prüfobjekt	Prüffrist	Art der Prüfung	Prüfer
Isolierende Schutzbekleidung (soweit benutzt)	vor jeder Benutzung	auf augenfällige Mängel	Benutzer
	12 Monate 6 Monate für isolierende Handschuhe	auf Einhaltung der in den elektrotechnischen Regeln vorgegebenen Grenzwerten	Elektrofachkraft
Isolierende Werkzeuge, Kabelschneidgeräte; isolierende Schutzvorrichtungen sowie Betätigungs- und Erdungsstangen	vor jeder Benutzung	auf äußerlich erkennbare Schäden und Mängel	Benutzer
		auf einwandfreie Funktion	
Spannungsprüfer, Phasenvergleichler	6 Jahre	auf Einhaltung der in den elektrotechnischen Regeln vorgegebenen Grenzwerten	Elektrofachkraft
Spannungsprüfer, Phasenvergleichler und Spannungsprüfsysteme (kapazitive Anzeigesysteme) für Nennspannungen über 1kV			

Das Arbeiten in der Nähe der aktiven elektrischen Anlage regelt BGV A3 § 7. Hierbei ist es notwendig einen Abstand zu den aktiven Bauteilen von mindestens 0,5 m bei einer Spannung unter 1 kV zu wahren. Erfolgen die Arbeiten von nicht eingewiesenen Personen ist ein Mindestabstand von 1 m, bei einer Spannung unter 1 kV sicher zu stellen und dies zu beaufsichtigen. Die beaufsichtigende Person ist ausschließlich mit der Durchführung der Aufsicht betraut und darf nebenbei keine weitere Tätigkeit ausüben. Da nicht alle Arbeiten in den beschriebenen Rahmenbedingungen vorgenommen werden können und es immer Ausnahmesituationen geben wird, regelt die BGV A3 dies im § 8. Es wird tabellarisch festgehalten welche Arbeiten durch welche Personen durchgeführt werden können, Tabelle 4 [BER97].

EF – Elektrofachkraft

EUP – elektrotechnisch unterwiesene Person

L – elektrotechnischer Laie

Tabelle 4: ausführbare Arbeiten durch Personen

Nennspannung	Arbeiten	EF	EUP	L
bis AC 50 V bis DC 120 V	alle Arbeiten, soweit eine Gefährdung, z.B. durch Lichtbogenbildung, ausgeschlossen ist	x	x	x
über AC 50 V über DC 120 V	1. Heranführen von Prüf-, Mess- und Justiereinrichtungen, z.B. Spannungsprüfern, von Werkzeugen zum Bewegen leichtgängiger Teile, von Betätigungsstangen	x	x	
	2. Heranführen von Werkzeugen und Hilfsmitteln zum Reinigen sowie das Anbringen von geeigneten Abdeckungen und Abschrankungen	x	x	
	3. Herausnehmen und Einsetzen von nicht gegen direktes Berühren geschützten Sicherheitseinsätzen mit geeigneten Hilfsmitteln, wenn dies gefahrlos möglich ist	x	x	
	4. Anspritzen von unter Spannung stehenden Teilen bei der Brandbekämpfung oder zum Reinigen	x	x	
	5. Arbeiten an Akkumulatoren und Photovoltaikanlagen unter Beachtung geeigneter Vorsichtsmaßnahmen	x	x	
	6. Arbeiten in Prüfanlagen und Laboratorien unter Beachtung geeigneter Vorsichtsmaßnahmen, wenn es die Arbeitsbedingungen erfordern	x	x	
	7. Abklopfen von Raureif mit isolierenden Stangen	x	x	
	8. Fehlereingrenzung in Hilfsstromkreisen (z. B. Signalverfolgung in Stromkreisen, Überbrückung von Teilstromkreisen) sowie Funktionsprüfung von Geräten und Schaltungen	x	x	
	9. Sonstige Arbeiten, wenn a) zwingende Gründe durch den Betreiber festgestellt wurden und b) Weisungsbefugnis, Verantwortlichkeiten, Arbeitsmethoden und Arbeitsablauf (Arbeitsanweisung) schriftlich für speziell ausgebildetes Personal festgelegt worden sind	x		
bei allen Nennspannungen	Alle Arbeiten, wenn die Stromkreise mit ausreichender Strom- oder Energiebegrenzung versehen sind und keine besonderen Gefährdungen (z. B. wegen Explosionsgefahr) bestehen	x	x	x
	Arbeiten zum Abwenden erheblicher Gefahren, z. B. für Leben und Gesundheit von Personen oder Brand- und Explosionsgefahren	x		
	Arbeiten an Fernmeldeanlagen mit Fernspeisung, wenn Strom kleiner als AC 10 mA oder DC 30 mA	x	x	x

Die Richtlinie BGI/GUV-I 8686 benennt Qualifizierungen für das Arbeiten an Fahrzeugen mit Hochvoltssystemen. So werden die Verantwortlichkeiten erörtert, die elektrischen Gefährdungen durch Hochvoltssysteme im Fahrzeug aufgezeigt und die notwendigen Qualifizierungen für das Entwickeln und Arbeiten an Elektrofahrzeugen aufgelistet.

Die Verantwortung bei der Arbeit mit Hochvoltssystemen im Fahrzeugbereich ist durch eine Elektrofachkraft auszuüben. Eine Elektrofachkraft ist eine Person die aufgrund ihrer fachlichen Ausbildung Kenntnisse und Erfahrungen sowie Kenntnisse der einschlägigen Normen besitzt, BGI/GUV-I 8686 II. 1. Somit wird eine Elektrofachkraft für die Betreuung des Projektes benötigt. Dies deckt sich mit dem Regelwerk der Formula Student. Nach Abschnitt [SAE13] - A5.2 wird eine Elektrofachkraft benötigt, die zu jeder Zeit der Rennveranstaltung erreichbar sein muss und sich in der Nähe des Fahrzeuges aufhalten muss. Zudem ist diese Person dafür verantwortlich, dass das Fahrzeug elektrisch sicher ist. Diese Person muss ebenfalls die Qualifikation zur Ausübung dieser Tätigkeit besitzen, allerdings muss es für die Rennveranstaltungen ein Student sein.

Als Prämisse für den sicheren Umgang mit Hochvoltssystemen in Fahrzeugen gelten die „Fünf Sicherheitsregeln“ der BGI/GUV-I 8686 [DEU12]:

Vor Beginn der Arbeit

- freischalten
- gegen Wiedereinschalten sichern
- Spannungsfreiheit feststellen
- erden und kurzschließen
- benachbarte, unter Spannung stehende Teile abdecken oder abschränken.

Während der Arbeiten am Hochvoltsystem sind vom Sicherheitsverantwortlichen folgende Warntafeln gut sichtbar anzubringen Abbildung 28.



Abbildung 28: Warnhinweisschilder für das Arbeiten an Hochvolt-Fahrzeugen

Die Arbeiten an einem Hochvoltsystem in einem Fahrzeug lassen sich in einem Stufenmodell darstellen, BGI/GVU-I 8686 IV. 1.

Dabei sind Arbeiten der *Stufe 1* nichtelektrotechnische Arbeiten. Die Personen die diese Arbeiten durchführen dürfen, wurden auf die elektrischen Gefahren des Hochvoltsystems hingewiesen und haben eine Unterweisung zur bestimmungsgemäßen Verwendung des Fahrzeuges bekommen.

Arbeiten der *Stufe 2* sind elektrotechnische Arbeiten im spannungslosen Zustand. Es sind die Sicherheitsregeln zum Außer- und Wiederinbetriebnahme des Hochvoltsystems zu beachten. Diese Arbeiten dürfen von Personen ausgeführt werden, die über elektrotechnische Vorkenntnisse verfügen.

Das Arbeiten auf der *Stufe 3* erfordert die höchsten Ansprüche. Es wird unter Spannung am Hochvoltsystem gearbeitet, wodurch das höchste Gefahrenpotential besteht. Personen die diese Qualifikation aufweisen müssen fundierte theoretische elektrotechnische Kenntnisse sowie anwendungsbereite praktische elektrotechnische

Fertigkeiten besitzen. Zudem muss eine gesundheitliche Eignung und ein Mindestalter von 18 Jahren nachgewiesen werden.

Dieses Dreistufenmodell ist in Abbildung 29 [DEU12] dargestellt.

	Stufe 3	<i>zum Beispiel</i>
	Arbeiten unter Spannung am HV-System und Arbeiten in der Nähe berührbarer unter Spannung stehender Teile	- Fehlersuche - Bauteile unter Spannung wechseln
	Stufe 2	<i>zum Beispiel</i>
	- Spannungsfreiheit herstellen - elektrotechnische Arbeiten im spannungsfreien Zustand	- freischalten - gegen Wiedereinschalten sichern - Spannungsfreiheit feststellen - Tausch von HV-Komponenten - Stecker ziehen + Komponentenaustausch (z.B. DC/DC-Wandler, elektrische Klimaanlage)
Stufe 1	<i>zum Beispiel</i>	
nichtelektrotechnische Arbeiten	- Testfahrer - Karosseriearbeiten - Öl-, Radwechsel	

Abbildung 29: Dreistufenmodell für Arbeiten am Hochvolt-Fahrzeug

Um die Qualifikationen der einzelnen Personen am Arbeitsplatz mit Hochvoltssystemen zu erarbeiten bietet die BGI/GUV-I 8686 ein Flussdiagramm, das übersichtlich darstellt in welchem Umfang die jeweiligen Personen geschult werden müssen. Für das Arbeiten an einem Formula Student Electric Fahrzeug ist dies ebenso wichtig und muss für jedes Teammitglied individuell erarbeitet werden. So wird es immer Studierende im Team geben, die bereits über fundierte elektrotechnische Kenntnisse oder bereits elektrotechnische Qualifikationen besitzen

und ebenso Studierende die über keine dieser Fähigkeiten verfügen. Das Flussdiagramm, Abbildung 30 nach [DEU12], ermittelt einen ersten Ansatz zur Schulungsdauer, diese wird mit der Einheit UE für Unterrichtseinheit, à 45 min angegeben.

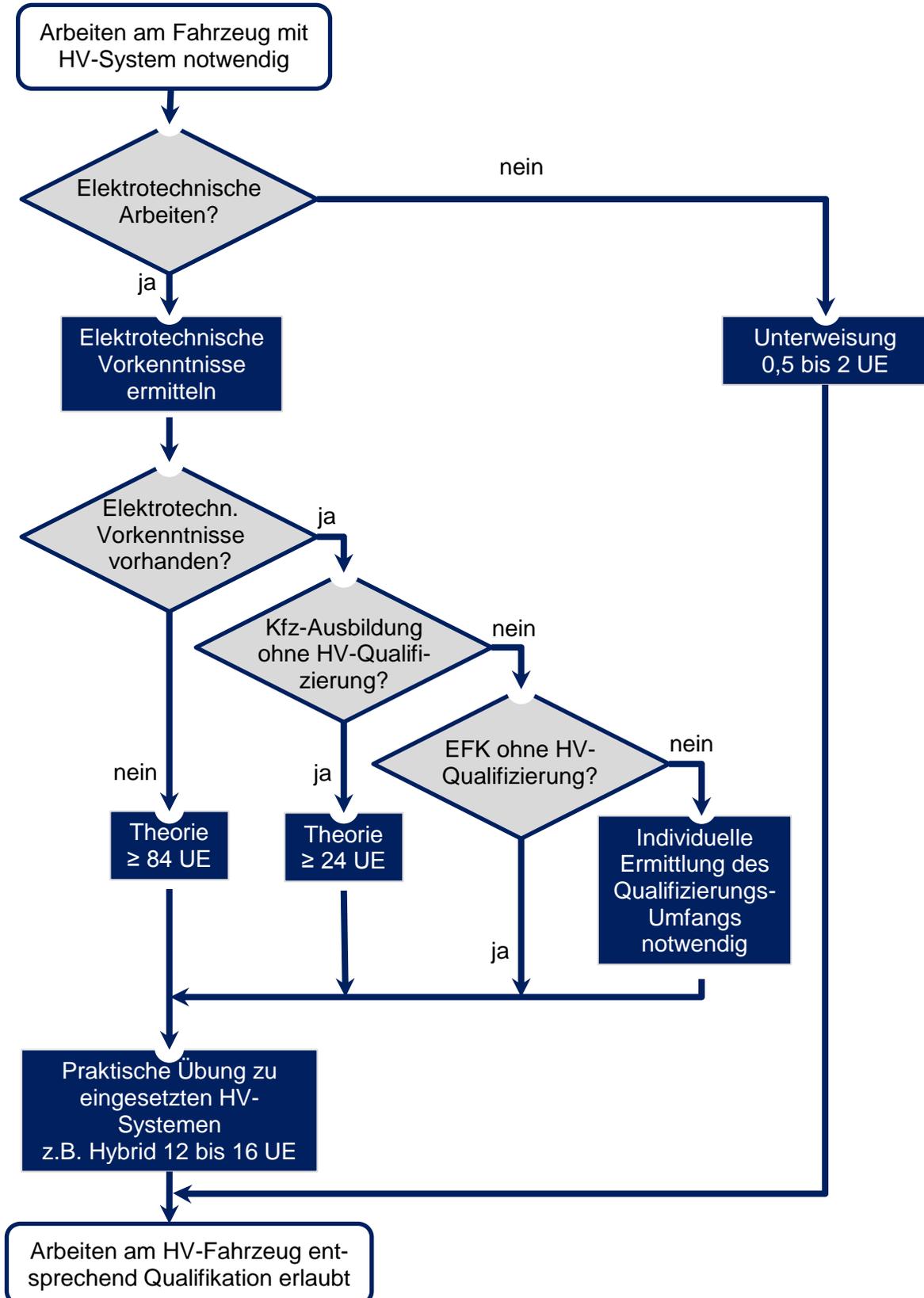


Abbildung 30: Flussdiagramm zur Schulung von Mitarbeitern

Die Berücksichtigung der erörterten Normen, zusammen mit dem Regelwerk der Formula Student Electric bildet eine gute Grundlage zur Erarbeitung von Sicherheitsrichtlinien. Jedoch müssen hier auch weitere Richtlinien zur Arbeitssicherheit, zum Beispiel zur Lärm- und Vibrationsbelastung (BGI I Nr. 8) und zur elektromagnetischen Verträglichkeit (2004/108/EG) herangezogen werden, um umfangreich sicherzustellen, dass es zu keiner Gefährdung von Personen kommen kann. Des Weiteren müssen die allgemeinen und speziellen Sicherheitsrichtlinien beim Arbeiten in den unterschiedlichen Laboren und Werkstätten eingehalten werden.

6.2 Prüfstände

Bei der Integration von neuen Technologien ist es wichtig die entwickelten Bauteile zu prüfen und anzupassen. Bei der Entwicklung eines Formula Student Electric Fahrzeuges werden für die elektrotechnischen Bauteile unterschiedliche Prüfstände benötigt, um bereits im Vorhinein Leistungsdaten und Fehlerquellen zu ermitteln und einzustellen. Die mechanischen Tests der restlichen Baugruppen werden nicht betrachtet. Die Elektromotoren sollten auf einem Motorenprüfstand mit entsprechender Messtechnik ausgiebig geprüft werden. Der Energiespeicher sollte auf einem Leistungsprüfstand erprobt werden, hierzu sollten die Akkumulatoren bei maximaler Leistung auf Temperaturentwicklung und Tiefentladung überprüft werden, damit sich im späteren Fahrbetrieb keine Unannehmlichkeiten ergeben. Die Steuerung dieser Systeme erfolgt im Fahrzeug über die Leistungselektronik, die ebenfalls einigen Tests unterzogen werden sollte. So wird auch die Leistungselektronik im Rennbetrieb eine gewisse Temperatur erreichen, die durch aktive Kühlung zu kompensieren sein wird. Des Weiteren sollten Versuche durchgeführt werden, die die fehlerfreie Funktion der Bauteile der Leistungselektronik auf Vibrationen und Schläge untersucht. Die hierzu benötigten Prüfstände werden im Weiteren näher erläutert.

- Motorenprüfstand
- Batterieprüfstand
- Hydropulser

6.2.1 Motorenprüfstand

Die Fakultät Technik und Informatik besitzt diverse Motorenprüfstände für Elektromotoren und Verbrennungsmotoren. Allerdings sind die Prüfstände für Elektromotoren im Department Informations- und Elektrotechnik für Maschinen bis maximal 5 kW geeignet, dies stellte sich bei einem persönlichen Gespräch mit Prof. Röther heraus. Dieser Prüfstand wurde bereits im Zuge anderer Abschlussarbeiten genutzt, zum Beispiel für die „[...] Windenergie-Netzeinspeisung mit doppelt gespeistem Asynchrongenerator [...]“ [WEI12]. Die in dieser Arbeit aufgelisteten Werte zeigen zwar für die Betriebsspannung einen Wert von 400 V, allerdings auch die geringe Leistung von 5 kW der Maschine.

Bei einem Konzept mit einem Elektromotor wird die maximale Leistung etwa 85 kW betragen und bei der Entwicklung eines Allradkonzeptes etwa 20 kW. Somit ist die Leistungen der verwendbaren Elektromotoren für das Formula Student Electric Fahrzeug deutlich über dem Maximalwert des Elektromotorenprüfstandes und es muss eine andere Lösung gefunden werden.

Der Motorenprüfstand im Department Fahrzeugtechnik und Flugzeugbau kann deutlich größere Leistungen verarbeiten. Der Prüfstand besteht aus einer Wirbelstrombremse, Versorgungseinrichtungen und Messelektronik. Die Wirbelstrombremse Alpha 240 der Firma AVL GmbH kann eine maximale Leistung von 240 kW und ein maximales Drehmoment von 600 Nm bremsen [DYN12]. Diese Wirbelstrombremse ist geeignet, um die Motoren zu testen. Jedoch ist es auf diesem Prüfstand, aufgrund des Wirkprinzipes der Wirbelstrombremse, nicht möglich die Motoren über die Ausgangswelle anzutreiben. Somit ist ein Testen von Energierückgewinnungssystemen nicht möglich. Soll ein Energierückgewinnungssystem in das Fahrzeug integriert werden, wird ein anderer Prüfsandaufbau benötigt. Es ist zum Beispiel möglich den zu testenden Motor in zweifacher Ausführung zu beschaffen und die Motoren mit einander zu kombinieren. Der eine Motor dient dann im Lastfall als Bremse und bei Lastunterbrechung als Antrieb.

Die Versorgung des Prüfstandes mit den erforderlichen Spannungen und Strömen, unter der Annahme, dass der Motor mit 600 V Gleichstrom betrieben werden soll, ist nur über die Erweiterung der vorhandenen Anlage zu realisieren. Hierzu ist es

notwendig, die Spannungsversorgung des Hausnetzes mit einem Spannungswandler oder Frequenzumrichter in die benötigte Betriebsspannung zu wandeln. Hierzu ist es erforderlich eine feste Einrichtung zur Änderung der Versorgungsspannung zu installieren. Aufgrund der Lage des Hausanschlusses im Untergeschoss des Fahrzeuglabors Berliner Tor 9 ist es sinnvoll dort den Spannungswandler oder den Frequenzumrichter zu positionieren, da so die Wege zum Hausanschluss kurz und schon passende Fundamente vorhanden sind. Die Abmaße eines entsprechenden Spannungswandlers sind etwa 2000x1600x800 mm, HxBxT, und können neben bereits vorhandenen Einrichtungen installiert werden. Abbildung 31 zeigt einen möglichen Platz für die Installation eines Spannungsumwandlers.



Abbildung 31: mögliche Position eines Spannungsumwandlers

Von dieser Position aus müssen dann noch etwa 60 m Weg mit abgeschirmten Kabeln überbrückt werden, um zum Motorenprüfstand zu gelangen. Die Installation des Wandlers direkt im Motorenprüfstand ist nicht zu empfehlen, da die Kabelstrecke aufgrund der Position des Hausanschlusses, gleich ist und die Messelektronik eventuell durch den Wandler negativ beeinflusst wird. Zudem ist im Raum des Motorenprüfstandes kaum genug Platz für solch einen Wandler. Die Motorsteuerung kann durch einen Frequenzumrichter erfolgen.

Ein Frequenzumrichter für diese Leistung und Spannung wird zum Beispiel von der Sourcetric GmbH angeboten. Die Kosten eines solchen Umrichters belaufen sich auf ca. 4500 € [SOU13].

Bei der Verwendung eines Energierückgewinnungssystems muss die erzeugte Energie der zu testenden Elektromotoren abgeführt werden. Im besten Fall kann die Energie wieder in das Stromnetz eingespeist werden. Hierfür muss die Anlage entsprechend konzipiert werden und die Rückspeisung ist mit dem Netzbetreiber zu diskutieren. Weiterhin muss in einem Gespräch mit dem Netzbetreiber, die Kompensation der, durch den Betrieb des Elektromotors, entstehende Blindleistung abgeklärt werden. Es kann zum Beispiel durch den Betrieb einer Asynchronmaschine eine Überspannung an Leitungen und elektrischen Verbrauchern entstehen.

Die Versorgung innerhalb des Raumes des Prüfstandes muss über eine sichere Steckverbindung erfolgen können. Diese Steckverbindungen sind von einer Fachfirma zu installieren und sollten den höchsten Sicherheitsstandards entsprechen, damit die Betätigung dieser Stecker auch durch elektrotechnische Laien nicht zu einer Personengefährdung führen kann.

Die Versorgung der Elektromotoren mit Kühlwasser stellt im Motorenprüfstand des Fahrzeuglabors keine Problematik dar, da über die Anlage auch Verbrennungsmotoren mit zum Beispiel 90 kW Leistung (VW Motor) auf dem Prüfstand betrieben werden und Elektromotoren einen deutlich höheren Wirkungsgrad gegenüber Verbrennungsmotoren aufweisen.

Die Installation des Umrichters, der Kabel und der Anschlüsse muss, nach Genehmigung, durch das Facility Management der HAW Hamburg beauftragt werden und durch eine Fachfirma ausgeführt werden. Die Abnahme der elektrischen Anlage muss ebenfalls durch Fachpersonal erfolgen.

Es ist zu erkennen, dass die Ausstattung beziehungsweise Umrüstung des Motorenprüfstandes im Fahrzeuglabor Zeit, Aufwand und Kosten verursacht. Dies muss in der Zeitplanung zur Umsetzung eines Formula Student Electric Fahrzeuges berücksichtigt werden.

6.2.2 Batterieprüfstand

Die Verwendung von lithiumbasierten Batteriesystemen erfordert eine genaue Kenntnis über das Verhalten dieser Batterien beim Laden und Entladen, um einen Ladezyklus zu ermitteln und die Batterien im Betrieb nicht zu beschädigen. Hierzu wird ein Prüfstand benötigt, der optimaler Weise den kompletten Akkumulator testen kann, damit ein sehr realitätsnahes Verhalten erprobt werden kann. Hierbei sind die

Lade- und Entladezustände der einzelnen Zellen sowie die Temperaturentwicklung dieser zu ermitteln und zu überwachen. Dies erfolgt im eigentlichen Formula Student Electric Fahrzeug, durch das Regelwerk vorgeschrieben, ebenso. Es ist also auch hier wichtig dies im Vorfeld zu überprüfen und damit aussagekräftige Ergebnisse zu ermitteln. Durch solche Versuchsaufbauten können im Fahrzeugbetrieb auch die gemessenen Werte besser analysiert und auf Plausibilität überprüft werden.

Im Department Maschinenbau und Produktion wurde ein Testaufbau erprobt, der bei einzelnen Zellen die Temperaturentwicklung beim Laden und Entladen dokumentiert. Der Versuchsaufbau erfolgte mit Zellen des Typs 18650, diese Lithium-Ionen Zellen haben eine Spannung von 3,7 V, eine Kapazität von 2100 mAh und einen Energiegehalt von maximal 7,77 Wh. Die Testergebnisse zeigen in Abbildung 32, dass sich die Zellen abhängig vom Entladestrom auf bis zu 50 °C erhitzen (36). Die Zelle wurde nicht aktiv gekühlt sondern nur durch die Umgebungstemperatur, Abbildung 33.

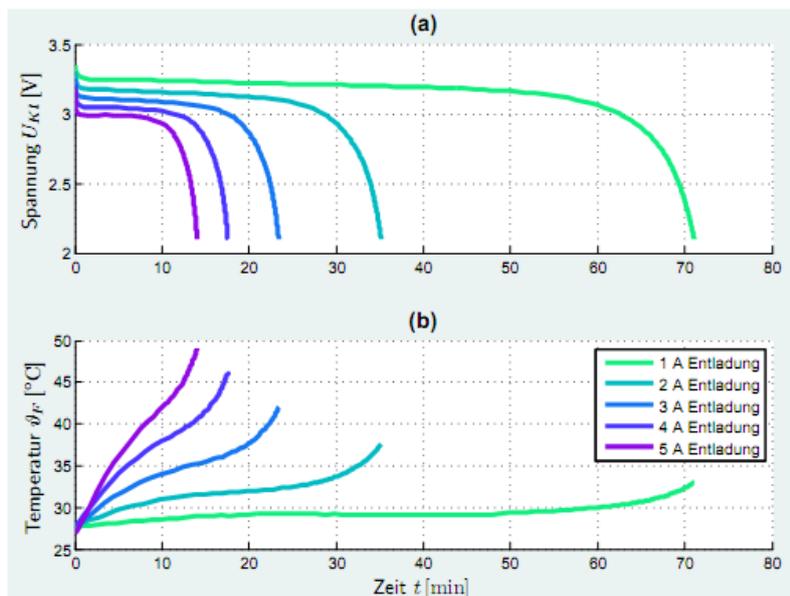


Abbildung 32: Messergebnisse Typ 18650 Zelle

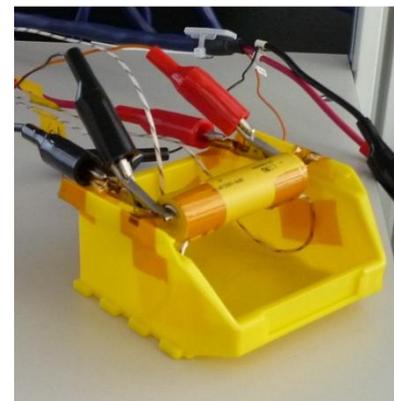


Abbildung 33:
Versuchsaufbau

Diese Temperatur kann bei einer kompakten Bauweise aus mehreren Zellen weiter ansteigen, wenn die Kühlung nicht aktiv erfolgt. Bei zu hohen Temperaturen können die polymeren Separatorschichten der Akkumulatoren schmelzen und es entsteht ein Kurzschluss in der Akkumulatorzelle, der bis hin zu einem Brand führen kann. Die aufgenommenen Werte für die Temperaturverläufe in Abhängigkeit zur Entladespannung wurden in ein Simulationsmodell eingepflegt. Es konnte eine Temperaturverteilung bei 11 Zellen simuliert und mit zwei redundanten

Versuchsaufbauten verifiziert werden. Jedoch sind für die Modellbildung mit aktiver Kühlung neue Betrachtungen in der Vernetzung und Strömungssimulation notwendig [UPT11]- Schlussbetrachtung.

Weiterhin ist im Department Maschinenbau und Produktion ein Batterieprüfstand, auf dem einzelne Zellen oder Batteriepakete getestet werden können. Hierbei können unterschiedliche Lade- und Entladezyklen überprüft werden. Die Zellspannungen werden dementsprechend überprüft und geregelt sowie die Temperaturen überwacht. Die Batterien sind separat und sicher positioniert. Der Prüfstand ist für eine Betriebsspannung von bis zu 60 V ausgelegt und somit schlecht für das Batteriepaket des HAWKS Racing e.V. geeignet. Es können allerdings einzelne kleinere Bausteine getestet und somit Simulationsergebnisse verifiziert werden.

Des Weiteren werden im Department Informations- und Elektrotechnik Versuche mit drahtlosen Sensoren zur Batterieüberwachung durchgeführt. Das Projekt BATSEN – Drahtlose Sensoren für Fahrzeug-Batterien verwendet Sensoren die in jeder einzelnen Zelle verbaut sind, um die Spannungen beim Laden und Entladen zu kontrollieren. Die Daten werden drahtlos an das Steuergerät gesendet. Dadurch lassen sich Unmengen an Messkabeln und Steckern einsparen. Prototypen dieses Systems werden bei Traktionsbatterien¹¹ in Flurförderfahrzeugen bei einem Industriepartner getestet. Hierbei handelt es sich um Blei-Akkumulatoren mit 40 Zellen [BAT11]. Diese Technologie kann ebenfalls in einem Formula Student Electric Fahrzeug verwendet werden, da die Akkumulatoreinheit über ein intelligentes Batteriemanagementsystem verfügen muss. Hierbei wäre eine Erweiterung des BATSEN Projektes durch Temperatursensoren wünschenswert.

Die HAW Hamburg bietet in ihren unterschiedlichen Fachbereichen einige Möglichkeiten um Akkumulatoren zu testen. Ein Prüfstand für die speziellen Anforderungen einer Akkumulatoreinheit für ein Formula Student Electric Fahrzeug ist noch nicht vorhanden. Es sollte jedoch möglich sein die vorhandenen Labore so anzupassen oder zu erweitern, dass eine solche Akkumulatoreinheit überprüft werden kann.

¹¹ Als Traktionsbatterie [...] wird eine Zusammenschaltung von einzelnen Akkumulatorenzellen oder Blöcken als Energiespeicher zum Antrieb von Elektrofahrzeugen bezeichnet [Wikipedia Traktions]

6.2.3 Hydropulser

Der Einstempel-Hydropulser im Fahrzeuglabor kann für Tests der Zuverlässigkeit der Leistungselektronik verwendet werden. Mit dem Einstempel-Hydropulser lassen sich unter anderem Beschleunigungen auf Bauteile ausüben. Dies ist insbesondere wichtig, um die fehlerfreie Funktion der elektronischen Bauteile im Rennbetrieb zu simulieren. Die Beobachtung von mehreren Teams bei der Veranstaltung Formula Student Germany hat gezeigt, dass bei schnellen Stößen, die durch Bodenwellen der Strecke hervorgerufen werden, einige Fahrzeuge die Spannungsversorgung unterbrechen. Dies weist auf eine Anfälligkeit der Leistungselektronik auf hohe Beschleunigungen hin. Daher sollten die unterschiedlich gerichteten Beschleunigungen die in einem Fahrzeug auftreten separat und teilweise kombiniert simuliert werden.

Der Einstempel-Hydropulser hat eine Aufnahme mit acht Verschraubungen und kann eine maximal Last von 100 kN aufbringen. Die Abbildung 34 zeigt die Anlage und die Verschraubung.

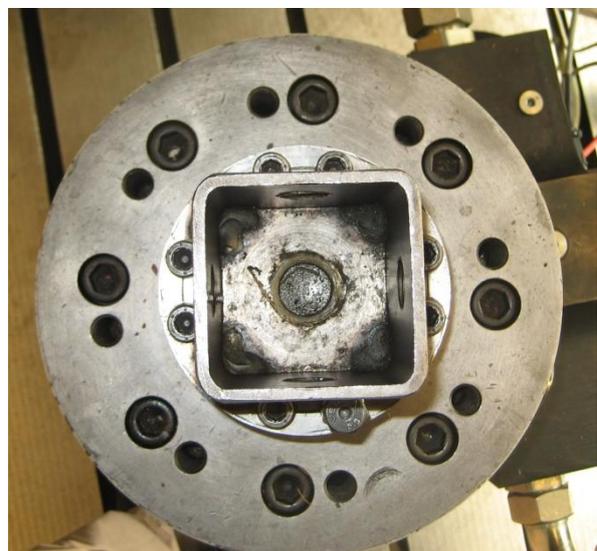


Abbildung 34: Einstempelhydropulser im Fahrzeuglabor der HAW Hamburg, mit 8-Punkt Verschraubung

In Abbildung 35 sind die Kennlinien unter Leerlauf und unter Last eingezeichnet. Die Kurve unter 100 kN Last zeigt, dass der Einstempel-Hydropulser etwa eine Beschleunigung von 40 g, bei einer Frequenz von 200 Hz und einer Kolbenamplitude von 0,4 mm erzeugen kann. Die aus dem Eigengewicht der Leistungselektronik und der zu testenden Beschleunigung kann ein Wert für die maximale Kraft errechnet werden. Diese Kraft darf die maximalen 100 kN nicht überschreiten.

Kennlinie des 100kN -Hydraulikzylinders des Fahrzeuglabors an der HAW

Kurve A: Leerlauf

Kurve B: Volllast

maximale Amplitude $\hat{s} = \pm 125\text{mm}$

$s(t) = \hat{s} \cdot \sin(\omega t)$

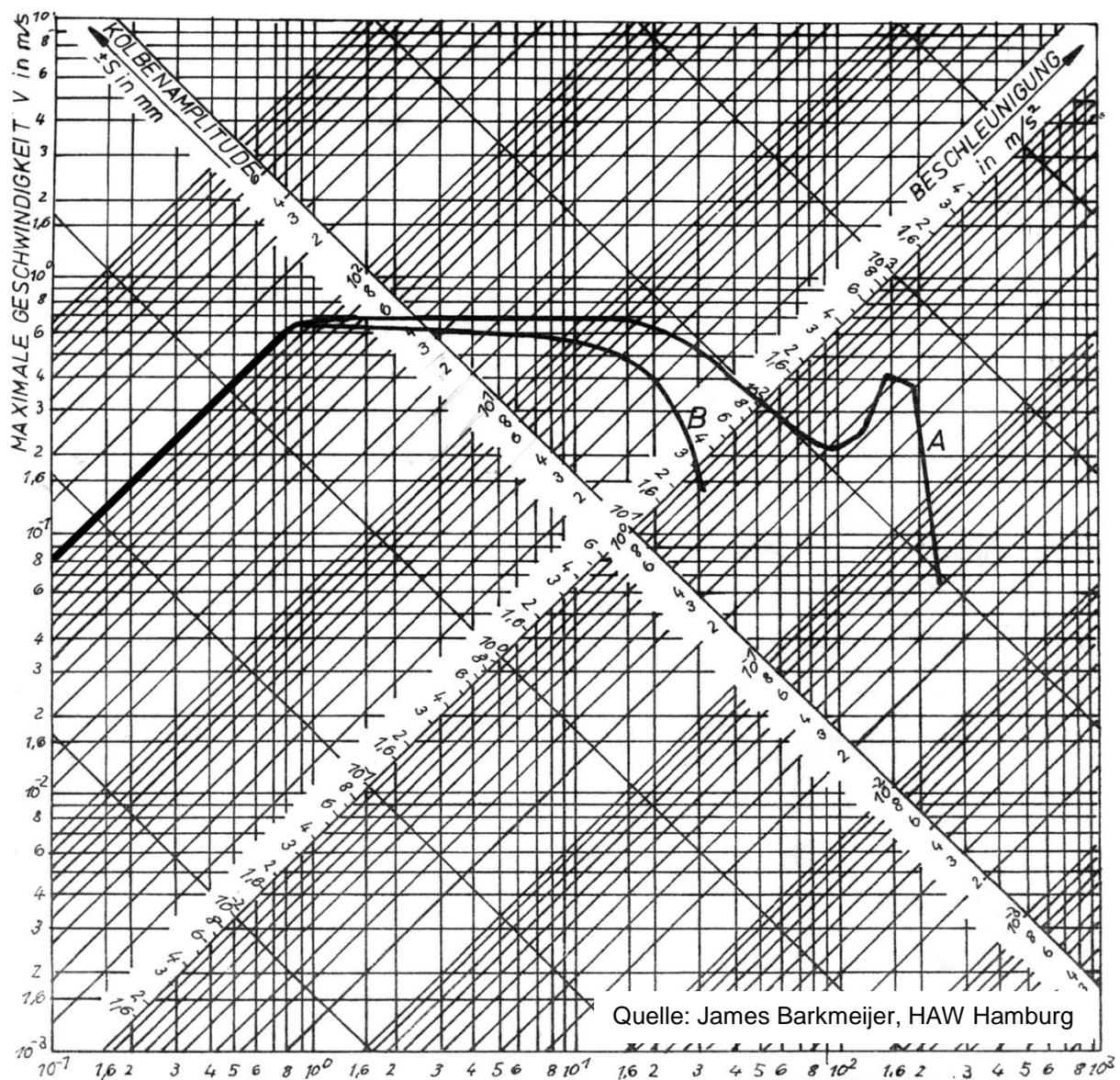


Abbildung 35: Diagramm mit Kennlinien des Einstempel-Hydropulsers

Es ist notwendig ein Gestell zu entwerfen, in dem die Leistungselektronik auf den Einstempel-Hydropulser geschraubt werden kann. Es ist zu empfehlen mehrere Anschraubpunkte vorzusehen, um Beschleunigungen in X-, Y-, und Z-Richtung sowie daraus kombinierte Richtungen zu testen, Abbildung 36. Das Gestell sollte mit Beschleunigungssensoren ausgestattet sein und zusätzlichen Beschleunigungssensoren, die auf der Leistungselektronik an markanten Punkten angebracht werden können, versehen werden.

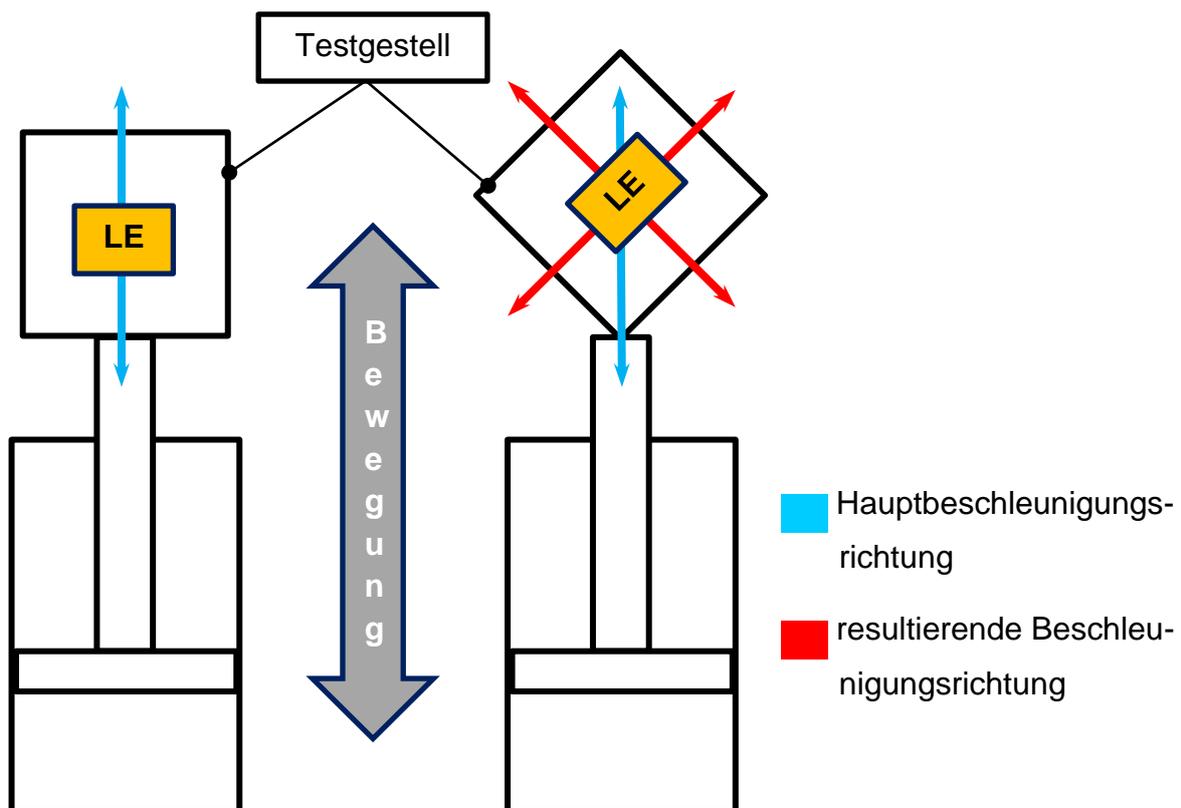


Abbildung 36: schematischer Aufbau Hydropulser mit Testgestell

Für einen realitätsnahen Versuchsaufbau ist es notwendig die Leistungselektronik wie im Fahrzeug verbaut zu betreiben. Das heißt, dass eine Spannungsversorgung, ein lastaufnehmendes Modul, eine Steuerung und eine Kühlung erforderlich sind. Dies führt zu einer Erweiterung der elektrischen Anlagen aus Abschnitt 6.2.1 und muss durch Steuereinrichtungen und Kühlkreisläufe erweitert werden. Die Versorgung der Leistungselektronik beim Versuch muss über bewegliche Leitungen erfolgen, die diese Bewegungen und Beschleunigungen ertragen können, um Beschädigungen vorzubeugen.

6.3 Zugang zu Laboren

Die Prüfstände der HAW Hamburg sind unterschiedlichen Laboren zugeordnet. Für die Benutzung der Prüfstände durch das HAWKS Racing Team muss sich das Team mit diesen Laboren arrangieren. Die Labore werden in der Regel für die Ausbildung an der HAW Hamburg genutzt und sind so nicht jederzeit für das HAWKS Racing Team zugänglich. Damit der geregelte Laborbetrieb nicht beeinträchtigt wird, muss mit den jeweiligen Laborleitern abgestimmt werden in welchem Umfang und zu welchen Zeiten und Bedingungen das HAWKS Racing Team die Prüfstände nutzen darf.

Da die Arbeiten des HAWKS Racing Teams ausschließlich von Studenten durchgeführt werden ist die zeitliche Abstimmung mit den Laboren häufig ein Problem. Bei der Benutzung der Labore müssen meist Mitarbeiter der Hochschule anwesend sein und diese haben geregelte Arbeitszeiten. So ergibt sich normalerweise eine mögliche Benutzung der Laboreinrichtungen und dadurch auch der Prüfstände zwischen 7:00 und 16:00 Uhr. Allerdings finden die Vorlesungen im selben Zeitraum statt und können so teilweise nicht von den Studierenden wahrgenommen werden. Die Hauptnutzungszeit der Prüfstände sollte somit in die Semesterferien verlegt werden. Hierfür ist eine genaue Zeitplanung des HAWKS Racing Teams aber ebenso der Hochschulmitarbeiter notwendig, damit auch in den Semesterferien andere Projekte und Laborversuche durchgeführt werden können. Bei Gesprächen kann dies für beide Seiten vorteilhaft und mit geringstem Aufwand kommuniziert werden.

7. Umsetzung bei HAWKS

Das HAWKS Racing Team ist ein studentisches Projekt, das Rennfahrzeuge für die Rennserie Formula Student entwickelt. Bei der Umsetzung eines Elektrofahrzeuges an der Hochschule muss auch das Team an die neuen Umstände angepasst werden. Es ist ein erhöhtes Augenmerk auf die Sicherheit der Teammitglieder, Mitarbeiter der Hochschule und andere Studierende zu legen. Hinzu kommt, dass die Verwendung eines alternativen Antriebskonzeptes teilweise völlig neue Anforderungen an das Team und ebenso an die Hochschule stellt. Der HAWKS Racing e.V. muss die Aufgabe übernehmen die neuen Anforderungen zu erfüllen und durchzusetzen. Hierbei muss der Verein eng mit der Hochschule zusammenarbeiten und konkrete Vorhaben schildern, planen und vorantreiben. Das ist eine Grundvoraussetzung, um ein Fahrzeug für die Formula Student Electric erfolgreich zu entwickeln und zu bauen.

Das Team muss die Möglichkeiten der Lehre an der HAW Hamburg sehr gezielt nutzen und auch mit der Professur zusammenarbeiten und sich austauschen. Es ist erforderlich die Interdisziplinarität weiter zu steigern und den Bereich der Elektrotechnik besser einzubinden.

7.1 Sicherheitsrichtlinien von HAW und intern bei HAWKS

Das HAWKS Racing Team hat im Jahr 2010 einen gemeinnützigen Verein gegründet und handelt seit dem auf der Grundlage der Satzung [HAW10] und Geschäftsordnung des Vereins. Hieraus ergibt sich ein eigenverantwortliches Handeln des Vereins. Ebenso obliegt die Einhaltung von Sicherheitsrichtlinien auch der Verantwortung des Vereins. Da die Vorstandsmitglieder des Vereins für den Verein haften ist darauf zu achten, dass insbesondere Personenschäden ausbleiben. Dies muss allen Teammitgliedern verdeutlicht werden. Es sind Hilfestellungen und Arbeitsanweisungen aufzulisten, die auch die gesetzliche Arbeitssicherheit beinhalten.

Das Team muss sich bereits vor Beginn der Entwicklung eigene Sicherheitsrichtlinien erstellen, hierbei sind die Richtlinien der Industrie und elektrotechnischen Vereine als grundlegender Bestandteil zu nutzen. Diese Richtlinien sollten mit den Sicherheitsregeln des Formula Student Electric Regelwerkes kombiniert werden. Außerdem

müssen für die zur Verfügung stehenden Räumlichkeiten der HAW Hamburg spezielle Sicherheitsbestimmungen erarbeitet werden, siehe Anhang B Greenteam.

7.2 Sicherheitslehrgänge

Eine optimale Vorbereitung auf den Umgang mit Hochvoltsystemen im Fahrzeug bieten Lehrgänge zu diesem Thema. Hierbei kann das Team auf Sponsoren wie den VDE - Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e.V. und den DEKRA e.V. zurückgreifen. Der DEKRA e.V. bietet Lehrgänge für die Sicherheit der Formula Student Electric Fahrzeuge an [UPT11] und ist zudem auch Teil der Organisation der Formula Student Veranstaltung in Deutschland. Hier überprüft der DEKRA e.V. alle Fahrzeuge auf ihre Sicherheit und ist somit ein sehr guter Partner, um im Vorfeld auf die Gefahren hinzuweisen, diese zu thematisieren und zu vermeiden.

Der VDE engagiert sich ebenso stark für Lehrgänge im Bereich der elektrischen Fahrzeuge [VDE13]. Hierbei werden Fortbildungsmaßnahmen für das Arbeiten mit Hochvoltsystemen in Fahrzeugen angeboten.

Der Veranstalter der Formula Student Germany biete ebenso Möglichkeiten zur Weiterbildung speziell für die Formula Student Electric an.

Diese Seminare und Fortbildungen müssen bereits vorab besucht werden, da nur so eine genaue Einschätzung über den Umfang der vorzubereitenden Maßnahmen getroffen werden kann. Im Verlauf des Projektes sollten weiter Lehrgänge besucht werden. Es ist zu empfehlen eine Auswahl an Teammitgliedern an diesen Seminaren teilnehmen zu lassen, da meist die Teilnehmeranzahl beschränkt oder die Teilnahme kostenpflichtig ist. Allerdings sollten nicht nur die Teammitglieder der elektrotechnischen Baugruppen diese Lehrgänge besuchen, sondern auch Mitglieder die in unmittelbarem Zusammenhang mit den Hochvoltsystemen entwickeln und arbeiten. Hierzu zählen Mitglieder des Antriebsstranges, des Fahrwerkes und der mechanischen Unterbringung des Energiespeichers. Um eine eindeutige Hierarchie bei den Arbeiten am Fahrzeug zu schaffen müssen die Teammitglieder in unterschiedliche Stufen der Arbeitsaufgaben eingeteilt werden. Diese Stufen sind sinnvoll wie in Abbildung 29 im Abschnitt 6.1 auszuführen. Je nach Einstufung muss jedes Mitglied entsprechend seiner Fähigkeiten für die Arbeit geschult werden. Um die Sicherheit weiterhin zu gewährleisten müssen jedem Teammitglied, unabhängig

der Einstufung alle Gefahren im Umgang mit Hochvolt-Systemen erläutert und dies schriftlich festgehalten werden.

Neben der Sicherheit innerhalb der HAW Hamburg muss das Team auch Lehrgänge besuchen und mindestens eine Elektrofachkraft ausbilden, die während des Testens und bei Veranstaltungen für die Sicherheit sorgt. Das Regelwerk schreibt vor, dass während einer Veranstaltung diese Person bei allen Bewegungen des Fahrzeuges dabei sein muss. Diese Person ist die einzige, die das Fahrzeug, abgesehen von den Inspektoren der Veranstaltung, als elektrisch sicher einstufen darf. Der Beauftragte für die Sicherheit muss eine reguläres Teammitglied mit Studentenstatus sein und speziell sowie zertifiziert für Hochvolt-Systeme in Fahrzeugen geschult sein [SAE13] - A5.2. Des Weiteren ist eine Person notwendig die für die Beratung zuständig ist. Dies muss eine Person sein, die beruflich mit Elektrotechnik zu tun hat. Es ist zu empfehlen hierfür einen weiteren betreuenden Professor aus dem Department Informations- und Elektrotechnik zu akquirieren. Diese Person ist für die Überprüfung und Richtigkeit der vor der Veranstaltung einzusendenden Informationen und Formblätter zuständig und muss an der Veranstaltung teilnehmen. Es ist möglich, dass dieser Berater gleichzeitig der allgemeine Berater ist [SAE13] - A5.3.

Allerdings ist die intensive Schulung der HAWKS Racing e.V. Mitglieder nicht ausreichend, um alle Bereiche der Sicherheit abzudecken. Es muss auch eine intensive Schulung der betreuenden Hochschulmitarbeiter erfolgen.

7.3 Umbaumaßnahmen

Wie bereits im Abschnitt 6.2.1 beschrieben, werden für die sichere Verwirklichung eines elektrisch betrieben Formula Student Fahrzeuges einige Veränderungen an den Räumlichkeiten notwendig sein. In diesem Abschnitt wird beschrieben auf welche Veränderungen das HAWKS Racing Team Wert legen muss, um sich selbst abzusichern.

Die wichtigste Maßnahme ist die Sicherung beim Umgang mit dem Energiespeicher. Dieser muss in einem separaten, verschließbaren, isolierenden Behältnis aufbewahrt werden, um einen unbeabsichtigten Kontakt zu vermeiden. Die beste und sicherste Lösung wäre ein separater Raum zur Lagerung sowie zum Arbeiten am Energiespeicher. Hierfür sollte sich ein Beispiel an der Westsächsischen Hochschule

Zwickau genommen werden. Herr Sebastian Zapf vom WHZ Racing Team beschreibt die „[...]Lagermöglichkeiten[...]momentan auf dem höchsten Stand[...]“, siehe Anhang B – 22 (Stand 10.2012). Die Lagerräume für die Batterien sind in einem Container auf dem Hochschulgelände, die Räume sind klimatisiert und mit entsprechender automatischer Löschtechnik ausgestattet. Die Räume zum Arbeiten an den Batterien befinden sich in Wohncontainern, die ebenfalls klimatisiert und mit Handlöschgeräten ausgestattet sind. Die Ausstattung dieser Räumlichkeiten wurde durch die Westsächsische Hochschule Zwickau finanziert und von verschiedenen unabhängigen Prüfern und Organisationen geprüft.

7.4 Wissenstransfer zwischen Hochschule und HAWKS/ Professoren und HAWKS

Die Lehre an der HAW Hamburg bildet gute und begeisterte Ingenieure aus, die sich in den unterschiedlichsten Projekten an der HAW Hamburg engagieren. Hierbei ist das HAWKS Racing Team das größte und interdisziplinärste Projekt der Hochschule. Viele Erfolge bei nationalen und internationalen Wettbewerben sprechen ebenso für die Qualität der Ausbildung an der HAW Hamburg. Mit dem Zeitalter der Elektromobilität müssen jedoch neue Aufgabengebiete erforscht und bereits vorhandene erweitert werden. Hierfür ist ein Projekt wie HAWKS Racing ein guter Startpunkt, da dieses Projekt eng mit der Industrie zusammenarbeitet und auch gerne mit neuen Bauteilen und Technologien experimentiert. Das Projekt erschafft Saison für Saison ein neues Fahrzeug, welches zwar ein Prototyp ist, aber dennoch realitätsnäher als einige Laborversuche.

An der HAW Hamburg werden bereits einige Vorlesungen zum Thema Elektromobilität und alternative Energiequellen in den verschiedenen Departments angeboten. Jedoch wäre es wünschenswert Vorlesungen aus unterschiedlichen Departments miteinander zu kombinieren oder es zu ermöglichen, dass sich Studenten aus anderen Fachbereichen Vorlesungen und deren Kreditpunkte im Studium anrechnen lassen könnten. Als Beispiel sollen hier interessierte Informatikstudierende dienen, die sich für die Informatik hinter Fahrzeugregelungssystemen begeistern. Diese Studierenden könnten so erste Einblicke in die Fahrzeugdynamik am Department Fahrzeugtechnik und Flugzeugbau sammeln und wohl möglich noch vertiefen. Hierdurch wäre es ihnen sicher leichter möglich die Regelung eines elektrischen Allradantriebes zu programmieren. Jedoch

werden diese Studierenden diese Vorlesungen nur besuchen, wenn sie sich die Kreditpunkte anrechnen lassen könnten und somit nicht noch zusätzlich belastet werden würden.

Das HAWKS Racing Team ist immer an einem interdisziplinären Arbeiten interessiert und kann somit die Departments enger zusammen bringen und grundlegend für eine noch bessere Ausbildung sein. Da das Team in ständiger Kommunikation mit der Professur steht kann hier ein gegenseitiger Wissenstransfer aufgebaut werden. Außerdem können die Elemente und Versuchsaufbauten die für die Entwicklung eines Formula Student Electric Fahrzeuges notwendig sind ebenfalls in der Lehre und bei Laborversuchen, eingesetzt werden. Dabei würden beide Seiten profitieren und die anderen Studierenden können so zum Beispiel auch ein Bauteil testen, dass später auf der Rennstrecke zu sehen ist. Ebenfalls können theoretische Grundlagen und Versuche in einen praxisnahen Zustand überführt werden. Es ist ebenfalls möglich, dass die gesammelten Erfahrungen und Ergebnisse in den Vorlesungen verarbeitet und präsentiert werden.

Der Wissenstransfer zwischen dem HAWKS Racing Team und der Hochschule, beziehungsweise zwischen dem HAWKS Racing Team und der Professur kann die Ausbildung an der HAW Hamburg weiter verbessern, es muss jedoch von allen Seiten der Willen dazu da sein.

7.5 Umstrukturierung des Teams

Das HAWKS Racing Team organisiert sich in unterschiedlichen Baugruppen. Diese werden jeweils von einem oder mehreren Leitern geführt. Die Leiter bilden eine Leiterrunde die wöchentlich zusammen kommt, um die Ausrichtung des Teams und den Fortschritt der Entwicklung und Koordination der aktuellen Saison zu besprechen. Hinzu kommt durch das Vereinswesen ein Vorstand der die operativen Geschäfte des Vereins betreut. Außerdem ist ein Beirat aus betreuenden Professoren und der HAW Hamburg vorhanden. Der Vorstand und Beirat des Vereins wird im folgenden nicht betrachtet, da hier keine Veränderungen notwendig werden. Weiterhin werden die Baugruppen Marketing, Informationstechnik (IT) und Controlling nur indirekt durch den Wechsel von Verbrennungsmotor auf Elektromotor betroffen und sind ebenfalls aus der Betrachtung ausgeschlossen.

Das Team ist in fünf technische Baugruppen unterteilt. Abbildung 37 zeigt das Schema der Zuordnung für die Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor.

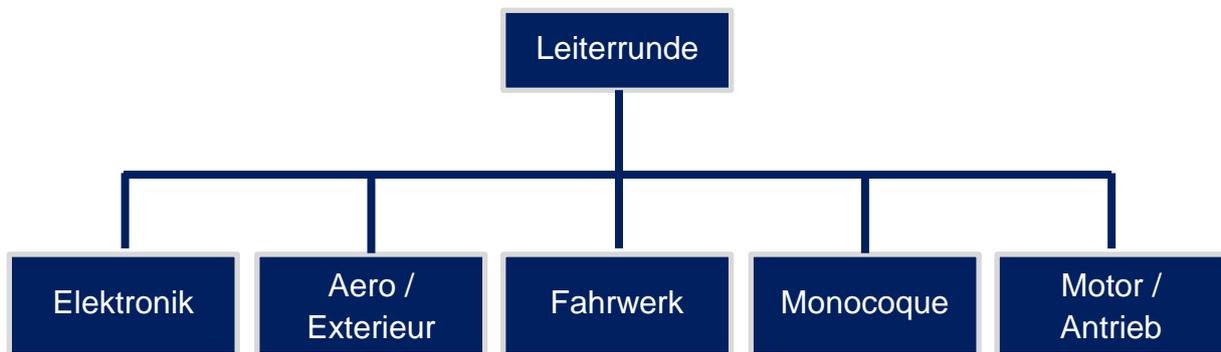


Abbildung 37: Einteilung der technischen Baugruppen des HAWKS Racing H09

Die technischen Teammitglieder sind wie in folgender Abbildung 38 in den Baugruppen verteilt.

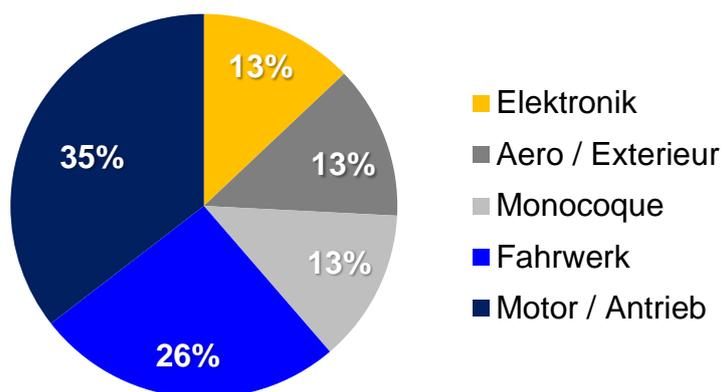


Abbildung 38: prozentuale Verteilung der Teammitglieder
in den einzelnen Baugruppen

Es ist zu erkennen, dass in dem Bereich Motor und Antrieb die meisten Mitglieder arbeiten. Dies ist durch die Komplexität des Systems gegeben. Allerdings ist auch zu erkennen, dass der Bereich Elektronik zu den am wenigstens besetzten Baugruppen gehört. Hier muss sich das Team völlig neu orientieren. Ein Formula Student Electric Fahrzeug beinhaltet deutlich mehr Elektronik als ein Formula Student Fahrzeug mit Verbrennungsmotor. Zudem müssen völlig neue Arbeitsfelder im Bereich der Informatik für die Steuerung und Regelung des Fahrzeuges erschlossen werden. Es gilt, mehr Studenten der Elektrotechnik und Informatik für das Projekt zu begeistern

und zusammen ein konkurrenzfähiges, haltbares und sicheres Fahrzeug zu entwickeln, denn ein noch so guter Antrieb lässt sich nicht bewegen, ohne Elektronik. Bei der Umstrukturierung ist es notwendig die Baugruppen neu zu orientieren und gegebenenfalls neue Baugruppen zu gründen. Es lohnt sich hierfür auch bei anderen Teams zu schauen, welche Struktur verwendet wird und mit wie vielen Teammitgliedern jede Baugruppe besetzt ist. Einen ersten Einblick in die Teamstrukturen der Technik der in Abschnitt 4 erwähnten Teams gibt Tabelle 6 im Anhang E. Es ist zu erkennen, dass bei den Teams eine ähnliche prozentuale Verteilung der Baugruppen Fahrwerk und Chassis & Bodwork (Monocoque und Aero / Exterieur) wie beim HAWKS Racing Team besteht. Bei den betrachteten Teams gibt es weiterhin die Baugruppen Motor & Antrieb, Akkumulator, Elektronik und Vehicle Dynamics. Allerdings unterscheidet nicht jedes Team die Fachbereiche in die Baugruppen, sondern fasst diese teilweise zusammen. Auffällig ist der sehr hohe Anteil der Baugruppe Vehicle Dynamics beim DUT Racing Team Delft und beim AMZ Racing Team Zürich. Diese Baugruppe gibt es beim Greenteam Stuttgart und bei KA-Racing aus Karlsruhe nicht. Der Anteil der Mitglieder der Baugruppen, die sich offensichtlich direkt mit dem elektrotechnischen System befassen liegt zwischen $\frac{2}{5}$ und $\frac{2}{3}$. Das Delfter Team hat mit $\frac{2}{3}$ der Mitglieder die meiste Kompetenz im Bereich der Elektrotechnik. Hieraus ergibt sich nach Abbildung 39 ein Vorschlag zur Umstrukturierung des technischen Teams.

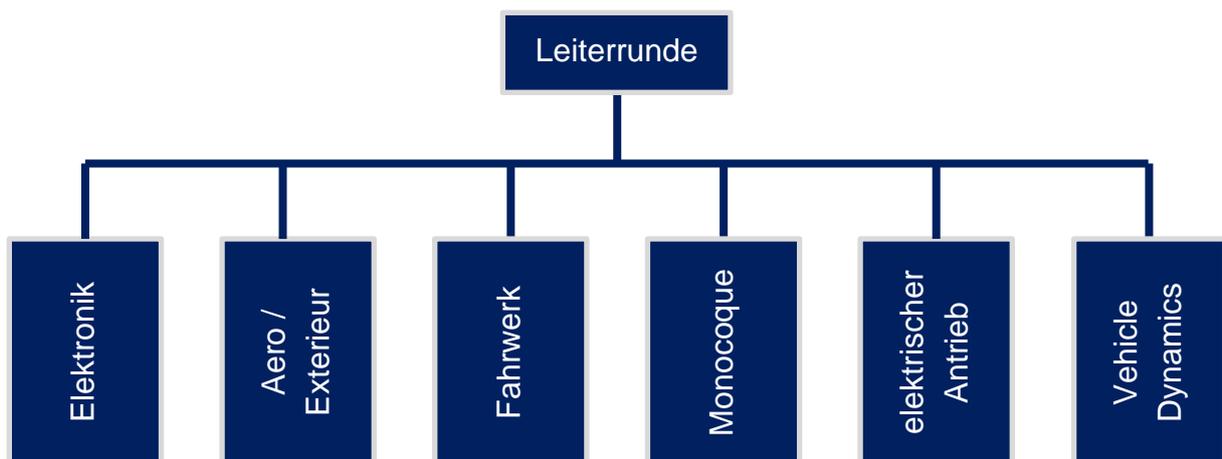


Abbildung 39: mögliche Struktur der technischen Baugruppen für ein Formula Student Electric Team

Dabei muss das Team abwägen welche Gewichtungen den einzelnen Baugruppen zugeordnet werden. Die Tabelle 6 im Anhang E bietet auch hier eine erste Analyse der technischen Baugruppen der betrachteten Teams. Daraus ergibt sich eine ähnliche Verteilung die in Abbildung 40 dargestellt ist.

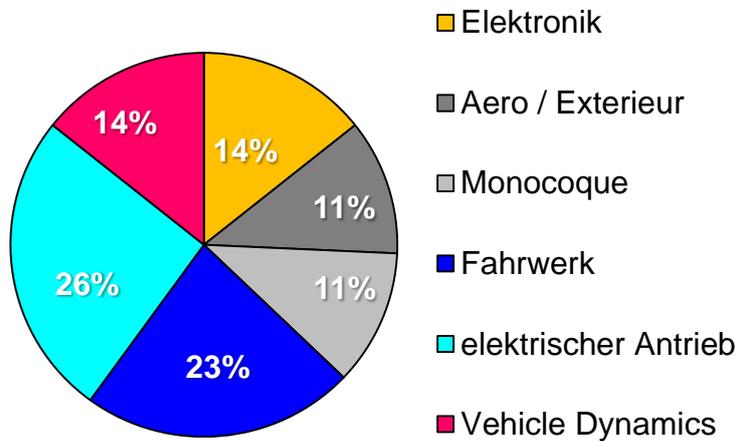


Abbildung 40: möglich prozentuale Verteilung der Teammitglieder eines Formula Student Electric Teams

Der Bereich der Simulation und Regelung des Fahrzeuges, im Diagramm mit Vehicle Dynamics bezeichnet, sollte bereits bei der Vorentwicklung des Fahrzeuges eine übergeordnete Rolle spielen, da hierdurch die notwendigen Fahrzeugkomponenten genauer spezifiziert werden können. Hierdurch wird ein späteres Wechseln auf zum Beispiel einen größeren Akkumulator vermieden. Ebenfalls kann hiermit ermittelt werden wie groß der Vorteil eines Allradantriebes ist und wie sich die Regelung realisieren lässt. Dieser sehr theoretische Arbeitsbereich muss mit aller Sorgfalt bearbeitet werden, um das Projekt im weiteren schneller voran zu bringen, denn nicht geplante Veränderungen von Konzepten schlagen sich im Zeit- und Finanzplan nieder.

7.6 Zeitplanung

Das HAWKS Racing Team entwickelt, konstruiert und fertigt jährlich ein neues Fahrzeug mit Verbrennungsmotor. Hierbei können die vorhergehenden Saisons als Grundlage zur Weiterentwicklung herangezogen werden. So werden Bauteile mit einwandfreier Funktion übernommen und Bauteile die nicht zufriedenstellend funktionieren verbessert oder durch neue ersetzt. Es ist also nicht jedes Jahr ein von Grund auf neues Fahrzeug, sondern eine stetige Weiterentwicklung. Besonders im Bereich des Motors kann aufgrund der Komplexität und Vielzahl an Bauteilen nicht jedes Jahr von Neuem angefangen werden. Es gilt vielmehr den Motor jedes Jahr effizienter, haltbarer und fahrbarer zu machen.

Bei der Entwicklung eines Elektrofahrzeuges kann nicht auf den Grundstock von vergangenen Saisons zurückgegriffen werden. Es ist möglich einige Fahrzeugkomponenten in gleicher oder sehr ähnlicher Form zu übernehmen. Hierzu zählen das Interieur, die Aerodynamik und Teile des Fahrwerkes. Es muss jedoch zum Beispiel im Bereich des Chassis, insbesondere beim Monocoque auf die entsprechende Leitfähigkeit des Bauteils geachtet werden, siehe Abschnitt 3.1 Abs. 11. Somit ergibt sich eine Erweiterung des Fertigungsprozesses. Die Baugruppe Fahrwerk muss entsprechend dem gewählten Konzept neue Bauteile entwickeln und die geometrischen Größen an das Konzept anpassen. Der Bereich Motor und Antrieb unterliegt jedoch dem größten Wandel, mit den wenigsten, aus den vorhergehenden Saisons bekannten Grundlagen. Das Zeitmanagement wird hierbei um so wichtiger.

Da in den Bereichen Motor, Antrieb und Elektronik viel fundamentale Arbeit notwendig ist, empfiehlt es sich den Jahresturnus in der ersten Elektrofahrzeugsaison auf zwei Jahre auszuweiten. So kann genug Zeit auf die Konzeption, Entwicklung und Erprobung der neuen Fahrzeugkomponenten verwendet werden. Der Zeitplan kann zum Beispiel wie in Anhang F aufgestellt werden. Es sollten alle Maßnahmen, wie zum Beispiel Umbaumaßnahmen der vorhergehenden Kapitel bereits ausgeführt sein. Hierbei sind die Zeiträume nach Erfahrungswerten bei der Entwicklung eines Formula Student Fahrzeuges angenommen. Die Zeiträume erscheinen teilweise etwas lang, sind aber auch schon mit Pufferzeiten, für Produktionsausfälle, Fertigungsprobleme oder

Neukonstruktionen angesetzt. Besonders im Bereich der Fertigung und bei der Prüfstandsarbeit werden sich Verzögerungen ergeben, da hier die meisten Konstruktions-, Fertigungs- oder Materialfehler auffallen.

Die Testphase ist mit einem vier monatigem Zeitraum ebenfalls sehr lang bemessen, jedoch sollte diese Zeit definitiv genutzt werden, um die ersten Probleme und auch die Probleme, die erst durch lange Testzeit auffallen zu kompensieren. Hierbei ist es ebenfalls wichtig, dass beim Erkennen von Fehlern schnell und effektiv gehandelt wird, um den Testbetrieb nicht zu unterbrechen.

Die Durchführung spezieller Lehrgänge zur Sicherheit und zum elektrotechnischen Verständnis von Hochvoltanlagen, ist möglichst zu Beginn der unterschiedlichen Phase wünschenswert. Beim Projektstart sollten allgemeine Konstruktionsrichtlinien durch ein Grundwissen über Hochvoltsysteme in Fahrzeugen bei Lehrgängen erworben werden. Mit dem Beginn der Fertigungsphase rückt die Sicherheit in den Vordergrund, hier allerdings nur für das Fertigen und Zusammenbauen von Hochvoltsystemen. Vor der „Test & Event-Phase“ sollte die Sicherheit im Fahrbetrieb und das sichere Arbeiten am Fahrzeug unter Zeitdruck von jedem Teammitglied verinnerlicht werden.

Auch bei der Planung der Zeiteinteilung muss mit viel Sorgfalt und Bedacht gehandelt werden, um den Zeitplan realistisch und erreichbar zu gestalten. Hiervon hängt die Einhaltung des Zeitplans ab. Werden bereits in der frühen Phase wichtige Meilensteine nicht eingehalten, wird sich dies auch auf die Arbeitsweise zur Erreichung der nächsten Meilensteine fortsetzen. Damit gerät das gesamte Projekt in Verzug und eine erfolgreiche erste Saison mit einem Formula Student Electric Fahrzeug ist nicht möglich. Jedes Teammitglied muss daran gelegen sein den Zeitplan unbedingt einzuhalten.

8. Zusammenfassung

Die Formula Student Electric ist ein sehr interessantes Aufgabengebiet und wird in den nächsten Jahren weitere Begeisterung und Akzeptanz erfahren. Es werden ähnlich wie in der Automobilindustrie und anderen Rennserien mehr und mehr Fahrzeuge mit rein elektrischem Antrieb entstehen. Die hierbei signifikanten Probleme werden zu einer Weiterentwicklung in diesen Bereichen führen, auch wenn die Industrie dies zum Beispiel bereits seit Jahren für die Batterietechnik prognostiziert.

Die Umsetzung eines elektrisch angetriebenen Rennfahrzeuges an einer Hochschule stellt alle Beteiligten vor eine große Herausforderung, ist allerdings auch wegweisend für die Zukunft und das Ansehen der Hochschule und ihrer Lehre. So ist es möglich neue Forschungsgebiete speziell zu erschließen und abzudecken. Des Weiteren kann durch die Integration eines solchen Projektes in den Hochschulalltag auch die politische und wirtschaftliche Unterstützung von außen zu Folge haben. Hierbei sei erwähnt, dass Hamburg 2011 Umwelthauptstadt war und auch weiterhin nachhaltig mit den Themen Umweltbelastung und Klimaschutz umgehen möchte. Die Entwicklung eines Rennfahrzeuges mit Verbrennungsmotor ist deutlich schlechter einzugliedern, als ein Rennfahrzeug mit zukunftsweisender Technologie und lokaler Nullemission.

Die Umsetzung an der HAW Hamburg gestaltet sich momentan allerdings als schwierig, da grundlegende Einrichtungen fehlen. Die Sicherheit bei der Arbeit mit solch einem Hochvoltsystem muss in den Vordergrund gerückt werden. Das Projekt HAWKS Racing e.V. darf hier nicht in einem übereifrigen Entschluss handeln, sondern muss den Schritt im Vorfeld gut überdenken und planen, denn ohne ein ausgereiftes Umsetzungskonzept wird der internationale und interdisziplinäre Erfolg des Projektes stagnieren.

Zum einen muss die erforderliche Zeit eingeplant werden, zum anderen muss die Finanzierung des Projektes sichergestellt werden. Die Kosten für die elektrotechnischen Einzelteile des Fahrzeuges sowie für notwendige Umbaumaßnahmen und Sicherheitseinrichtungen werden die Liquidität des Vereins übersteigen und es wird schwierig diese ausschließlich durch Sponsoren zu sicherzustellen.

9. LITERATURVERZEICHNIS

- [VDI08] **Kaiser Oliver S., Eickenbusch Heinz, Grimm Vera, Zweck Axel.**
Zukunft des Autos. 40239 Düsseldorf : Zukünftige Technologien
Consulting der VDI Technologiezentrum GmbH, 2008.
- [BRE13] **Brenner, Harald.** www.planet-wissen.de. [Online] 17. Mai 2013. [Zitat vom: 12. Juli 2013.] http://www.planet-wissen.de/natur_technik/energie/erdoel/wissensfrage_erdoel_boom.jsp.
- [SCH09] **Karsten Schwanke, Nadja Podbregar, Dieter Lohmann.**
Naturkatastrophen: Wirbelstürme, Beben, Vulkanausbrüche - Entfesselte Gewalten und ihre Folgen. [Hrsg.] Harald Frater. Heidelberg : Springer, 2009.
- [BER08] www.bertelsmann-stiftung.de. [Online] 08. Dezember 2008. [Zitat vom: 23. August 2013.] http://www.bertelsmann-stiftung.de/cps/rde/xchg/bst/hs.xsl/nachrichten_91824.htm.
- [LAN12] **Lang, Thomas.** www.handelsblatt.com. [Online] 13. August 2012. [Zitat vom: 14. Juli 2013.]
<http://www.handelsblatt.com/auto/nachrichten/autotechnik-wie-das-elektroauto-seinen-schwung-verlor-seite-all/6994250-all.html>.
- [POR12] porscheplatz.porsche.com. [Online] 22. Juni 2012. [Zitat vom: 12. Juli 2013.] <http://porscheplatz.porsche.com/de/articles/der-semper-vivus>.
- [VER13] www.unser-autos.de. [Online] 2013. [Zitat vom: 12. Juli 2013.]
<http://www.unsere-autos.de/zeitstrahl/allradantrieb/>.
- [ENC13] www.britannica.com. [Online] [Zitat vom: 14. Juli 2013.]
<http://www.britannica.com/EBchecked/topic/44957/automobile/259061/Early-electric-automobiles#ref=ref918099>.
- [ESH12] www.ecofriend.com. [Online] 12. April 2012. [Zitat vom: 8. August 2013.]
<http://www.ecofriend.com/old-electric-milk-trucks-england-fun-filled-retirement.html>.
- [ALK13] www.alke.com. [Online] [Zitat vom: 24. August 2013.]
<http://www.alke.com/de-de/spezialfahrzeug-fuer-altstadtzentren.html>.
- [MÜL00] **Müller, Rainer.** *Soll man Autos aus Aluminium bauen? - Ein Beispiel für „Fermi-Probleme“ in der Schule.* Dresden : s.n., 2000.
- [INC13] **INC., NOVELIS.** www.novelis.com. [Online] 2013. [Zitat vom: 31. Juli 2013.] <http://www.novelis.com/de/Seiten/Raw-Materials-Recycling.aspx> .

-
- [PIE12] **Piechowski, Günter.** *Herausforderungen und Risiken infolge der Energiewende.* SGL Group. 2012.
- [TIL12] **Tilgner, Dominic.** *Von der Lagerstätte zur Chemikalie - Lithium.* Bayreuth : s.n., 2012.
- [BEL13] **Belaj, Ferdinand.** **Silicium** [Online]
- [ÖKO11] **Florian Hacker, Ralph Harthan, Peter Kasten, Charlotte Loreck, Dr. Wiebke Zimmer.** *Marktpotenziale und CO₂-Bilanz von Elektromobilität.* Berlin : Öko-Institut e.V., 2011.
- [ISL131] **Races, Isle of Men TT Zero.** www.iomtt.com. [Online] 2013. [Zitat vom: 1. August 2013.]
<http://www.iomtt.com/~media/Files/2013/Downloads/Race%20Results/Zero/SES%20TT%20Zero%20-%20result.ashx>.
- [ISL13] **Races, Isle of Men TT.** www.iomtt.com. [Online] 2013. [Zitat vom: 1. August 2013.]
<http://www.iomtt.com/~media/Files/2013/Downloads/Race%20Results/Results%20Sheet%201.ashx>.
- [FIM13] **TTXGP, FIM.** www.egrandprix.com. [Online] 2013. [Zitat vom: 1. August 2013.] <http://www.egrandprix.com/racecalendar.php>.
- [MÜN11] **MÜNCH, MOTORRAD TECHNIK GmbH.** www.muenchmotorbikes.com. [Online] 2011. [Zitat vom: 1. August 2013.] <http://www.muench-production-racer.com/de/muench-tte2#technische>.
- [FIA13] **FIA, Formula E.** www.fia.com. [Online] 2013. [Zitat vom: 1. August 2013.] <http://www.fia.com/championship/fia-formula-e-championship/2013/fia-formula-e-championship>.
- [SAE13] **SEA, International.** *2013 Formula SAE Rules.* 2013.
- [MAZ13] **Mazur.** FSAE World Ranking List. [Online] 2013. [Zitat vom: 1. August 2013.] <http://mazur-events.de/fs-world/>.
- [AGN13] **AGNI, Motors.** *PERFORMANCE GRAPHS 119 Series.* 2013.
- [MAN13] **Mann, Gerald.** www.batterie-info.de. [Online] [Zitat vom: 16. August 2013.] <http://batterie-info.de/Thema/der-lithium-akku/>.
- [DAT13] **DATAKOM, Buchverlag GmbH.** www.itwissen.info. [Online] [Zitat vom: 16. August 2013.] <http://www.itwissen.info/definition/lexikon/Lithiumionen-Akku-Lilon-lithium-ion.html>.

-
- [MAN131] **Mann, Gerald.** www.batterie-info.de. [Online] [Zitat vom: 16. August 2013.]
<http://batterie-info.de/Thema/der-lithium-polymer-akku/>.
- [ABO12] **A.B.O., Verlagsservice GmbH.** www.elektroniknet.de. [Online] 30. April 2012. [Zitat vom: 22. August 2013.]
<http://www.elektroniknet.de/automotive/sonstiges/artikel/87961/>.
- [FAM09] **Kaminski, Prof. Dr.-Ing.** *Leistungselektronik und Stromrichtertechnik I.* Bremen : s.n., 2009.
- [BER97] **Berufsgenossenschaft, für Gesundheitsdienst und Wohlfahrtspflege.** *BGV A3 Unfallverhütungsvorschrift.* Buchholz : Beisner Druck GmbH & Co. KG, 1997.
- [DEU12] **Deutsche, Gesetzliche Unfallversicherung.** *BGI/GUV-I 8686 Qualifizierung für Arbeiten an Fahrzeugen mit Hochvoltssystemen.* Berlin : Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung, 2012.
- [VDI13] *Es gibt kein Rundum-Sorglos Paket.* **Verein, deutscher Ingenieure.** Nr. 33/34, s.l. : VDI Verlag GmbH, 16. August 2013, VDI Nachrichten.
- [WEI12] **Weiß, Dimitri.** *Entwurf und Aufbau eines Prüfstandes für Windenergie-Netzeinspeisung mit doppelt gespeistem Asynchronmotor.* Hamburg : s.n., 2012.
- [DYN12] **Dynamometer, World Ltd.** www.dynamometer-world.com. [Online] 4. Januar 2012. [Zitat vom: 24. August 2013.] http://www.dynamometer-world.com/index.php?option=com_jforms&view=form&id=1&Itemid=133.
- [SOU13] *persönliches Gespräch.* **Sourcetronic, GmbH.** 2013.
<http://www.sourcetronic.com>.
- [UPT11] **Uptmoor, Felix.** *Modellbildung und Simulation von Batterien in der Elektromobilität.* Hamburg : s.n., 2011.
- [HAW10] **HAWKS, Racing e.V.** www.hawksracing.de. [Online] 16. Juni 2010. [Zitat vom: 20. August 2013.] <http://www.hawksracing.de/imprint/vereinssatzung>.
- [DEK13] **DEKRA.** www.dekra.de. [Online] 2013. [Zitat vom: 20. August 2013.]
http://www.dekra.de/de/pressemitteilung?p_p_lifecycle=0&p_p_id=ArticleDisplay_WAR_ArticleDisplay&_ArticleDisplay_WAR_ArticleDisplay_articleID=39690602.
- [VDE13] **VDE, Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e.V.** www.vde.com. [Online] 2013. [Zitat vom: 20. August 2013.]
<http://www.vde.com/de/Veranstaltungen/VDE->

- Seminare/Seiten/VeranstaltungsDetails.aspx?vdeEventID=2b0a92ff-9dcf-4821-89df-e31d617e58e7.
- [FOR13] **Formula, Student Electric 2013.** www.formulastudent.de. [Online] 2013. [Zitat vom: 24. August 2013.]
http://www.formulastudent.de/uploads/media/FSE13_Scoring_eff_all.pdf.
- [WIK13] **Wikimedia, Foundation Inc.** de.wikipedia.org. [Online] 22. August 2013. [Zitat vom: 26. August 2013.]
<http://de.wikipedia.org/wiki/Superkondensator>.
- [DAT131] **DATACOM, Buchverlag.** www.itwissen.info. [Online] [Zitat vom: 8. August 2013.] <http://www.itwissen.info/bilder/energie-und-leistungsdichte-von-akkus-und-kondensatoren-dargestellt-im-ragone-diagramm.png>.
- [WIK111] **Wikimedia, Foundation Inc.** commons.wikimedia.org. [Online] 2011. [Zitat vom: 23. August 2013.]
http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Lohner_Porsche.jpg.
- [WIK07] —. <http://en.wikipedia.org>. [Online] 2007. [Zitat vom: 23. August 2013.]
http://en.wikipedia.org/wiki/File:HYDE_PARK.JPG.
- [WIK06] —. commons.wikimedia.org. [Online] 2006. [Zitat vom: 23. August 2013.]
<http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Kilowatt.jpg>.
- [WIK111] —. en.wikipedia.org. [Online] 2011. [Zitat vom: 23. August 2013.]
<http://en.wikipedia.org/wiki/File:Witkar.jpg> .
- [ELV13] **Elvusa.** <http://www.elvusa.com>. [Online] 2013. [Zitat vom: 23. August 2013.] <http://www.elvusa.com/EV1s.jpg>.
- [WIK071] **Wikimedia, Foundation Inc.** commons.wikimedia.org. [Online] 2007. [Zitat vom: 23. August 2013.]
<http://commons.wikimedia.org/wiki/File:NissanHypermini.jpg> .
- [WIK12] —. en.wikipedia.org. [Online] 2012. [Zitat vom: 23. August 2013.]
http://en.wikipedia.org/wiki/File:Toyota_RAV4_EV_WAS_2012_0759.JPG
- [WIK072] —. en.wikipedia.org. [Online] 2007. [Zitat vom: 23. August 2013.]
http://en.wikipedia.org/wiki/File:1997-1999_Honda_EV_Plus_02.jpg .
- [WIK08] —. commons.wikimedia.org. [Online] 2008. [Zitat vom: 23. August 2013.]
http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Elektroauto_Hotzenblitz_Buggy_mit_ABS-Karosserie.jpg.
- [HUM13] **Hummert, Jens.** www.abload.de. [Online] 2013. [Zitat vom: 23. August 2013.] http://www.abload.de/img/g3_strom39u9.jpg.

-
- [BUN11] **Bundesverband, eMobilität e.V.** www.bem-ev.de. [Online] 2011. [Zitat vom: 23. August 2013.] <http://www.bem-ev.de/wp-content/uploads/2011/02/Tesla1.jpg> .
- [VOP13] **VP, Online Publishing OG.** vanishingpoint.at. [Online] [Zitat vom: 23. August 2013.] <http://vanishingpoint.at/wordpress/wp-content/gallery/renault-twizy-concept/renault-twizy-16.jpg> .
- [GER13] **Gerstel, GmbH & Co. KG.** www.gerstelblog.de. [Online] [Zitat vom: 23. August 2013.] <http://www.gerstelblog.de/files/2011/08/Ampera-Studio-d.jpg> .
- [DOM12] **Domroese, Kai.** www.mein-elektroauto.com. [Online] 2012. [Zitat vom: 23. August 2013.] <http://www.mein-elektroauto.com/2012/06/elektroauto-tmg-ev-p002-soll-den-titel-fur-toyota-beim-pikes-peak-holen-mit-video/5412/>.
- [KAR13] **KA-RaceIng.** www.facebook.com/KaRaceIng. [Online] [Zitat vom: 23. August 2013.] https://www.facebook.com/KaRaceIng/photos_stream.
- [BAT11] Ilgin, Sergej; Jegenhorst, Niels; Kube, Raik; Püttjer, Simon; Riemschneider, K.-R.; Schneider, Matthias; Vollmer Jürgen. *Zellenweiser Messbetrieb, Vorverarbeitung und drahtlose Kommunikation bei Fahrzeugbatterien.* [Online] Abruf: 20.08.2013. http://www.haw-hamburg.de/fileadmin/user_upload/TI-IE/Daten/Docs/ESZ-ASP/FGSN10_Batsen.pdf

ANHANG A

Fragebogen an unterschiedliche Teams der Formula Student Electric:

1. Motivation – Warum habt Ihr Euch entschieden ein E-Fahrzeug zu bauen?
2. Sicherheitsvorkehrungen – Welche Vorkehrungen habt Ihr getroffen?
3. Wie hat sich Deine Hochschule für die Sicherheit engagiert?
4. Wie habt Ihr das Team umstrukturiert, bzw. habt Ihr das Team umstrukturiert?
5. Produktion – Wie und wo habt Ihr die Akkus zusammengebaut, separater Raum oder einfach bei Euch in der Werkstatt?
6. Entsorgung/Recycling – Wie entsorgt Ihr verbrauchte Akku?
7. Motorenkonzept – Warum habt Ihr euer System gewählt?
8. Auswahl des Akkusystem – Akkutyp, Kapazität, Stromstärke, Spannung, grobe Kosten
9. Welche Daten habt Ihr für die Auswahl der Motoren und Akkus (Kapazität usw.) zugrunde gelegt?
10. Gewicht der Systeme – Akku, Leistungselektronik, Motoren
11. Welche Bauteile prüft Ihr auf welchen Prüfständen?

ANHANG B

Antworten einzelner auf die in Anhang A gestellten Fragen.

Die Antworten werden ohne Wertung oder Kritik so wiedergegeben, wie sie in der E-Mailkorrespondenz geschrieben wurden. Lediglich die Einordnung zu den Fragen wird zur besseren Übersichtlichkeit und Verständnis angeglichen. Die Urheber und deren Zugehörigkeit zum jeweiligen Team, sowie vorhandene Kontaktdaten werden mit aufgelistet. Die Verantwortung der Texte liegt bei den jeweiligen Urhebern.

Racetech Racing Team TU Bergakademie Freiberg e.V.

Michel Mühler

Support Rahmen RT07 Modulleiter Rahmen RT05/RT06

Bernhard-von-Cotta-Strasse 4

09596 Freiberg/Germany

Mobil: +49 173 640 16 18

E-Mail: muehler.michel@racetech.tu-freiberg.de

Web: www.racetech.tu-freiberg.de

1. Motivation – Warum habt Ihr Euch entschieden ein E-Fahrzeug zu bauen?

Nachdem "Warum" wurden wir bereits oft gefragt. Sponsoren, Unterstützer und u.a. auch eigene Teammitglieder, die Bezug zum klassischen Rennsport haben, konnten sich vorerst nicht so recht mit der Idee eines Elektrowagen ohne Lärm und Benzingeruch anfreunden. Doch einer der wichtigsten Aspekte bei der Klärung des Warums ist eine Gegenfrage - Nämlich die: ob es möglich ist, den Verbrennungsmotor in der Zukunft durch E-Motoren zu ersetzen? Diese Frage macht stets publik. Und anstatt auf Meinungen und Vorhersagen von außen zu vertrauen, haben wir als "Autoentwickler" doch selbst die Möglichkeit herauszufinden, ob es möglich wäre. Wir, als kommende Ingenieure leben in einer Zeit in der es unsere Aufgabe ist genau das heraus zu finden. Und die Formula Student bietet dafür eine willkommene Plattform diese Aufgabe an zu gehen. Somit können wir am eigenen

Leib erfahren, welche Vorteile und Nachteil ein elektrisch betriebener Antrieb aufweist.

Ein weiterer Aspekt war, dass wir vom Racetech-Team auch einfach etwas neues ausprobieren wollten. Den Sprung zur E-Mobilität machte uns dann das Modul Elektronik des Vorjahresteam's schmackhaft, da diese sich schon während der Saison mit diesem Thema auseinander gesetzt hatten. Durch diese Vorarbeit wurden die Teammitglieder der zukünftigen Saison schon langsam auf das Thema Elektromobilität geeicht, so dass es zu Beginn der neuen Saison schon fast außer Frage stand, mit welchem Antriebskonzept der RT06 fahren würde.

2. Sicherheitsvorkehrungen – Welche Vorkehrungen habt Ihr getroffen?

Unser Modul Elektronik besuchte ein 2-tägiges Seminar in beim WHZ Racing Team aus Zwickau. Das Seminar selber wurde direkt vom TÜV durchgeführt und befähigte damit unsere Elektroniker an Hochspannungskomponenten zu arbeiten. Ein solches Seminar wird auch von der FSG angeboten. Des Weiteren hatte unser Modul Elektronik ebenfalls ein Seminar an unserer Uni organisiert. Dieses 2-stündige Seminar befähigte die Teilnehmer zwar nicht an Hochspannungskomponenten zu arbeiten, aber dafür Arbeiten am Auto durchzuführen während der Akku eingebaut ist. (High-Voltage-System aber natürlich auf AUS).

Die restlichen Teammitglieder bekamen eine Belehrung darüber wann und wie Sie am Auto arbeiten dürfen. Diese Belehrung ist vor allem aus sicherheitstechnischen und versicherungstechnischen Gründen unersetzlich.

Man sollte sich für die Sicherheitshinweise ein erfahrenes Team zur Beratung heran holen, da diese die Gefahren alle kennt.

3. Wie hat sich Deine Hochschule für die Sicherheit engagiert?

Ehrlich gesagt, waren wir da auf uns allein gestellt.

4. Wie habt Ihr das Team umstrukturiert, bzw. habt Ihr das Team umstrukturiert?

Die größte Umstellung gab es eigentlich im Modul Elektronik. Dort gab es nun 2 Modulleiter. Einer der beiden hatte die Verantwortung für das High-Voltage-System, der zweite für das Low-Voltage-System. Es ist zusätzlich ein Drittverantwortlicher notwendig, welcher sich ausschließlich um die Regelungstechnik kümmert.

5. Produktion – Wie und wo habt Ihr die Akkus zusammengebaut, separater Raum oder einfach bei Euch in der Werkstatt?

Für den Akkubau brauchten wir definitiv einen separaten Raum, der auch nur Zutritt für wenige am Akku- beteiligte zur Verfügung stellen sollte.

6. Entsorgung/Recycling – Wie entsorgt Ihr verbrauchte Akkus?

Derzeit liegen noch einige kaputte Zellen in dem Raum, wo wir alle Arbeiten am Akku durchgeführt haben. Allerdings lagen diese einen Monat nach dem Defekt unter einem Abzug, es ist aber nie etwas passiert. Wir wollen sie vermutlich einem Institut geben, welche sich mit Aufbereitung beschäftigt.

7. Motorenkonzept – Warum habt Ihr euer System gewählt?

1 Motor:

- + keine Fahrdynamikregelung (weniger Arbeit)
- + leichter
- + kostengünstiger
- schlechteres Kurvenverhalten
- langweilig =)

2 Motoren:

- + Fahrdynamikregelung (besseres Kurvenverhalten)
- + innovativ
- + bei gutem Motor + Inverter zusätzliches Gewicht nicht so groß
- sehr schlechtes Kurvenverhalten bei schlechter Sensorik/Regelung
- mechanische Schwingungen des Antriebsstranges, wenn Inverter nicht entsprechend parametrisiert

4 Motoren:

- + großes Rekuperationsvermögen
- + bestes Beschleunigungs- und Kurvenverhalten
- extrem kompliziert (Regelung, HV und Kühlung vorn)
- schwer
- teuer
- mechanische Schwingungen des Antriebsstranges, wenn Inverter nicht entsprechend parametrisiert

Der Grund wieso wir 2 Motoren fahren ist, dass wir unbedingt eine Fahrdynamikregelung entwickeln wollten. Diese hat enormes Potential für die Zukunft und kann Jahr für Jahr verbessert werden.

Beim 1 Motoren Konzept ist das Verbesserungspotential geringer. Und 4 Motoren waren uns für den Anfang eindeutig zu kompliziert und zu teuer.

8. Auswahl des Akkusystem – Akkutyp, Kapazität, Stromstärke, Spannung, grobe Kosten?

-

9. Welche Daten habt Ihr für die Auswahl der Motoren und Akkus (Kapazität usw.) zu Grunde gelegt?

Lithiumpolymer (+Untertypen) - bessere Energiedichte, aber schneller kaputt

Lithiumeisenphosphat (+Untertypen) - ungefährlicher, aber schwerer

Die Top Teams fahren alle Lithiumpolymer. Auch wir hatten letztes Jahr relativ wenig Probleme mit unseren Zellen, nur einige wenige haben sich aufgebläht, aber weiter ist nichts passiert (waren nur defekt)

Kapazität (in kWh) haben wir letztes Jahr vor allem aus den Erfahrungs- und Verbrauchswerten anderer Formula Student Teams gewonnen. Obwohl die meisten Teams maximal 5,5 kWh verbraucht haben, entschieden wir uns für 7,2 kWh

Grund: Sicherheit
 höheres Gewicht
 Verfügbarkeit geeigneter Zellen

Allerdings werden wir dieses Jahr die Kapazität auf 5,5 - 6 kWh verringern, da wir letzte Saison nie mehr als 5,5 kWh verbraucht haben

Spannung: Legt die Inverterhardware fest (Batterie sollte ausgehend vom Inverterdatenblatt designed werden)

Hohe Spannung vermindert die Wärmeverluste

Strom: Gleichstrom folgt aus der Spannung ($U \cdot I = W$)

Wechselströme siehe Motordatenblatt

Kosten: Unterschiedlich, allerdings sollte man mit 20 Euro/5Ah LiPo Zelle kalkulieren, daher etwa 10000 Euro (wegen Ersatzzellen ~20%)

„> Welche Daten habt Ihr für die Auswahl der Motoren und Akkus

> (Kapazität usw.) zu Grunde gelegt?“

vor allem andere Formula Student Teams. Da stellt man fest, dass etwa 20 kW Dauerlast und 40 kW Spitzenlast bei einem 2 Motorenkonzept optimal sind. Allerdings wird der Motor vor allem durch die Verfügbarkeit bestimmt, außer man hat ausreichend Geld, dann kann man den AMK Motor empfehlen

10. Gewicht der Systeme – Akku, Leistungselektronik, Motoren

Bei uns:

Akku 7,2 kWh ~65 kg

Motor 2 x 50 KW 2 x ~28 kg

Inverter 2 x ~7 kg

dazu kommen noch die Kabel und bei uns eine Box, die für das Energy Meter gedacht ist und dazu noch das IMD und den Discharge Circuit enthält ~4 - 6 kg geschätzt

11. Welche Bauteile prüft Ihr auf welchen Prüfständen?

wir haben alle akkuzellen einmal geladen und entladen und die kapazität dabei bestimmt ($I(\text{konst}) \cdot t$) wärmeentwicklung der zellen mit wärmebildkamera wärmekapazität der zellen zwecks latenter Wärme für Kühlauslegung

Parametrierung der Inverter wurde bei und von Bosch durchgeführt

Schwingungskompensation des Antriebsstranges dann durch Boschingenieur direkt am Auto

-> in 2 Tagen allerdings nicht zu schaffen

-> Probleme beim Acceleration

Dieses Jahr: Aufbau eines eigenen Prüfstandes zusammen mit dem Elektrotechnikinstitut

DHBW Engineering Stuttgart e.V.

Julian Kumle & Simon Pouwels

Technische Projektleitung & Konstruktion Anbindungspunkte

Rotebühlplatz 41

70178 Stuttgart

Mobil +49 176 32 555 795

E-Mail: julian.kumle@dhw-engineering.de

Web: www.dhw-engineering.de

1. Motivation – Warum habt Ihr Euch entschieden ein E-Fahrzeug zu bauen?

E-Mobilität wird immer größer → zukunftsorientiert

Grünes Image

neue Technologie

Breiteres Aufgabengebiet für E-Techniker und Mechatroniker (dafür aber weniger für Maschinenbauer zu tun)

2. Sicherheitsvorkehrungen – Welche Vorkehrungen habt Ihr getroffen?

Schulungen zur EFK (Elektro Fachkraft)

Einrichten eines Hochvoltlabors

Kontakt zu einem Hochvolt-Experten (<http://www.itw-web.de/about.htm>)

3. Wie hat sich Deine Hochschule für die Sicherheit engagiert?

Finanzielle Unterstützung HV-Labor

4. Wie habt Ihr das Team umstrukturiert, bzw. habt Ihr das Team umstrukturiert?

Bisher:

- Rahmen
- Antrieb
- Fahrwerk
- Elektronik
- Organisation

Jetzt:

- Rahmen/Monocoque
- Fahrwerk
- e-Drive: HV-Verkabelung, Leistungselektronik, Motoren, Antriebswellen, Kühlung, Getriebe, Energymeter
- Batterie
- Systemelektronik
- Orga

5. Produktion – Wie und wo habt Ihr die Akkus zusammengebaut, separater Raum oder einfach bei Euch in der Werkstatt?

separate HV-Werkstatt

6. Entsorgung/Recycling – Wie entsorgt Ihr verbrauchte Akku?

... sind gerade dabei etwas auszuarbeiten

7. Motorenkonzept – Warum habt Ihr euer System gewählt?

1. Saison: in Anlehnung an bewährte Konzepte anderer Teams; außerdem gutes Angebot unseres Sponsors

2 Motoren auf der Hinterachse --> Fahrdynamik

8. Auswahl des Akkusystem – Akkutyp, Kapazität, Stromstärke, Spannung, grobe Kosten

LiPo

7,4 kWh

400 A (benötigt 150A)

Betriebsspannung 370 V

Ladeschlussspannung 420 V

~ 8 k €

9. Welche Daten habt Ihr für die Auswahl der Motoren und Akkus (Kapazität usw.) zugrunde gelegt?

Motoren nach max. erlaubter Leistung ausgewählt

Motoren max Moment über Drehzahl

10. Gewicht der Systeme – Akku, Leistungselektronik, Motoren

Akku: ca. 65 kg

LE: ca. 8 kg

Motoren: ca. 2 x 10 kg

11. Welche Bauteile prüft Ihr auf welchen Prüfständen?

Motoren und LEs wurden auf Motorenprüfständen getestet.

Batterie wurde in HV-Labor getestet.

munichMotorsport e.V.

Maximilian Müller

Technischer Leiter Mechanik

Formula Student Team

c/o Hochschule München

Lothstraße 64

80335 München

Tel. Konstruktion Electric: +49 (0) 89 1265 7695

Tel. Konstruktion Combustion: +49 (0) 89 1265 7696

E-Mail: Maximilian.Mueller@munichmotorsport.de

Web: www.munichmotorsport.de

1. Motivation – Warum habt Ihr Euch entschieden ein E-Fahrzeug zu bauen?

Meine Persönliche Motivation ist in der Formula Student so viel Zeit wie möglich zu haben ein Auto zu testen (und nebenher noch das Studium hin zu bekommen). So blöd es klingt die Entscheidung für ein e-Fahrzeug ist gefallen wegen dem Geld. Es ist wahnsinnig viel leichter für ein e-Auto Geld und Fertiger aufzutreiben. Wenn man an diese Recourcen leichter ran kommt hat man logischerweise mehr zeit für FS und Studium. Die andere Sache ist dass wir an der Hochschule eine recht rege e Fakultät haben. Während die Maschbauer u Fahrzeugtechniker gerade mal einen Prof nach HHeim schicken kommen von der e Fakultät gleich 4 Profs. Auch dadurch wird einem der Rücken frei gehalten, um FS und Studium unter einen Hut zu bringen.

und wir haben uns entschieden (eigentlich) nur ein fahrzeug zu bauen aber der Grund ist zu lang für eine Mail gerne auch Tel...

2. Sicherheitsvorkehrungen – Welche Vorkehrungen habt Ihr getroffen?

seit diesem jahr bekommen wir von der hochschule einen eigenen raum wo lipos die nicht in dem Akkukontainer der am fahrzeug ist gelagert werden können. Wenn am offenen Akkukontainer gearbeitet wird muss man in diesen Raum gehen.

3. Wie hat sich Deine Hochschule für die Sicherheit engagiert?

eben dieser raum und es gibt am anfang der Saison eine sicherheitseinweisung von einem Prof der allen teammitgliedern sagt worauf man e spizifisch bei einem Fahrzeug achten muss.

4. Wie habt Ihr das Team umstrukturiert, bzw. habt Ihr das Team umstrukturiert?

ja es gibt einen mechanisch technischen leiter und einen technischen leiter für die e komponenten ich sags dir die e leute ticken schon ein bisschen anders. aber nicht negativ. aber man merkt dass e und mech einfach zwei welten sind. das ist nicht wie bei verbrenner teams so dass da jeder überall mitdiskutiert. jeder macht was er kann. auch nicht unangenehm aber ein bisschen komisch da man nicht das gefühl hat nen überblick zu haben

5. Produktion – Wie und wo habt Ihr die Akkus zusammengebaut, separater Raum oder einfach bei Euch in der Werkstatt?

siehe oben

6. Entsorgung/Recycling – Wie entsorgt Ihr verbrauchte Akku?

wissen wir bisher noch genau so wenig wie die ganze welt die diesen politisch geputschen e schwachsinn über sich ergehen lassen muss...

bislang sind die akkus einfach im auto geblieben... und es fährt immer weniger lang hahaha...

7. Motorenkonzept – Warum habt Ihr euer System gewählt?

klar zwei motoren wegen torque vectoring... der fahrdynamier dankts...

8. Auswahl des Akkusystem – Akkutyp, Kapazität, Stromstärke, Spannung, grobe Kosten

grobe kosten? ohne sponsoring ca 15000€ lipos und kapazität???? so viel dass wir hoffen den endurance mit nur kaum minimierter leistung durch zu fahren.

Problem Wärmeentwicklung im Akku wie kühlen ohne über die luft feuchtigkeit in den Kontainer zu bekommen...

klar lipo weil viel energie und wenig gewicht...

die spannung hängt vom optimalen betriebsbereich des jeweilig verwendeten Motors ab...

9. Welche Daten habt Ihr für die Auswahl der Motoren und Akkus (Kapazität usw.) zugrunde gelegt?

sau grobe rechnungen...

ein wunder dass es funktioniert...

10. Gewicht der Systeme – Akku, Leistungselektronik, Motoren

ein motor wiegt 11kg

die Leistungselektronik für beide motoren ca 15kg und

der akku ca 35kg

aber dass sind alles nur grobe werte da wir unser system dieses jahr komplett umgestellt haben da das alte auto ne lame ente war...

nicht zu vergessen die niedervolt komponenten. Irgend ein unabhängig betriebenes system muss diesen e-wahnsinn ja überwachen bzw steuern... also nochmal 1kg akku und ein extra kabelbaum der irgendwie nicht vom hochvolt gestört werden sollte und noch ein paar steuergeräte/platinen und natürlich ein Logger für die fahrwerker

11. Welche Bauteile prüft Ihr auf welchen Prüfständen?

haben einen motor u getriebepfprüfstand gebaut. dass fertig zusammen gebaute system kann also ohne auto getestet werden. hier haben wir unterstützung durch irgend ein getriebe labor...

DUT Racing Team

Richard Kruithof

Stevinweg 1

2628CN Delft

Tel: +31(0)15 278 8891

E-Mail: r.j.kruithof@gmail.com

Web: dutracing.tudelft.nl

Hey Martin,

I gladly answered your questions, see the answers added in the attachments. As you said there is indeed an extra educational value to designing electric vehicles and I definitely recommend it. It would be a great thing to see HAWKS go electric, as the competition becomes more fun the more real competitors there are.

1. Motivation – Why did you choose to build an E-Car?

Initially for the challenge of having to develop something entirely different, however also for the promise it had. Electric racing offers higher accelerations than combustion vehicles, allows for individual motor control and (depending on the system) offers KERS off the shelf.

2. Safety measures – Which precautions did you take?

First thing that should be mentioned is that the rules enforce a lot of safety on the car by themselves. However you can still get yourself in dangerous situations by not following these, or skipping corners.

Special precautions we took are split up in two categories:

- While building the batteries there is a rule that you minimize working with electrically conductive tools, never work alone with voltages over 40V, and don't leave any drinks on the table with the cells on. Note that our batteries are built up from individual modules of 25V each, meaning you could short circuit them over yourself and not even feel a

thing. As a result there are only dangerous voltages present during the final assembly of the battery.

- While testing with the car there are very well defined responsibilities, generally only one person operates the car, turns on the tractive system, charges the system and enables it to drive. While the car is active nobody is allowed to touch the car, and the responsible only does so while wearing electrically insulating gloves.

3. How/in which way did your University get involved with the safety?

They offered someone who was experienced in the field of electrical systems whom we could ask questions regarding electrical safety.

4. Did you restructure your team and if yes, what did you restructure and why?

Hardly, the top level systems are still the same, except that the powertrain is no longer a fuel tank with an engine, but a battery with motor controllers and a battery. The battery is a lot of work however, so one might split up powertrain into two separate departments.

5. Production - Where and how did you assemble the accumulator? Do you have a separate room or did you use the same room as before (your workshop)?

In both 2011 and 2012 we used a separate room, this is very important! A battery generally consists of very many parts, so you need a lot of space to work on it (2 desks at the least). While you are occupying this space you don't want to be disturbed, since a mistake can destroy a battery. Also you don't want people who have nothing to do with it out of the way, batteries are dangerous!

6. Disposal and recycling - How do you dispose your used accumulators?

Simply through a battery recycling box.

7. Motor concept – why did you choose your system?

This is really a process you should do for yourself. All I can say is that we followed the systems engineering approach very closely when choosing it.

8. Choice of the accumulator system – type of accumulator, capacitance, amperage, voltage, costs (approx.)

- LiPo,
- 144s2p,
- 4.3kWh,
- 150A peak,
- 600v.
- Generally cells cost 10-15dollar a piece, which means a battery generally costs 5-8 thousand euros. Sponsoring is a little tricky, because not all manufacturers give sponsoring since FS teams only take very small batches, you might not get sponsoring for the cells you want.

9. Which data forms the basis of your choice of the accumulators (capacitance,..)?

For the first year we looked at how much fuel the DUT10 used, and computed how much energy that was through efficiencies, and scaled that to what we expected to need for an electric vehicle.

10. Weight of the systems – accumulator, power electronic, motors?

- Accumulator 32kg,
- inverters 8kg total,
- motors 4kg each (x4)

11. Which components do you test on which test benches?

In 2011 we tested the batteries in a full scale testing environment and the motors on a dyno. In 2012 we only tested the motors.

FaSTDa Formula Student Team Darmstad

Matthias Borngräber

Hochschule Darmstadt, FbMK

z.Hd. FaSTDa

Schöfferstraße 3

D-64295 Darmstadt

Telefon: 06151/3914865

Mobil: 0160/8066427

E-Mail: matthias.borngraeber@fastda-racing.de

Web: <http://www.fastda-racing.de>

1. Motivation – Warum habt Ihr Euch entschieden ein E-Fahrzeug zu bauen?

Unsere Elektriker waren mit auf den Events, und haben da einfach ausgedrückt "Blut geleckt", die haben das Ganze bei uns ins Rollen gebracht und das Ganze Team mit überzeugt, zumal man für ein E Fahrzeug deutlich leichter Sponsoren begeistern kann

2. Sicherheitsvorkehrungen – Welche Vorkehrungen habt Ihr getroffen?

Die vorgeschriebenen vom Reglement sowie der Hochschule, Sicherheitsschrank, abgetrennter Arbeitsbereich etc.

3. Wie hat sich Deine Hochschule für die Sicherheit engagiert?

Überprüfung der Räumlichkeiten, finanzielle Unterstützung

4. Wie habt Ihr das Team umstrukturiert, bzw. habt Ihr das Team umstrukturiert?

Wir haben die bisherige Strukturierung des Verbrenners einfach auf E kopiert, Chef und einzelne Bereiche

5. Produktion – Wie und wo habt Ihr die Akkus zusammengebaut, separater Raum oder einfach bei Euch in der Werkstatt?

Unser Akku ist eine eigen Konstruktion und wurde von uns Zusammengebaut, Hilfe dafür bekamen wir bei der Firma BMZ, dort haben wir ihn zusammengebaut und dort wird er auch gelagert

6. Entsorgung/Recycling – Wie entsorgt Ihr verbrauchte Akku?

Da wir noch nicht groß mit dem Wagen gefahren sind, gab es bisher keine verbrauchten Akkus, ich glaube wir haben nicht einmal Ersatz Akkus, Entsorgung ebenfalls über die Firma BMZ oder Entsorgungseinrichtung der Hochschule

7. Motorenkonzept – Warum habt Ihr euer System gewählt?

Wir sind davon überzeugt das "Leicht sein" der richtige Weg ist, also haben wir einen kleinen, leichten Motor gesucht und waren bereit auf Leistung zu verzichten, als wir dann das Angebot für den jetzt verwendeten Flugzeugmotor bekamen, war die Sache geritzt

8. Auswahl des Akkusystem – Akkutyp, Kapazität, Stromstärke, Spannung, grobe Kosten

Leider mussten wir mit Rundzellen arbeiten, da BMZ noch keine Erfahrung mit Flachzellen hatte, zudem fühlten sich unsere Elektriker auf sicherem Wege wenn man erstmal Rundzellen verwendet, für nächste Saison soll definitiv was neues her, ich würde euch auch nur Flachzellen weiterempfehlen.

Spannung und Stromstärke wurde auf den Motor passend abgestimmt.

Die Kapazität haben wir durch eine Reichweitenberechnung festgestellt, und noch mal ein ganzes Stück draufgeschlagen um den Motor im Endurance nicht runterdrosseln zu müssen.

Erste Testfahrten haben ergeben das wir ca. 25km fahren können ohne nachzuladen

Kosten: ca. 20.000,-

9. Welche Daten habt Ihr für die Auswahl der Motoren und Akkus (Kapazität usw.) zugrunde gelegt?

Streckenlänge,

Fahrzeuggewicht,

gewünschte Beschleunigung/Geschwindigkeit

10. Gewicht der Systeme – Akku, Leistungselektronik, Motoren

Unser Motor wiegt 10kg,
der Akku aktuell ca. 80kg ist also ein echtes Schwergewicht,
Steuerungsgerät wiegt ca. 6kg,
das Gewicht des restlichen Kleinkrams kenn ich leider nicht, würde es aber auch
Insgesamt auf ca. 7kg schätzen

11. Welche Bauteile prüft Ihr auf welchen Prüfständen?

Den Motor lassen wir auf einem Prüfstand an der Hochschule laufen,
einen Akku Prüfstand haben wir nicht,
wurde bei BMZ getestet sowie am Prüfstand für den Motor angeschlossen

Abschließend muss ich dir folgendes mitteilen, wir sind noch absolute Neulinge im E
Bereich, und die mitgeteilten Daten sind keineswegs Optimum und das wo wir
hinwollen. Um ernsthafte Überlegungen und Vergleiche ziehen zu können, solltest du
dich an die Top Teams wenden, was du vermutlich auch getan hast.

Ich hoffe trotzdem das Dir die Angaben einigermaßen weiterhelfen können.

Falls weitere Fragen offen sind, melde dich einfach.

GreenTeam Uni Stuttgart e.V.

Benjamin Möller

Sitz & Außenhaut E0711-1

c/o FKFS

Pfaffenwaldring 12

D-70569 Stuttgart

Tel: +49 0711 685-68117

Mobile: 0160 1809663

E-Mail: b.moeller@greenteam-stuttgart.de

Web: www.greenteam-stuttgart.de

1. Motivation – Warum habt Ihr Euch entschieden ein E-Fahrzeug zu bauen?

-

2. Sicherheitsvorkehrungen – Welche Vorkehrungen habt Ihr getroffen?

Sicherheit ist definitiv ein riesen Thema bei der ganzen Sache. Man hat bei den Arbeiten an Hochvoltsystemen nun mal mit ganz anderen Gefahren zu kämpfen als bei konventionellen Autos, die man vor allem so nicht aus dem Alltag kennt.

Man sollte auf jeden Fall danach schauen, dass man irgendwo eine Schulung für Arbeiten mit HV-Systemen bekommt. Wir haben damals eine bei nem Sponsor mitmachen können. Das war echt net schlecht. Dann weiß man wenigstens, welche Regeln man später missachtet...

Definitiv muss man Regeln aufstellen bzgl. der Arbeitszeiten an Hochvolt. Bei uns hätten sich in der ersten Saison einige Leute beinahe umgebracht, weil sie völlig übermüdet und/oder angetrunken am Akku rumgebastelt haben (mich eingeschlossen). Das war echt einige Male echt knapp...

Außerdem muss man meiner Meinung nach für die Arbeiten am Akku (das ist eigentlich der Part, bei dem man gezwungenermaßen direkt an Hochspannungsteilen arbeiten muss) ein komplett eigener Raum zur Verfügung stehen. Bei uns war das so und für den Raum gelten dann auch eigene Regeln. Z.B. darf sich nur eine gewisse Anzahl Personen gleichzeitig im Raum aufhalten, man

muss anklopfen und dann die Tür vorsichtig öffnen, damit niemand erschreckt wird, wenn er gerade bis zu den Ellbogen im Akku hängt

- Entsprechendes Equipment ist nicht direkt billig, muss man halt nach nem Sponsor schauen. Das Reglement schreibt eh das meiste vor.
- Das sind halt alles Dinge, die einen übers Jahr schon deutlich Zeit und Nerven kosten, die man sonst halt einfach mal net hat. Und man muss da schon mit ein bissl Disziplin rangehen.
 - Mit normalen Feuerlöschern kann man brennende Akku-Zellen nicht löschen
 - es gibt spezielle Löscher für sowas, die sind aber unbezahlbar und da findet man auch niemanden, der die sponsort,
wenn die Karre mal brennt, dann einfach warten, bis es wieder aufhört und dann reparieren. Haben wir in der ersten Saison einmal genau so gemacht – is super...

3. Wie hat sich Deine Hochschule für die Sicherheit engagiert?

-

4. Wie habt Ihr das Team umstrukturiert, bzw. habt Ihr das Team umstrukturiert?

-

5. Produktion – Wie und wo habt Ihr die Akkus zusammengebaut, separater Raum oder einfach bei Euch in der Werkstatt?

Über die Lagerung der Akkus ham wir uns nie Gedanken gemacht – die werden halt irgendwo hingelegt

6. Entsorgung/Recycling – Wie entsorgt Ihr verbrauchte Akku?

-

7. Motorenkonzept – Warum habt Ihr euer System gewählt?

-

8. Auswahl des Akkusystem – Akkutyp, Kapazität, Stromstärke, Spannung, grobe Kosten

Kosten sind schon ein ziemliches Thema.

Gute Akku-Zellen sind einfach unfassbar teuer. Wenn man da keinen Sponsor findet, der einem die für lau gibt, dann muss man dafür schon mal nen 5-stelligen Posten in der Budget-Planung berücksichtigen. Wir hatten im erster Jahr jedenfalls massive Geldprobleme und hätten es sicher nicht gestemmt bekommen, die Zellen auch noch zu kaufen.

Ladegeräte sind auch net gerade billig. Wir hatten im ersten Jahr das Glück, dass wir uns regelmäßig eins von der Uni ausleihen konnten, das für unsere Anforderungen gepasst hat. Mittlerweile hat das Team ein eigenes, das von der Uni gekauft wurde.

9. Welche Daten habt Ihr für die Auswahl der Motoren und Akkus (Kapazität usw.) zugrunde gelegt?

-

10. Gewicht der Systeme – Akku, Leistungselektronik, Motoren

-

11. Welche Bauteile prüft Ihr auf welchen Prüfständen?

Prüfstand hatten wir selber keinen für gar nix. Die Motoren waren bei dem Sponsor, von dem wir die bekommen haben mal auf dem Prüfstand.

Ist aber an sich bei weitem kein so großes Thema wie beim Verbrenner. Applikation in dem Sinn gibts normal groß nicht. Das macht die Leistungselektronik, man braucht nur ein Steuergerät, dass der sagt, wieviel Moment man an jedem Rad will. Das war zumindest bei uns so.

Wir ham da aber auch nix selber gemacht, sondern uns die Motoren samt Leistungselektronik von nem Sponsor geben lassen. Das Ganze dann noch ein bissl gewichtsoptimiert und fertig.

Das sind jetzt mal so die wesentlichen Punkte, die mir spontan einfallen. Wenn du zu irgendwas konkretere Fragen hast, kannst dich gern melden. Wenn's um die Feinheiten der E-Technik geht, bin ich dann nicht so unbedingt der richtige Ansprechpartner. Da würde ich dir empfehlen, dich an den Jürgen Falb zu wenden.

Der war bei uns im ersten Jahr mit dabei und ist inzwischen bei FSE fürs E-Scrutineering verantwortlich und insgesamt auch ein ziemlich umgänglicher Typ. Den erreichst unter j.falb@gvelop.de

Ansonsten gibts noch den Sven Digele (s.digele@greenteam-stuttgart.de). Der hat das Team letztes Jahr geleitet und von daher den besseren Überblick, wie die Dinge in der Zwischenzeit gehandhabt werden. Da hat sich schon einiges getan.

Das ist dann noch der letzte Punkt den ich hab. Man sollte sich vorher schon sehr gründlich Gedanken machen, woran man alles denken muss und was da auf einen zukommt (aber das scheinst du ja gerade zu machen). Wir haben im Herbst 2009 das Team eigentlich mehr so aus einer Bierlaune heraus gegründet, als wir gesehen haben, dass die Leistung net begrenzt ist :D Das ist zwar an sich eine schöne Sache, allerdings sind wir dann auch ziemlich blauäugig in die ganze Sache reingerannt. Wir hatten z.B. genau einen Mann für den Bau von den Akkus eingeplant und der war net mal E-Techniker. Mittlerweile ist für die Akkus ein Team von fünf oder sechs Leuten zuständig. Wir hätten uns sicher einiges ersparen können, wenn wir uns vorher über einige Dinge schlau gemacht hätten.

In diesem Sinn mal viel Spaß dabei. Aber lass es dir von einem sagen, der beides erlebt hat – Verbrenner bauen ist einfach besser.

WHZ Racing Team

Sebastian Zapf

Scheffelstraße 39

Haus 12 Raum 166

08066 Zwickau

Tel: +49 (0) 375 - 536 3850

E-Mail: sebastian.zapf@fh-zwickau.de

Web: <http://www.whz-racingteam.de>

1. Motivation – Warum habt Ihr Euch entschieden ein E-Fahrzeug zu bauen?

Wir sahen im Bereich des elektrischen Antriebs wesentlich mehr Innovationsmöglichkeiten! Im Bereich der Verbrennungsmotoren hatte man schon alles mal gesehen und man konnte nicht mehr so punkten.

2. Sicherheitsvorkehrungen – Welche Vorkehrungen habt Ihr getroffen?

Wir haben zum einen die Sicherheitsbestimmungen der FSG eingehalten, zum anderen haben wir uns selbst eigene Sicherheitsrichtlinien für die Arbeit in der Werkstatt/am Auto erarbeitet. Zum Beispiel haben wir in der Werkstatt ein Ampelsystem eingerichtet, welches zeigt, ob am Fahrzeug gearbeitet werden darf, oder ob nur Elektriker oder nur der SafetyResponsible dran arbeiten darf. Ein weiterer Punkt bezüglich Sicherheit ist die Abfolge an Punkten, welche man abarbeiten muss um das Tractive System zu aktivieren → LV an. Wenn ECU gebootet HV an. Dann Reset-Knopf drücken, 7 Sekunden warten, dann das Bremspedal drücken, dann Start drücken. Klingt zwar kompliziert, aber dadurch kann das TractiveSystem nur aktiviert werden, wenn man wirklich will!! Ein letzter Punkt sind die Räumlichkeiten: Wir haben die mechanische von der elektrischen Werkstatt komplett getrennt. Die Werkstatt für die Batteriezellen ist komplett aus dem Gebäude in einen Wohncontainer ausgelagert! Wenn nicht an den Zellen gearbeitet wird, lagern sie in einem separaten Aufbewahrungscontainer am Rand des Hochschulgeländes!

3. Wie hat sich Deine Hochschule für die Sicherheit engagiert?

Wie oben bereits beschrieben haben wir viele Räume von der Hochschule dafür zur Verfügung gestellt bekommen, welche entsprechend ausgestattet sind. Die Räume in denen Batterie lagern, sind klimatisiert und es sind die entsprechenden Löschmittel vorhanden. Die Lagermöglichkeiten für die Zellen sind auf dem momentan höchsten Stand, welchen man auf dem Sektor bekommen kann. Es gab vorab mehrere Ortsbegehungen und Meetings mit verschiedenen Prüfern und Organisationen (TÜV, Arbeitsgenossenschaft, etc.) um ein entsprechendes Sicherheitskonzept aufzustellen!

4. Wie habt Ihr das Team umstrukturiert, bzw. habt Ihr das Team umstrukturiert?

Natürlich wurde der Bereich der Elektriker aufgestockt und innerhalb nochmal unterteilt in einen Bereich HV und einen Bereich LV. Im Bereich Powertrain, hat sich nur wenig geändert, wegen der Elektromotoren. Die restlichen Bereiche blieben unberührt.

5. Produktion – Wie und wo habt Ihr die Akkus zusammengebaut, separater Raum oder einfach bei Euch in der Werkstatt?

Wie bereits oben beschrieben. Die Akkus lagern wenn sie nicht benutzt werden in einem klimatisierten Container am Rand des Hochschulgeländes, welcher mit einer automatischen Löschanlage ausgestattet ist. An ihnen gearbeitet wird in einem Wohncontainer, welcher ebenfalls klimatisiert ist und mit Handfeuerlöschern ausgestattet ist. In der eigentlichen „mechanischen“ Werkstatt wird nicht am HV-System gearbeitet, außer es ist notwendig, dass es im Fahrzeug betrieben wird.

6. Entsorgung/Recycling – Wie entsorgt Ihr verbrauchte Akku?

Dieses Problem ist noch nicht ganz gelöst! Die meisten weigern sich verbrauchte LiPo-Zellen in solchen Mengen anzunehmen. Momentan lagern sie noch bei uns im Container.

7. Motorenkonzept – Warum habt Ihr euer System gewählt?

Die eigenentwickelten Motoren waren damals 2010 eine Diplomarbeit und haben seitdem einen guten Dienst getan. Der Vorteil an selbstgebaute Motoren ist, dass man sie genau auf die Bedürfnisse anpassen kann, Nachteil ist natürlich dass sie durch ihren Prototypenstatus viel anfälliger als Kaufmotoren sind.

8. Auswahl des Akkusystem – Akkutyp, Kapazität, Stromstärke, Spannung, grobe Kosten

Wir haben uns von verschiedenen Herstellern Muster bestellt und diese getestet. Danach gab es eine Auswahlmatrix welche eine Zelle als „Beste“ ausgab. Wir haben LiPo-Zellen mit einer Kapa von insgesamt 6,7kWh bei 600V die maximale Stromstärke beträgt 150A. Der Kasten kostet alles in allem ca. 15000€.

9. Welche Daten habt Ihr für die Auswahl der Motoren und Akkus (Kapazität usw.) zugrunde gelegt?

Wir gingen von den Daten aus dem Vorjahr aus und machten dann verschiedene LapTime-Simulationen. Es waren natürlich mehrere Loops notwendig, um am Ende ein gutes Ergebnis zu bekommen.

10. Gewicht der Systeme – Akku, Leistungselektronik, Motoren

Der komplette Akkukasten wiegt ca. 60kg. Die hinteren Motoren ca. 12kg pro Stück. Die Leistungselektronik schätze ich auf ca. 8kg, weiß ich aber jetzt nicht ganz genau.

11. Welche Bauteile prüft Ihr auf welchen Prüfständen?

Wir haben einen Motorenprüfstand, auf welchem wir die Motoren inkl. Umrichter testen. Für die einzelnen Zellen haben wir Zelltester, mit denen wir den Innenwiderstand und verschiedene Ladezyklen testen und auch Miss-Use-Test durchführen. Das komplette Fahrzeug wird dann neben der „Straße“ auch auf nem Rollenprüfstand gefahren!

ANHANG C

Tabelle 5: Vergleich der technischen Daten ausgewählter Teams

Team	Jahr	Akku-System	Anzahl Zellen	Akku-C in kWh	Akku-U in V	Akku-Konf.	Anzahl Motoren	Motorentyp	M in Nm	P in kW	Pges in kW	m in kg	m/P in kg/kW	i	Getriebeart	
DUT Racing	2011	Lithium Polymer	288	5,7	355	96S3P	2	AMK DT5-30-10-EOW	57	2 x 28	56	177	3,16	1 : 7,24	geradverzahntes Getriebe	DUT Racing
TU Delft	2012	Lithium Polymer	228	4,2	600	114S2P	4	AMK DT5-12-10	4 x 21	4 x 24	96	148	1,54	f 1 : 7 r 1 : 13	front Planetengetriebe rear zweistufiges Getriebe	
	2013	Lithium Polymer	288	6,3	600	144S2P	4	AMK DT5-14-10	4x 25	4 x 27	108	173	1,60	1 : 14,25	k. A.	
AMZ Racing	2010	Lithium Polymer	k. A.	8,7	126	k. A.	2	AGNI 95R DC-Motoren Einzelradantrieb	k. A.	2 x 30	60	227	3,78	1 : 5,3	Kettentrieb	AMZ Racing
	2011	Lithium Polymer	k. A.	7	152	k. A.	2	AMZ AC-Motoren mit Einzelradantrieb	k. A.	2 x 35	70	181	2,59	1 : 5,12	zweistufiges Stirnradgetriebe	
ETH Zürich	2012	Lithium Polymer	288	5,33	150	k. A.	2	BLPM	2x 65	2 x 40	80	175	2,19	1 : 4,85	zweistufiges Stirnradgetriebe	
	2013	Lithium Polymer	336	6,22	480	k. A.	4	PMSM	4x 30	4 x 35	140	175	1,25	1 : 11,8	Planetengetriebe	
Greenteam Stuttgart	2010	Lithium Polymer	k. A.	8,5	597	k. A.	2	AMK DP7-60-10-POW-7200	k. A.	2 x 47	94	280	2,98	1 : 5,5	k. A.	Greenteam
	2011	Lithium Polymer	k. A.	8,4	588	k. A.	2	AMK DT7-80-20-POW	k. A.	2 x 50	100	266	2,66	1 : 5,5	zweistufiges geradverzahntes Getriebe	
Universität Stuttgart	2012	Lithium Polymer	k. A.	6,9	600	k. A.	2	AMK DT5-26-10-POW	1140	2 x 56	112	230	2,05	1 : 10	zweistufiges Stirnradgetriebe	
	2013	Lithium Polymer	k. A.	6,2	600	k. A.	4	AMK DT5-14 AMK DT5-26	k. A.	2 x 20 & 2 x 26	92	190	2,07	f 1 : 7,4 r 1 : 6,5	front Planetengetriebe in Radträger rear Stirnradgetriebe	
KA-Racing	2010	Li-Ion	96	7	400	k. A.	1	Zytek IDT 120-55	120	1 x 55	55	298	5,42	1 : 10,5	einstufiges Planetengetriebe mit Kegelrad	KA-Racing
	2011	LiFePo4	120	5,6	410	k. A.	2	permanentenerregte Synchronmotoren	k. A.	2 x 42	84	250	2,98	1 : 13,5	einstufiges Planetengetriebe	
Karlsruhe Institute of Technologie	2012	LiFePo4	112	7,4	370	28S4P	2	permanentenerregte Synchronmotoren	k. A.	2 x 32	64	210	3,28	1 : 13,5	einstufiges Planetengetriebe	
	2013	LiFePo4	k. A.	6,4	355	k. A.	4	permanentenerregte Synchronmotoren	k. A.	4 x 21	85	200	2,35	1 : 12,4	einstufiges Planetengetriebe	

Anhang D

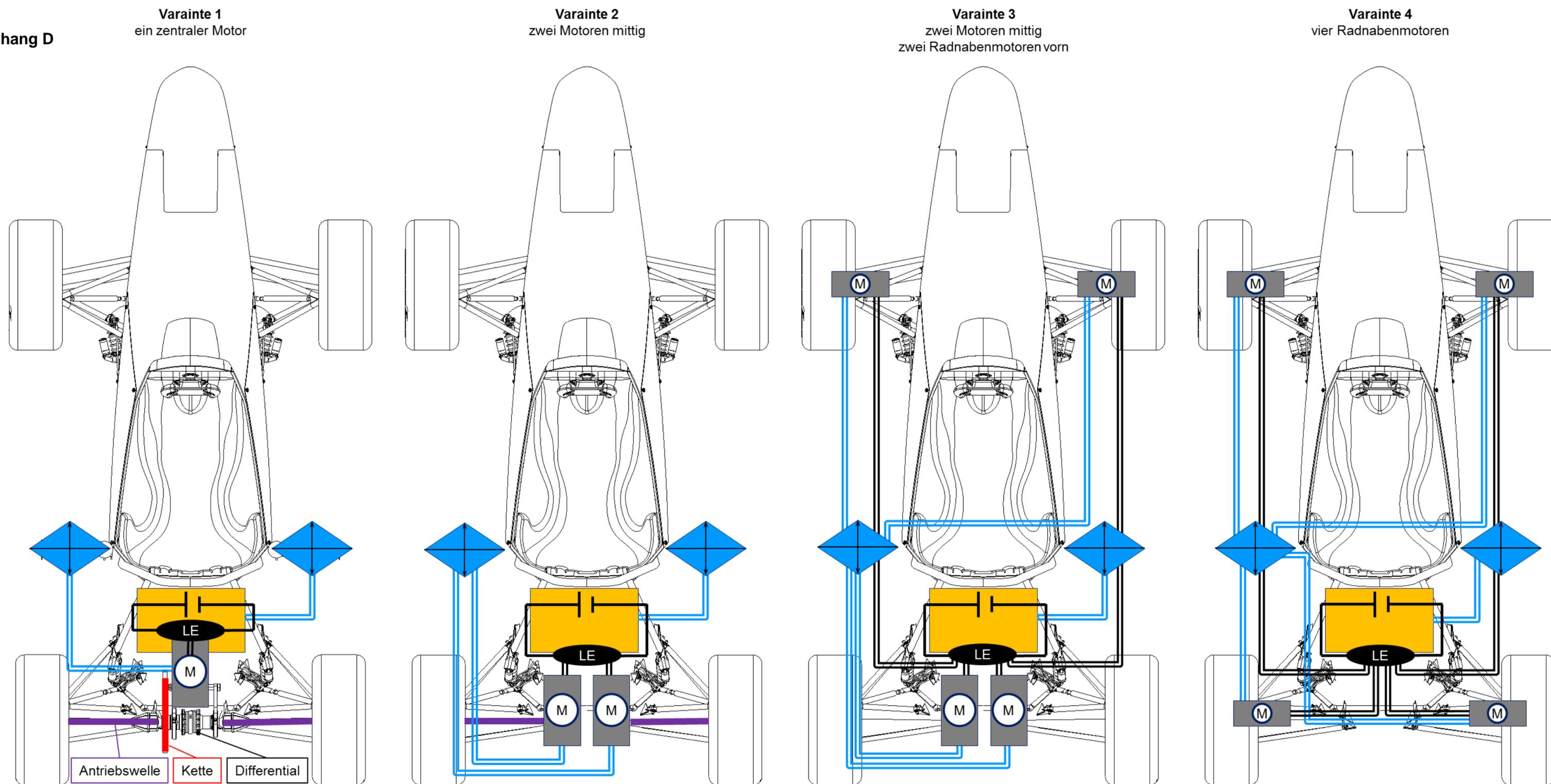


Abbildung 41: schematische Darstellung möglicher Motorenkonzepte

ANHANG E

Tabelle 6: Analyse der prozentualen Mitgliederverteilung unterschiedlicher Formula Student Electric Teams

	Team DUT Racing	Personen	Team AMZ Racing	Personen	Team Grennteam Stuttgart	Personen	Team KA-Racelng	Personen
	proz. Anteil		proz. Anteil		proz. Anteil		proz. Anteil	
Fahrwerk	18%	10	21%	8	26%	8	19%	8
Frame & Body	16%	9	26%	10	19%	6	36%	15
Motor & Antrieb	36%	20	16%	6	29%	9	17%	7
Akku	0%	0	11%	4	26%	8	0%	0
Elektronik	16%	9	13%	5	0%	0	29%	12
Vehicle Dynamics	14%	8	13%	5	0%	0	0%	0

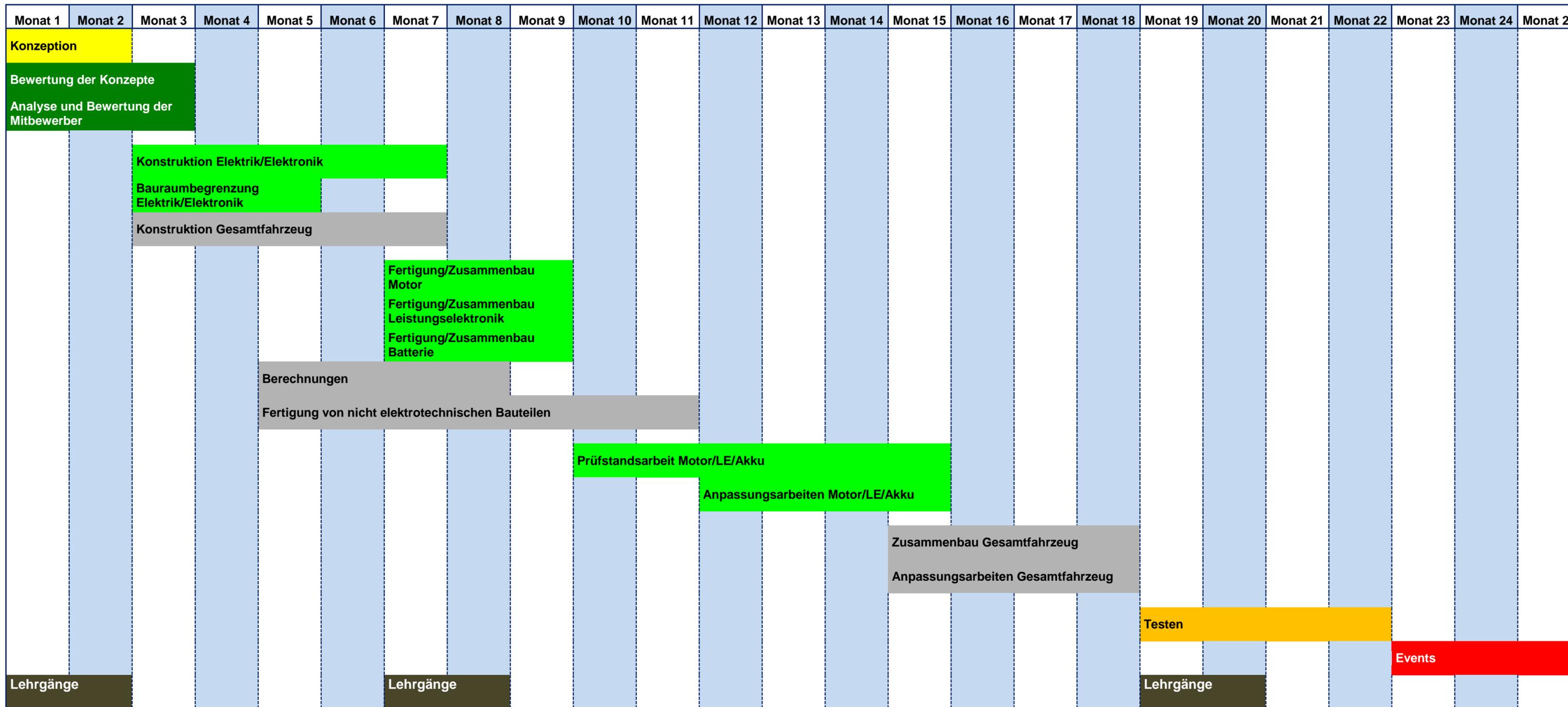
Team DUT Racing: 18%, 16%, 36%, 16%, 14%, 0%

Team AMZ Racing: 21%, 26%, 16%, 13%, 13%, 11%

Team Grennteam Stuttgart: 26%, 19%, 29%, 26%, 0%, 0%

Team KA-Racelng: 19%, 36%, 17%, 29%, 0%, 0%

ANHANG F



ANHANG G

Formula Student Germany
Results



FSE Energy Efficiency

Car #	University	Energy [kwh]	endurance time [ss:hh]	Laps	Energy per Lap [kwh]	AVG Lapttime [ss:hh]	scor. Lapttime [ss:hh]	scor. Energy [kwh]	Efficiency Factor	Scores (max 100)	Placing
E44	Dresden TU	2,288	1486,587	15	0,153	99,106	99,106	0,153	0,796	100,00	1
E1	Delft TU	3,673	1448,921	18	0,204	80,496	80,496	0,204	0,733	92,38	2
E4	München TU	3,318	1668,558	18	0,184	92,698	92,698	0,184	0,704	88,54	3
E76	Freiberg TU	3,513	1687,27	18	0,195	93,737	93,737	0,195	0,658	81,55	4
E26	Stuttgart U	4,512	1485,669	18	0,251	82,537	82,537	0,251	0,582	67,62	5
E40	Eindhoven TU	4,068	1651,808	18	0,226	91,767	91,767	0,226	0,580	67,31	6
E33	Zürich ETH	4,769	1420,558	18	0,265	78,920	78,920	0,265	0,576	66,33	7
E58	Leuven Group T	4,533	1721,302	18	0,252	95,628	95,628	0,252	0,500	47,90	8
E34	Ingolstadt UAS	4,878	1737,714	18	0,271	96,540	96,540	0,271	0,460	35,80	9
E67	Osnabrück UAS	5,582	1645,48	18	0,310	91,416	91,416	0,310	0,425	23,08	10
E20	Bayreuth U	5,466	1745,835	18	0,304	96,991	96,991	0,304	0,409	16,67	11
E32	München UAS	5,414	1613,131	17	0,318	94,890	94,890	0,318	0,398	12,22	12
E21	Karlsruhe KIT	5,375	1115,035	14	0,384	79,645	79,645	0,384	0,394	10,14	13
E31	Odense SDU	5,906	1772,341	18	0,328	98,463	98,463	0,328	0,373	0,07	14
E14	Deggendorf UAS	3,241	807,873	9	0,360	89,764	89,764	0,360	0,372	0,00	15
E11	Ravensburg DHBW										
E12	Köln UAS										
E17	Augsburg UAS										
E22	Stuttgart DHBW										
E23	Hamburg TU										
E25	Darmstadt TU										
E37	Sint-Katelijne-Waver DNI										
E54	Barcelona UPC										
E62	Regensburg UAS										
E64	Kaiserslautern TU										
E65	Wiesbaden UAS										
E69	Diepholz UAS										
E71	Stockholm KTH										
E85	Montréal Poly										
E96	Zwickau UAS										
E97	Landshut UAS										
E100	Siegen U										
			Tmin		78,92	ss:hh					
			Tmax		105,20	ss:hh					
			Emin		0,15	kwh					
			EFmin		0,37						
			EFmax		0,80						

Abbildung 42: Efficiency Wertung FSE 2013 [FOR13]



Erklärung zur selbstständigen Bearbeitung einer Abschlussarbeit

Gemäß der Allgemeinen Prüfungs- und Studienordnung ist zusammen mit der Abschlussarbeit eine schriftliche Erklärung abzugeben, in der der Studierende bestätigt, dass die Abschlussarbeit „– bei einer Gruppenarbeit die entsprechend gekennzeichneten Teile der Arbeit [(§ 18 Abs. 1 APSO-TI-BM bzw. § 21 Abs. 1 APSO-INGI)] – ohne fremde Hilfe selbständig verfasst und nur die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt wurden. Wörtlich oder dem Sinn nach aus anderen Werken entnommene Stellen sind unter Angabe der Quellen kenntlich zu machen.“

Quelle: § 15 Abs. 5 APSO-TI-BM bzw. § 15 Abs. 5 APSO-INGI

Dieses Blatt, mit der folgenden Erklärung, ist nach Fertigstellung der Abschlussarbeit durch den Studierenden auszufüllen und jeweils mit Originalunterschrift als letztes Blatt in das Prüfungsexemplar der Abschlussarbeit einzublenden.

Eine unrichtig abgegebene Erklärung kann -auch nachträglich- zur Ungültigkeit des Studienabschlusses führen.

Erklärung zur selbstständigen Bearbeitung der Arbeit

Hiermit versichere ich,

Name: Koschitzki

Vorname: Martin

dass ich die vorliegende Bachelorarbeit bzw. bei einer Gruppenarbeit die entsprechend gekennzeichneten Teile der Arbeit – mit dem Thema:

Analyse grundlegender Voraussetzungen zur erfolgreichen Entwicklung eines Formula Student Electric Fahrzeuges innerhalb des Projektes HAWKS Racing e.V. an der HAW Hamburg

ohne fremde Hilfe selbständig verfasst und nur die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe. Wörtlich oder dem Sinn nach aus anderen Werken entnommene Stellen sind unter Angabe der Quellen kenntlich gemacht.

- die folgende Aussage ist bei Gruppenarbeiten auszufüllen und entfällt bei Einzelarbeiten -

Die Kennzeichnung der von mir erstellten und verantworteten Teile der -bitte auswählen- ist erfolgt durch:

Hamburg

28.08.2013

Martin Koschitzki

Ort

Datum

Unterschrift im Original