

Hochschule Luzern

Technik & Architektur



Formula Student Electric

ESF, Cost & Manufacturing, Kabelbaum, Sensoren/Aktoren, FDE-PCB

Bachelor-Thesis im Fachbereich Elektrotechnik und Informationstechnologie, BAT

Verfasst von:
Camille Schwager

Betreut von:
Prof. Erich Styger
Prof. Rolf Mettler

Horw, 11. Juni 2021

Klassifikation: Nach Rücksprache

Inhaltsverzeichnis

I	Abkürzungen	v
II	Einleitung	vi
	Formula Student	vi
	Reglement	vi
	Disziplinen	vi
	Organisation	ix
	Akademischer Motorsportverein Zürich	ix
	Teamstruktur <i>alvier</i>	ix
	Modul <i>Electronics</i>	x
	Zeitplan	xi
1	Arbeitspakete	1
2	ESF	2
	2.1 Einleitung	2
	2.2 Aufbau	2
	2.3 Korrekturen	2
	2.4 FS East	3
	2.5 Ausblick	4
3	Cost & Manufacturing	5
	3.1 Einleitung	5
	3.2 Cost Understanding Report	5
	3.3 Cost Explanation File	6
	3.4 Fazit	6
4	Kabelbaum	7
	4.1 Einleitung	7
	4.2 magnetorheologische Flüssigkeit (MRF)-Dämpfer	7
	4.3 Kühlung	7
	4.4 ARH	8
	4.5 RWS	8
	4.6 Schwierigkeiten	9
5	Sensoren	10
	5.1 Übersicht	10
	5.2 Einleitung	10
	5.3 Quadraturencoder	11
	5.4 Dehnmessstreifen	11
	5.4.1 Bedarf	11
	5.4.2 Berechnung Fehler	12

5.4.3	Verstärker	12
5.4.4	PCB	14
5.5	Linearpotentiometer RWS	15
6	Aktoren	16
6.1	Einleitung	16
6.2	Übersicht	16
6.3	Konzepte	17
6.3.1	MRF-Dämpfer	17
6.3.2	Kühlung	18
6.3.3	Schwierigkeiten	19
6.3.4	ARH	20
6.3.5	RWS	21
7	FDE-PCB	23
7.1	Einleitung	23
7.2	Neues PCB	23
7.2.1	Schwierigkeiten	24
7.2.2	Inbetriebnahme	24
7.3	Ausblick	25
8	Schlussdiskussion	26
	Abbildungsverzeichnis	27
	Tabellenverzeichnis	28
	Literatur- und Quellenverzeichnis	29
8.1	Quellen	29
	Literatur- und Quellenverzeichnis	29
A	Anhang	30
1.1	Anhang 1	30
1.2	SD-Speicherkarte	30
1.3	Schema FDE-PCB	31

I | Abkürzungen

ADC	Analog Digital Converter
AIR	Accumulator Isolation Relais
AMS	Accumulator Management System
AMZ	Akademischer Motorsportverein Zürich
ARH	Active Ride Height
BSPD	Brake System Plausibility Device
CAN	Controller Area Network
CFD	Computational Fluid Dynamics
DRS	Drag Reduction System
EMV	Elektromagnetische Verträglichkeit
EMK	Elektromotorische Kraft
ESF	Electrical System Form
ETH	Eidgenössische Technische Hochschule
FDE	Feder-Dämpferelement
FSC	Formula Student Combustion
FSD	Formula Student Driverless
FSE	Formula Student Electric
FSG	Formula Student Germany
HSLU	Hochschule Luzern
LV	Low Voltage
MCM	Mini-CAN-Modul
MC	Mikrocontroller
MRF	magnetorheologische Flüssigkeit
OP	Operationsverstärker
PCB	Printed Circuit Board
PWM	Pulsweitenmodulation
RWS	Rear Wheel Steering
SAE	Society of Automotive Engineers
SECO	Staatssekretariat für Wirtschaft
SMD	Surface-mounted Device
SNR	Signal to Noise Ratio
TS	Tractive System
VCU	Vehicle Control Unit

II | Einleitung

Formula Student *

Formula Student ist ein internationaler Ingenieurswettbewerb, in dem Studenten aus verschiedenen Fachrichtungen einen Rennwagen entwickeln. Der gesamte Wettbewerb besteht aus drei verschiedenen Kategorien. Diese unterscheiden sich zwischen Formula Student Combustion (FSC), Formula Student Electric (FSE) und Formula Student Driverless (FSD). Die Fahrzeuge werden bei FSC mit einem Verbrennungsmotor angetrieben, in FSE hingegen mit einem oder mehreren Elektromotoren. Bei FSD fahren die Fahrzeuge ohne Fahrer, der Antrieb ist dabei nicht vorgeschrieben.

Reglement

Alle Wettbewerbe unterliegen dem Formula Society of Automotive Engineers (SAE) Reglement. Von allen durch den AMZ besuchten Wettbewerben werden zusätzliche Verschärfungen zum Formula SAE Reglement vorgeschrieben. Die Organisatoren vom Formula Student Germany (FSG) geben ein komplett eigenständiges Regelwerk für die Saison 2020/2021 heraus. Dieses Reglement ist zu grossen Teilen an das Formula SAE Reglement angelehnt und wird auch von anderen Organisatoren übernommen.

In diesem Dokument wird jeweils Bezug auf das FSG Reglement Saison 2020 genommen. Aufgrund des Ausfalls der Wettbewerbe in der Saison 2020 wurden die Reglemente unverändert für 2021 übernommen.

Disziplinen

Die Organisatoren bewerten nicht nur die Fahrleistung der Fahrzeuge, sondern auch das Vorgehen bei der Fahrzeugentwicklung. Es wird zwischen statischen und dynamischen Disziplinen unterschieden. Die Punkteverteilung der einzelnen Disziplinen ist in Abbildung II.I ersichtlich. (Formula Student Germany, 2020)

Engineering Design Das Engineering Design ist hinsichtlich Punktevergabe die wichtigste statische Disziplin. Die Bewertung der Entwicklung des Fahrzeugs wird von Experten aus der Industrie durchgeführt. Die Experten legen grossen Wert auf die Entscheidungsfindung und die Umsetzung der Konzepte. Mit dem „Design Report“ werden die Konzepte des Fahrzeugs und deren Umsetzung erläutert. Dieser wird vorgängig an die Eventorganisatoren eingereicht.

*Dieses Kapitel entstand in Zusammenarbeit mit allen Elektrotechnikstudenten aus der Vorlage von (Elektrotechnik Studenten, 2018)

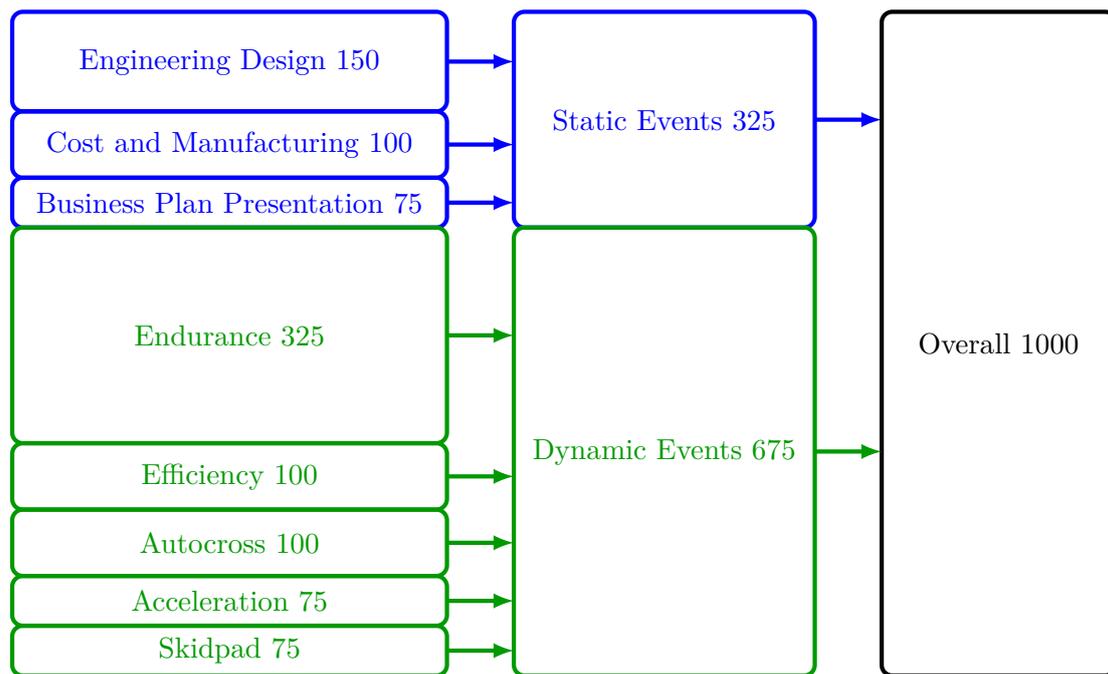


Abbildung II.I: Punkteverteilung Formula Student nach FSG Regelwerk (Formula Student Germany, 2020); in Anlehnung an (Elektrotechnik Studenten, 2016)

Cost and Manufacturing Am „Cost and Manufacturing“ Event wird das Verständnis über die verschiedenen Herstellungsprozesse und den damit verbundenen Kosten evaluiert. Dies wird mit einer fiktiven Kleinserie des Fahrzeugs realisiert. Für jedes Bauteil muss das Herstellungsverfahren definiert und die daraus resultierenden Kosten bestimmt werden. Bewertet wird die Korrektheit und Vollständigkeit dieses „Cost Report Document“, welches ebenfalls vorgängig eingereicht werden muss.

Business Plan Presentation Für diese Disziplin wird ein Geschäftsmodell um das Fahrzeug entwickelt. Dieses Geschäftsmodell wird am Event präsentiert. Es muss vorgängig ein „Executive Summary“ eingereicht werden.

Scrutineering Damit das Fahrzeug an einem Event fahren darf, muss es eine technische Abnahme bestehen. Diese Abnahme wird „Scrutineering“ genannt. In erster Linie wird überprüft, ob das Fahrzeug dem Reglement entspricht und es entsprechend betriebssicher ist. Es werden beim „Scrutineering“ keine Punkte für den Event vergeben, ein bestandenes „Scrutineering“ ist jedoch Voraussetzung für die Teilnahme an einer dynamischen Disziplin.

Acceleration Beim Acceleration Event wird die Beschleunigung des Fahrzeugs gemessen. Dazu beschleunigt das Fahrzeug aus dem Stillstand auf einer geraden Strecke. Die Acceleration Strecke hat eine Länge von 75 m. Zwei Fahrer erhalten jeweils zwei Versuche. Aus den vier Versuchen wird der Schnellste gewertet.

Skidpad Das Fahrzeug wird im Skidpad auf die Kurvenfahrt getestet. Die Skidpad-Strecke entspricht der Form einer liegenden Acht und ist in Abbildung II.II ersichtlich. Der Lauf wird ausserhalb des

Kreises gestartet. Nach dem Überfahren der Start-Ziellinie wird eine Rechtskurve gefahren. Mit dem ersten Kreis wird die Kreisfahrt stabilisiert. Der zweite Kreis in die gleiche Richtung wird gemessen. Danach folgen zwei Kreise nach links und dabei wird ebenfalls der Zweite gemessen. Die Zeit für den Skypad Event ergibt sich aus dem Mittelwert der beiden Zeiten. Die zwei Fahrer haben jeweils zwei Versuche.

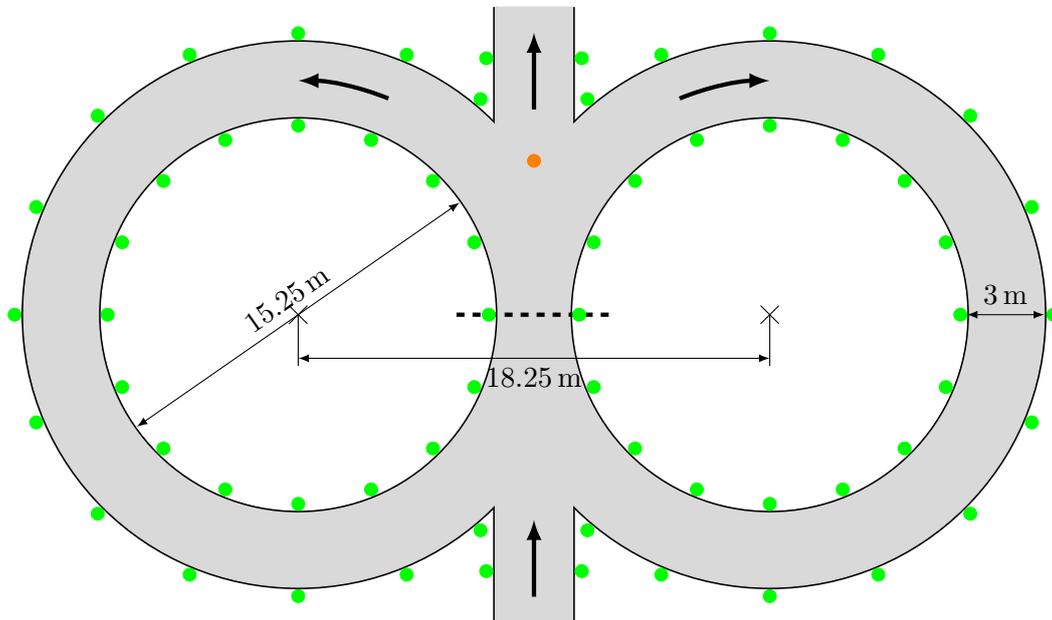


Abbildung II.II: Skypad Strecke; in Anlehnung an (Elektrotechnik Studenten, 2016)

Autocross Beim Autocross wird eine vorgegebene Strecke abgefahren. Diese Strecke beinhaltet mehrheitlich enge Kurven, Schikanen und Slaloms. Hier dürfen erneut zwei Fahrer antreten, welche jeweils zwei Versuche erhalten. Die Schnellste der vier gefahrenen Zeiten wird gezählt.

Endurance Im Endurance wird die Zuverlässigkeit des Fahrzeugs geprüft. Dabei wird auf einem Rennstrecken-Rundkurs über mehrere Runden eine Distanz von 22 km gefahren. Nach der halben Distanz wird der Fahrer gewechselt. Aus der benötigten Zeit wird die Punktezahl ermittelt.

Efficiency Für die Disziplin Efficiency wird die elektrische Energieaufnahme des Fahrzeugs während dem Endurance Rennen gemessen. Aus der verbrauchten Energie und der mittleren Rundenzeit im Endurance werden die Punkte für die Efficiency Wertung berechnet.

Organisation *

Akademischer Motorsportverein Zürich

Der Akademische Motorsportverein Zürich (AMZ) besteht aus Studenten der Eidgenössischen Technischen Hochschule (ETH) Zürich und der Hochschule Luzern (HSLU). Im Verein wird das Ziel verfolgt, jedes Jahr ein neues elektrisches Rennfahrzeug für die Formula Student zu planen und zu bauen. In der Realisierung wird der AMZ von vielen Firmen im In- und Ausland finanziell, materiell und mit Know-how unterstützt. Aufgrund der Corona-Pandemie fanden im Sommer 2020 keine Events statt. Darum wird dieses Jahr das bestehende Fahrzeug weiterentwickelt mit einem grossen Fokus auf Gewichtsreduktion. Die Mitglieder des AMZ setzen sich aus aktiven- und passiven Mitgliedern (Veteranen) zusammen. Während der Planungs- und der Bauphase werden die Aktiven, welche für den Bau des aktuellen Fahrzeugs zuständig sind, von den Passiven unterstützt.

Teamstruktur *alvier* 2021

Die Arbeitspakete wurden an die aktiven Mitglieder verteilt. Die Elektrotechnikstudenten der HSLU bilden das Modul Electronics. Die restlichen Bereiche werden von Studenten der ETH bearbeitet. Geleitet wird das Projekt durch CEO Yann Bernard und CTO Eloi Roset. Die Teamstruktur wird in der Abbildung II.III grafisch dargestellt.

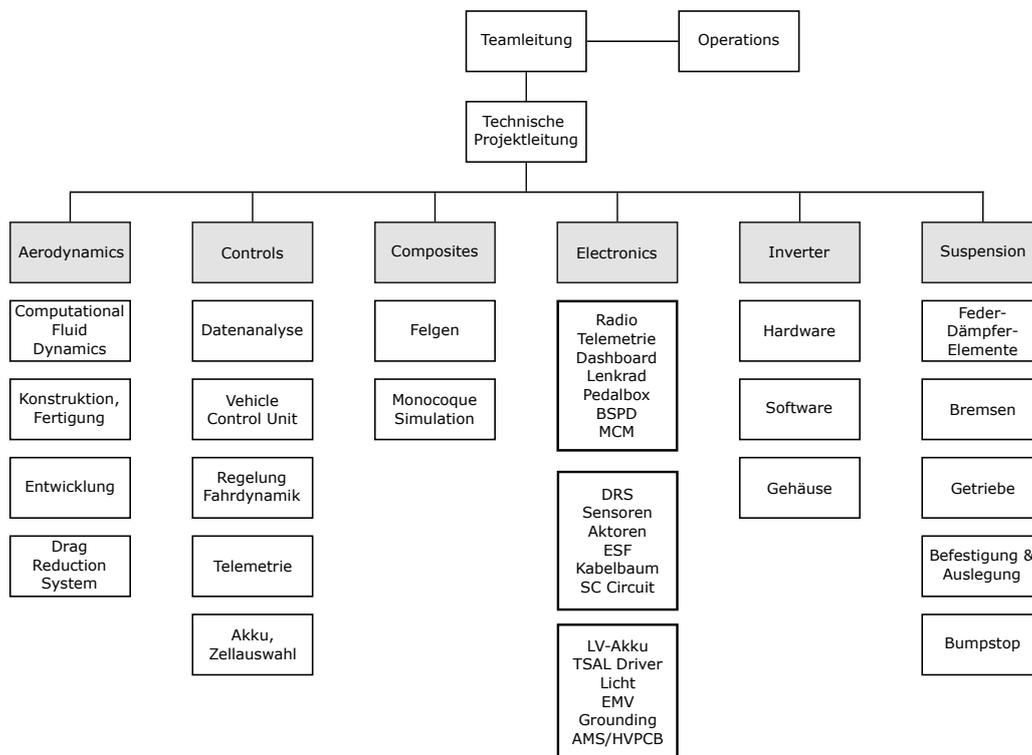


Abbildung II.III: Organigramm Module „alvier“; in Anlehnung an (Emmenegger, 2015).

*Dieses Kapitel entstand in Zusammenarbeit mit allen Elektrotechnikstudenten aus der Vorlage von (Elektrotechnik Studenten, 2018)

Modul *Electronics*

Die drei Elektrotechnikstudenten der HSLU bilden das Modul Electronics. Zusätzliche Unterstützung wird von den Veteranen Jason Freimann, Florian Jost und Severin Julen aus dem *alvier* Jahr und weiteren Veteranen aus den vorhergehenden Jahren geboten.

Organigramm

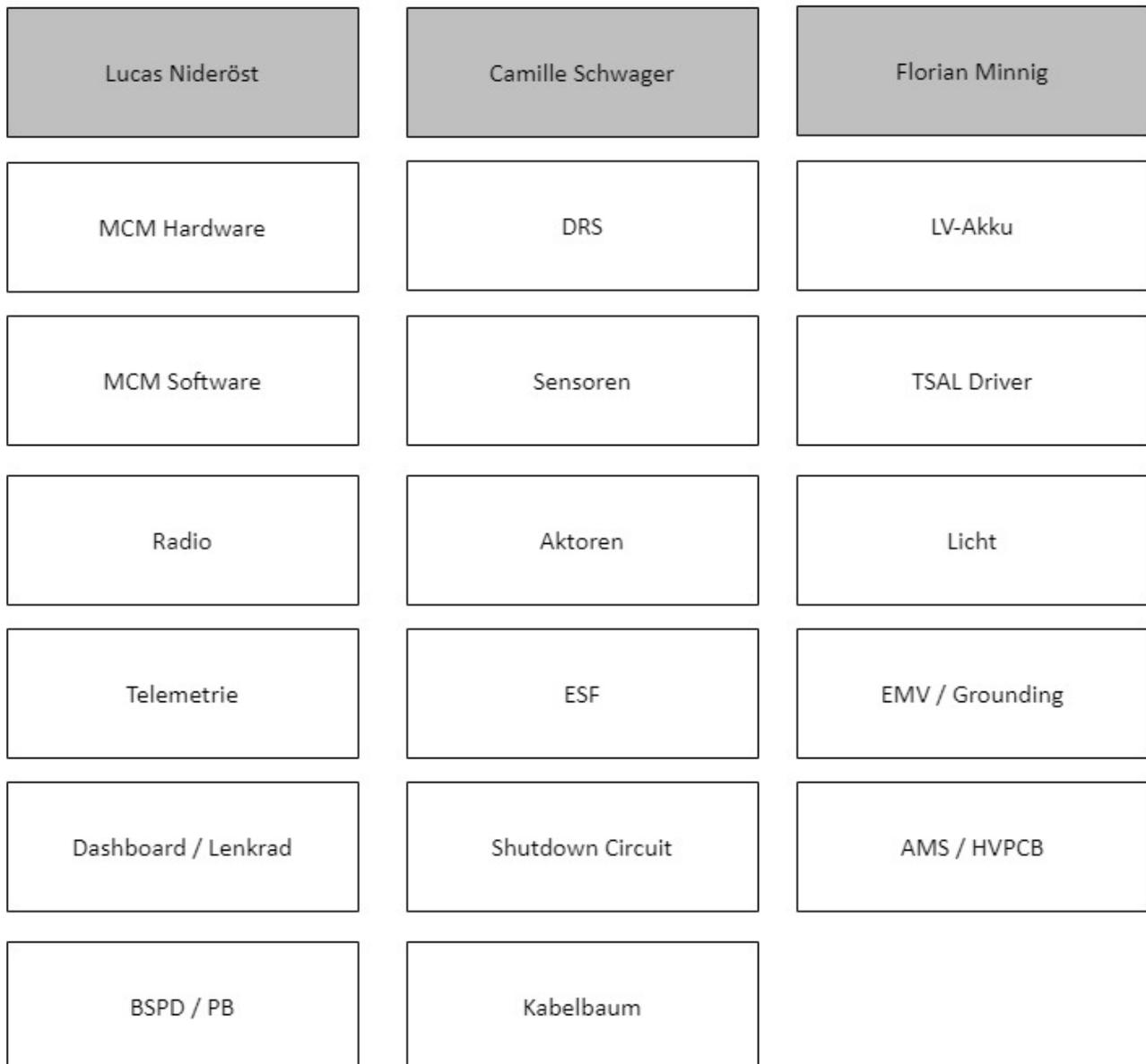


Abbildung II.IV: Organigramm Modul Electronics

Zeitplan *

Mit dem im letzten Jahr gebauten Rennwagen *alvier* konnte bereits im April mit den ersten Testtagen gestartet werden. Das Fahrzeug konnte gemäss dem Zeitplan in Tabelle II.1 für das Rollout optimiert werden. Weiter ging es mit der Realisierung der letzten Arbeitspakete und Eventvorbereitungen, um im Sommer kompetitiv an den verschiedenen Events teilzunehmen.

Meilenstein	Datum
Registrationsquiz	05.02.2021
Teamsitzung Electronics	27.03.2021
Zwischenpräsentation	15.04.2021
Rollout	27.05.2021
Prüfungsphase	21.06. - 10.07.2021
FS Netherlands	04.07. - 08.07.2021
FS Switzerland	10.07. - 18.07.2021
FS Austria	25.07. - 29.07.2021
FS East	03.08. - 08.08.2021

Tabelle II.1: Zeitplan AMZ Saison 2021

*Dieses Kapitel entstand in Zusammenarbeit mit allen Elektrotechnikstudenten aus der Vorlage von (Elektrotechnik Studenten, 2018)

Aufgabenstellung *

Durch die Elektrotechnik-Studierenden wird im Verein AMZ, Akademischer Motorsportverein Zürich, der elektrische Teil des jährlich neu gebauten Rennwagens für die Formula Student Rennen erstellt. In der vorliegenden Industriearbeit wurde die Planungsphase abgehandelt. Die Umsetzung des Autos folgt in der Bachelor-Diplomarbeit. Die Aufgabenstellung durch die Hochschule Luzern wurde wie folgt beschrieben:

“Als Elektrotechnik-Studenten sind Sie für den wesentlichen Teil der elektrotechnischen Belange des Fahrzeuges zuständig. Unterstützt werden Sie von ehemaligen Studenten, die bereits Erfahrung im Bau von Formula Student Rennwagen haben. Die ehemaligen und aktuellen am Projekt beteiligten Studierenden sind im Verein AMZ (Akademischer Motorsportverein Zürich) organisiert. Die einzelnen Arbeitspakete und Arbeitsschritte haben Sie im Rahmen Ihrer Semesterarbeit in Zusammenarbeit mit Ihren Teamkollegen selber definiert. Es sind folgende: DRS, Sensoren-Aktoren, FDE, ESF, MCM, Dashboard, Lenkrad, Radio, Telemetrie, LV Akku & Supply, TSAL/Lichter, HiL, EMV & Grounding, AMS, HV PCB, Kabelbaum, Shutdown Circuit, PB, BSP & Charger.

In der Diplomarbeit geht es im Wesentlichen um die Umsetzung und Weiterführung der in den Industrieprojekten ausgearbeiteten Konzepte. Ob noch weitere Arbeiten hinzukommen, bestimmen Sie gemeinsam mit Ihren Teamkollegen. Letztendlich liegt es auch in Ihrer Hand, wie komplex das Fahrzeug werden soll. Die Vorgaben im Rennreglement müssen selbstverständlich eingehalten werden.

Zur Unterstützung arbeitet ein weiterer Studierender mit einer PAIND am Projekt mit. Sie koordinieren mit ihm zusammen die Verteilung und Ausführung der Arbeitspakete.

Wir erwarten von Ihnen in Semesterwoche 2 eine detaillierte Auflistung der Arbeitspakete und der Arbeitsschritte sowie eine Projektplanung für Ihre Teilprojekte (z.B. anhand PKP).

In diesem Projekt werden alle Prozesse der Produktentwicklung unter besonderen Rahmenbedingungen durchlaufen. Nebst dem Rennen können mit einer gelungenen Präsentation der Entwicklung und des Fahrzeugs zusätzlich Punkte geholt werden.

Im Vordergrund stehen die Zusammenarbeit und der Erfolg als Team. Die Bewertung der Diplomarbeiten erfolgt aber individuell.“ (Erich Styger, Rolf Mettler, 2021)

*Dieses Kapitel entstand in Zusammenarbeit mit allen Elektrotechnikstudenten

1 | Arbeitspakete

In dieser Arbeit werden folgende Arbeitspakete behandelt:

- ESF
- Statics
- Kabelbaum
- Sensoren
- Aktoren
- FDE-PCB

In diesem Semester musste der Electrical System Form (ESF) für alle sicherheitsrelevanten Systeme am Fahrzeug abgegeben werden. Durch die Teilnahme an Formula Student East haben sich die notwendigen Dokumente scheinbar geändert gegenüber den Vorjahren.

In den Statics Disziplinen kam dieses Semester das Arbeitspaket Cost & Manufacturing neu dazu. Im Februar wurden die Aufgaben in den Statics Disziplinen verteilt.

Von Rinaldo Leone wurde das Arbeitspaket Kabelbaum übernommen für das neue Semester (Leone, 2020). Für die neuen Aktorenkonzepte musste die Verkabelung des Fahrzeugs angepasst werden.

Im Arbeitspaket Sensoren musste lediglich ein zusätzlicher Distanzsensor eingebaut werden um die Hinterradlenkung zu ermöglichen.

Auf Seite der Aktoren werden einige zusätzliche Konzepte verfolgt. So sollen dieses Jahr MRF-Dämpfer, Active Ride Height (ARH), Rear Wheel Steering (RWS) und möglicherweise ein neu entwickeltes Dämpferkonzept auf Basis elektrischer Rekuperation ins Auto kommen.

Für das Feder-Dämpferelement (FDE)-PCB wurde das Layout neu entworfen. Es wird ein Konzept verfolgt, bei dem EMV-Überlegungen von Anfang an stark einfließen und auch die Leitungsführung optimiert ist.

Organisatorisch zugeteilte Arbeitspakete die aufgrund mangelnder Arbeit nicht behandelt werden sind Drag Reduction System (DRS) und Shutdown Circuit. Der Heckflügel wurde nicht verändert und damit ist auch das DRS gleichgeblieben. Im Shutdown Circuit hat Rinaldo Leone noch kleinere Änderungen vorgeschlagen in seiner Industriearbeit (Leone, 2020). Das Paket wurde dann an Adrian Dummermuth weitergegeben und nach dessen Einstieg übernommen. Die Zeit hat jedoch gefehlt um die vorgeschlagenen Änderungen von Rinaldo Leone noch umzusetzen.

2 | ESF

2.1 Einleitung

Für die Teilnahme an Formula Student Events ist die Einhaltung aller Sicherheitsvorgaben Pflicht. Am Event selber wird im Zuge des Scrutineering die Einhaltung dieser Vorgaben akribisch geprüft. Um der Zurückweisung vieler Teams am Event vorzubeugen, müssen die kritischen Bauteile, Schaltungen und Baugruppen bereits im Vorfeld zur Prüfung eingereicht werden. Die FSG-Website stellt dazu Online-Formulare zur Verfügung. Die meisten anderen europäischen Veranstalter arbeiten in diesem Bereich mit den FSG-Organisatoren zusammen, sodass der ESF nur einmal eingereicht werden muss.

2.2 Aufbau

Das ESF ist in verschiedene Kategorien aufgeteilt.

- TS Accumulator (el.) - Elektrischer Aufbau des Akku und des Accumulator Management System (AMS)
- TS Accumulator (mech.) - Mechanischer Aufbau des Akkus
- TS Accumulator (charging) - Beschreibung des Ladevorgangs des Akkus
- TS Accumulator Indicator - Vorschriften für die Kontrollleute (60V) des Akkus
- TS Overcurrent Protection - Tractive System (TS)-Komponenten und ihre Strombelastbarkeit
- Shutdown Circuit - Aufbau des Shutdown Circuits
- Brake System Plausibility Device (BSPD) - Umsetzung des Brake System Plausibility Device (BSPD)
- Discharge Circuitry - Schema und Erklärung zum Discharge Circuitry
- Tractive System Active Light (TSAL) - Schema und Save State Erklärung
- TS and LVS Measurement points - Vorgaben für die Messpunkte am Fahrzeug

2.3 Korrekturen

Einige Abschnitte wurden im Zuge der Prüfung zurückgewiesen und mussten nachgebessert werden.



Abbildung 2.1: Einziger Hinweis, dass der ESF dieses Jahr nicht notwendig ist

TS Accumulator (mech.) Die Judges wollten zusätzliche Informationen zum System. Es mussten alle fehlenden Datenblätter zu den Harzen eingereicht werden. Ebenfalls musste gezeigt werden, dass die Auslegung der Sicherung der Akkuzellen in Z-Richtung korrekt sind.

TS Accumulator (charging) Das Blockschaltbild des Ladegeräts, das schon seit mehreren Saisons verwendet wird, wurde sowohl beim *driverless* wie auch beim *electric* Team beanstandet. Das Blockschaltbild wurde ergänzt und neu hochgeladen.

Tractive System Active Light (TSAL) Bei der TSAL-Schaltung ist einem Judge aufgefallen, dass die Überprüfung der Leitungen zu den Messpunkten vor den Accumulator Isolation Relais (AIR) nicht implementiert sind. Die Schaltung musste aufgrund dessen angepasst werden. Es konnten die Schaltungsteile der Überprüfung anderer Messpunkte kopiert werden. Ebenfalls musste eine redundante Diode eingefügt werden, da nicht akzeptiert wurde, dass der normale Fehlerzustand einer Diode ein Kurzschluss ist und die Schaltung sich entsprechend in einem sicheren Zustand befunden hätte. Das HV-PCB muss aus diesem Grund neu gefertigt werden bis zum Rennen in den Niederlanden.

2.4 FS East

Die Organisatoren aus Ungarn sind bis anhin einen eigenen Weg gefahren und haben nicht an dieser Kollaboration der anderen Organisatoren teilgenommen. Entsprechend war es verpflichtend, einen eigenen ESF für diesen Event einzureichen. Zuletzt an East teilgenommen hat der AMZ mit dem Fahrzeug Pilatus. Die Vorlage für den FS East ist als Word-Dokument gestaltet und es wird eine rund 75-seitige [sic] Dokumentation der sicherheitsrelevanten Systeme am Fahrzeug erwartet. Die Dokumentation wurde deshalb mit viel Arbeits- und Koordinationsaufwand nahezu fertiggestellt.

Erst zwei Tage vor der Abgabe-Deadline sendeten die Organisatoren ein Mail an die teilnehmenden Teams, dass Sie neu mit der FSG-Organisation zusammenarbeiten und deshalb Zugriff auf deren Version haben. Die Competition-Handbooks und Rules wurden sofort erneut konsultiert, aber es war keine derartige Information zu finden. Auf persönliche Nachfrage wurde mir mitgeteilt, dass die Dokumente vor dem Entscheid herausgegeben wurden und deshalb eine Erwähnung fehlt. Auf der Website konnte

ESF Forms

Event:

Below you see a list of the required ESF forms.

ESF Form	Status			
TS Accumulator (el.)	SUBMITTED	view		pdf
TS Accumulator (mech.)	SUBMITTED	view		pdf
TS Accumulator (charging)	SUBMITTED	view		pdf
TS Accumulator indicator	SUBMITTED	view		pdf
TS overcurrent protection	SUBMITTED	view		pdf
Shutdown Circuit	SUBMITTED	view		pdf
Brake System Plausibility Device (BSPD)	SUBMITTED	view		pdf
Discharge Circuitry	PASSED	view		pdf
Tractive System Active Light (TSAL)	SUBMITTED	view		pdf
TS and LVS Measurement points	PASSED	view		pdf
Download all forms as pdf				

Abbildung 2.2: Aktueller Stand der Auswertung auf der FSG-Website

nur eine kleine Randnotiz aus Abbildung 2.1 ausgemacht werden, die man im Nachhinein so auslegen könnte. Eindeutig war der Hinweis nach aller Meinung nicht. Unklar ist auch, ob sich dieser Hinweis zum Zeitpunkt des Downloads bereits auf der Website finden liess. Entsprechend kann hier ein Versagen der internen Zuständigkeiten ausgeschlossen werden. Lediglich der Abschnitt zum Datenlogger wurde schlussendlich eingereicht. Ein wenig ersparter Aufwand kann zumindest in der Formatierung verbucht werden.

2.5 Ausblick

Die notwendigen Dokumente wurden alle termingerecht erstellt. Auch Korrekturen wurden rechtzeitig vorgenommen und neu eingereicht. Die Kategorien *Discharge Circuitry* und *TS & LVS Measuring Points* wurden bereits akzeptiert (Siehe Abbildung 2.2). Die weiteren Kategorien sind noch ausstehend. Es kann auch vorkommen, dass nicht alle Kategorien vor dem Event geprüft werden und noch ausstehend sind.

3 | Cost & Manufacturing

3.1 Einleitung

LV Connector		<i>Lemo</i>	Buy	1 x 50,00€ = 50,00€	248-EL-00107
Material	Bought Part	<i>n/a</i>		1 x 50,00€ = 50,00€	
Busbar			Make	39 x 9,00€ = 351,00€	248-EL-00136
Material	Aluminum			1 x 0,18€ = 0,18€	
Process	Waterjet Cut			1 x 4,41€ = 4,41€	
Process	Anodize			1 x 4,41€ = 4,41€	
Contact Plate		<i>at Fuse, Shunt, CS</i>	Make	16 x 17,99€ = 287,84€	248-EL-00118
Material	Aluminum			1 x 0,35€ = 0,35€	
Process	Waterjet Cut			1 x 17,64€ = 17,64€	

Abbildung 3.1: Ausschnitt aus dem CBOM mit eingepreisten Teilen und Prozessen

Neben der Kontruktion und des Baus eines Prototypenrennwagens für die dynamischen Rennen gibt es in der Formula Student auch einige statische Disziplinen. In Abschnitt II werden diese beschrieben. In der Disziplin Cost & Manufacturing wird eine komplette Stückliste des Fahrzeugs gefordert. In der ersten Runde werden dazu am Fahrzeug Teile gewählt die in der Stückliste gezeigt werden müssen und vice versa.

Jeweils ein oder zwei Subsysteme müssen mit den Herstellungsschritten und Kosten für die Herstellung ausgearbeitet werden. Dafür werden die Komponenten dieser Systeme im BOM mit den Herstellungsschritten und -Kosten ergänzt. Diese Saison ist das Subsystem Electrical mit den detaillierten Kosten darzustellen. Ein Ausschnitt ist ist Abbildung 3.2 ersichtlich.

3.2 Cost Understanding Report

Es muss ein Dokument von maximal fünf Seiten verfasst werden, in dem gezeigt wird, dass man die Kosten für den Bau eines Prototypen sowie die Unterschiede zur Serienfertigung verstanden hat. Aufgrund dieses Dokuments wird unter anderem entschieden, ob man in das Cost Finale einziehen kann. Nur diejenigen Teams die ins Finale kommen dürfen in den Niederlanden Statics Leute vor Ort bringen. Ansonsten ist das Dynamicsteam auf acht Leute beschränkt, wovon nur vier am Fahrzeug arbeiten dürfen. Im Handbook werden die zu behandelnden Themen vorgegeben.

- Differences between prototype and mass production
- Resource and cost planning
- Financial and production risk management
- Make or buy decisions
- Environmental influence of the vehicle production
- Effectiveness of financial planning

- Methods for software development cost calculation

3.3 Cost Explanation File

PCB FDE		Count	2
Soldering Paste on PCB		PCB FDE	
Worker	Unskilled		
Time	0.5 h		
Cost per hour	39.09 CHF/h	35.29	Euro/h
Cost assembly process	19.54 CHF	17.64	Euro
Electronic Components on PCB		PCB FDE	
Worker	Unskilled		
Time	2 h		
Cost per hour	39.09 CHF/h	35.29	Euro/h
Cost assembly process	78.17 CHF	70.57	Euro
Liquefy Solder Paste		PCB FDE	
Worker	Unskilled		
Time	0.5 h		
Cost per hour	39.09 CHF/h	35.29	Euro/h
Cost assembly process	19.54 CHF	17.64	Euro
Soldering check with microscope		PCB FDE	
Worker	Unskilled		
Time	1 h		
Cost per hour	39.09 CHF/h	35.29	Euro/h
Cost assembly process	39.09 CHF	35.29	Euro

Abbildung 3.2: Beispiel einer Kostenabschätzung anhand des FDE-PCB

Mithilfe des Cost Explanation Files sollen die angegebenen Kosten von selbstproduzierten Teilen und Arbeitsschritten detailliert aufgezeigt werden. Dies umfasst vor allem die Erstellung des Kabelbaums sowie die Bestückung der PCBs. Dafür wurden die Arbeitsschritte einzeln aufgegliedert und mithilfe des Zeit- und Materialbedarfs bewertet. In Abbildung 3.2 wird die Kostenabschätzung für die Bestückung des FDE-PCB aufgezeigt. Weitere Kategorien sind die Abschätzung der Kosten für die Bestückungsmaschine und den Reflow-Lötöfen. Die Stundenlöhne der verschiedenen Arbeiterqualifikationen wurden anhand der Statistiken des Staatssekretariat für Wirtschaft (SECO) bestimmt. Basierend auf den Daten wird ein Lohnrechner angeboten.

3.4 Fazit

Um effektive Punktemaximierung am Event zu betreiben ist es unverzichtbar, dass man alle Disziplinen ernst nimmt. Das Kostenbewusstsein ist ein wichtiger Teil der Arbeit eines Ingenieurs, dem man sich als Student oft nicht voll bewusst ist. Insbesondere in einem Projekt wie dem AMZ wird die Leistung im Preis-Leistungsverhältnis viel höher gewichtet. So kann man auf jeden Fall sagen, dass die Arbeit in diesem Arbeitspaket ebenfalls ein guter Schritt ist, um einen guten Ingenieur auszubilden. Trotzdem war teilweise das Gefühl da, dass es zuviel Zeit in Anspruch nimmt und die Arbeit am Auto zu fest zurückgefahren werden musste.

4 | Kabelbaum

4.1 Einleitung

Im Herbstsemester wurde der Kabelbaum von Rinaldo Leone betreut. Durch das Ausscheiden aus dem Projekt wurde die Zuständigkeit neu übernommen und deshalb in dieser Arbeit behandelt. Die Entscheidung wurde dadurch beeinflusst, dass die meiste Arbeit in diesem Arbeitspaket im Zusammenhang mit neuen Aktoren anfiel. Aus diesem Grund war es eine naheliegende Entscheidung dieses Arbeitspaket damit zu kombinieren.

4.2 MRF-Dämpfer

4.3 Kühlung

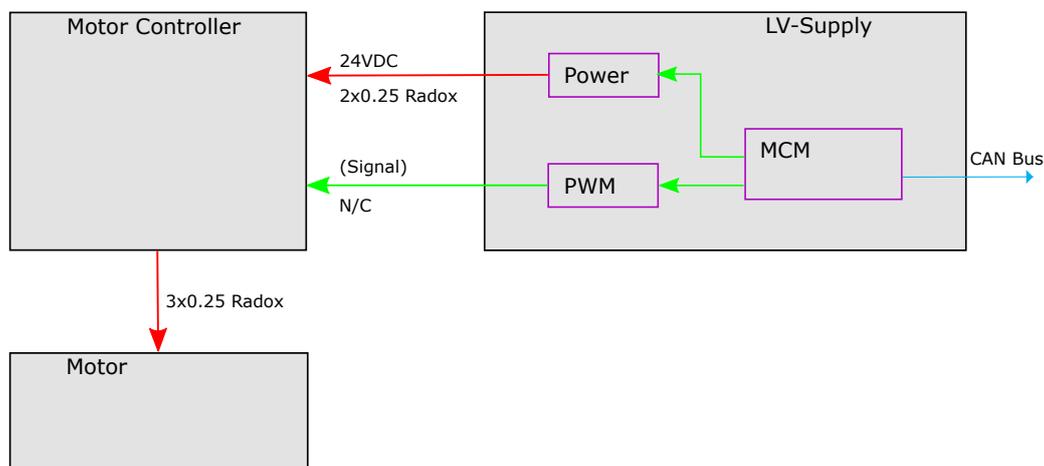


Abbildung 4.1: Blockschaltbild von der Verkabelung der Lüfter mit dem bestehenden LV-Supply

Die bisherigen Kühlungslüfter hatten eine integrierte Steuerungsplatine. Damit konnten sie mit DC-Spannung und einem Pulsweitenmodulation (PWM)-Signal angesteuert werden. Die neu eingesetzte Lösung besteht aus einem Motor und einem Controller wie in Unterabschnitt 6.3.2 beschrieben. Um an der exponierten Position der Lüfter möglichst wenig Elektronik zu haben, wurde entschieden den Controller in die Box des LV-Supply zu platzieren. Die drei bestehenden Litzen für die Spannungsversorgung sowie das PWM-Signal wurden umgenutzt für die drei Phasen des Motors. Weil der Motor mit Gegen-Elektromotorische Kraft (EMK) geregelt wird, sind keine zusätzlichen Signalpfade nötig. Zusätzlich wurde je ein Versorgungskabel vom LV-Supply zum Controller gezogen. Zum Zeitpunkt als diese Arbeit verfasst wurde, war immer noch das alte Low Voltage (LV)-Supply im Fahrzeug verbaut. Auf diesem waren, die Anschlüsse für das PWM-Signal bereits anderweitig belegt, weshalb diese noch weggelassen wurden. Ebenfalls fanden die Controller in der alten Box keinen Platz. Dies ist ebenfalls in Abbildung 4.1 ersichtlich. Sobald das neue LV-Supply in Betrieb genommen wird, wie in der Arbeit

von Florian Minnig beschrieben, wird das System auf die volle Funktionalität umgebaut. Zwischenzeitlich wird das System deshalb nur digital ein- und ausgeschaltet, wie es auch bei der vorherigen Lösung der Fall war.

4.4 ARH

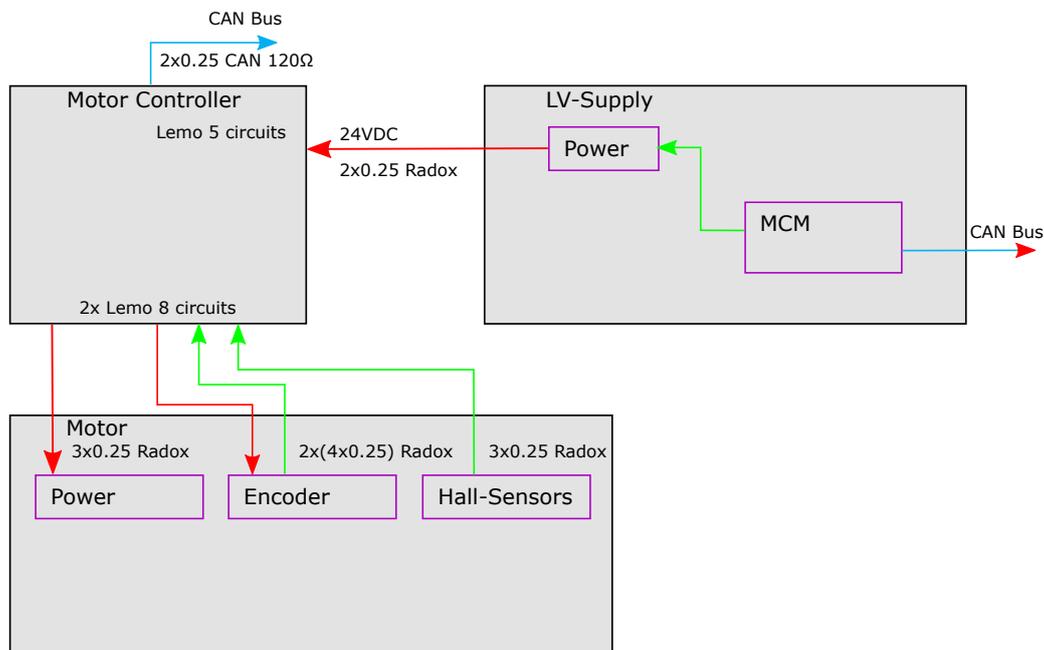


Abbildung 4.2: Blockschaltbild von der Verkabelung des Active Ride Height Systems

Die Controller des ARH-Systems können direkt an den Controller Area Network (CAN)-Bus angeschlossen werden. Deshalb wird nur ein CAN-Kabel sowie eine Spannungsversorgung von der Fahrzeugseite her benötigt. Die Signale werden auf einen fünfpoligen Stecker in der Karbonbox des Controllers geführt.

Die Motorkonfiguration benötigt insgesamt 16 Leitungen vom Controller zum Motor. Dafür wurden in die Box zwei achtpolige Stecker eingebaut und auf eine einzelne 19-polige Buchse im Chassis geführt. Diese Buchse wurde eingeführt um einen wasserdichten Übergang im Chassis zu haben sowie die Möglichkeit zu bieten, den Motor bei Bedarf einfach auszubauen. Es wurde darauf geachtet, dass die Pinbelegung kompatibel ist mit den Motoren des RWS aus Abschnitt 4.5.

4.5 RWS

Für das RWS wird dieselbe Motorkonfiguration benötigt wie für das ARH aus Abschnitt 4.4. Zusätzlich ist es jedoch nötig die absolute Position zu messen, um einen Drift zu verhindern. Ansonsten ist es möglich, dass das System mechanisch beschädigt wird, sollte in die Endanschläge gefahren werden. Insgesamt ergeben sich daraus 19 benötigte Leitungen zu den Motoren. Aus diesem Grund werden sowohl in den Karbonboxen wie auch im Chassis jeweils 19-polige Buchsen verwendet. Im Chassis werden die drei unbenutzten Pins des ARH zusätzlich mit den Litzen des Positionssensors konfektioniert.

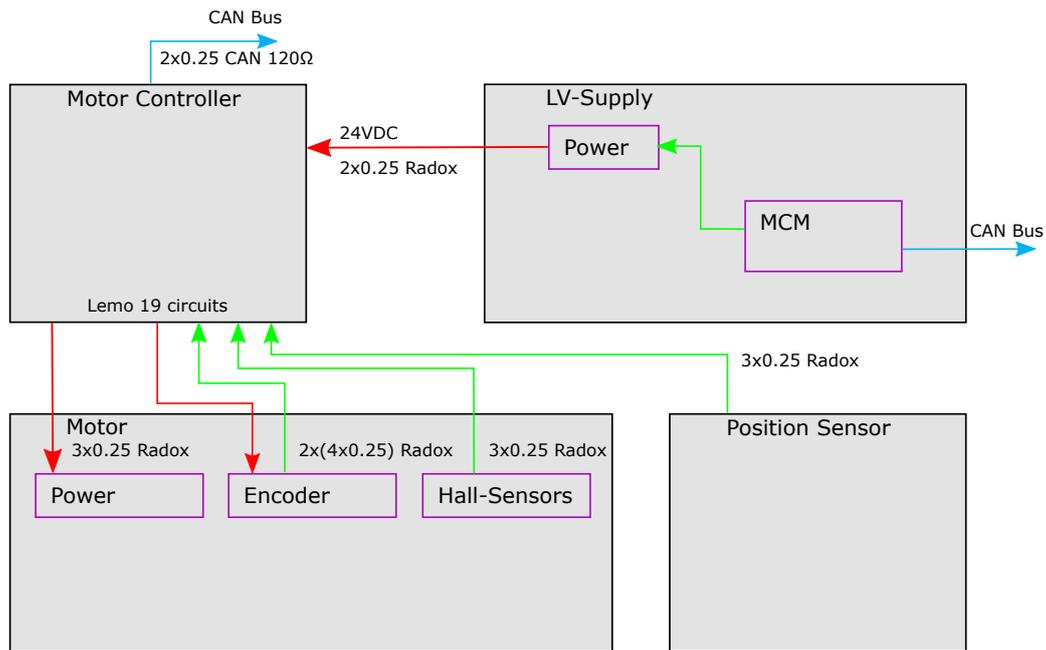


Abbildung 4.3: Blockschaltbild von der Verkabelung des Rear Wheel Steering Systems

4.6 Schwierigkeiten

Die Komponenten für ARH und RWS sind nicht neu. Bereits im Vorjahr wurde überlegt, ob man das System ans Fahrzeug bringen könnte. Als dann die Verkabelung und anschliessend die Inbetriebnahme gemacht wurde, hatte man einige Schwierigkeiten mit dem Verhalten und Fehlern im System. Die Fehlersuche gestaltete sich schwierig aufgrund der Zuständigkeiten mit den Modulen Fahrwerk und Regelung. In einer koordinierten Aktion wurde dann das gesamte System überprüft. Herausgestellt hat sich, dass neben der Encoderverkabelung auf einer Seite auch zwei Encoder am Motor selber defekt waren. Diese Kaskadierung liess die Fehler inkosistent wirken, wenn man verschiedene Motoren an verschiedene Positionen anschloss und so immer andere Kombinationen hatte.

5 | Sensoren

5.1 Übersicht

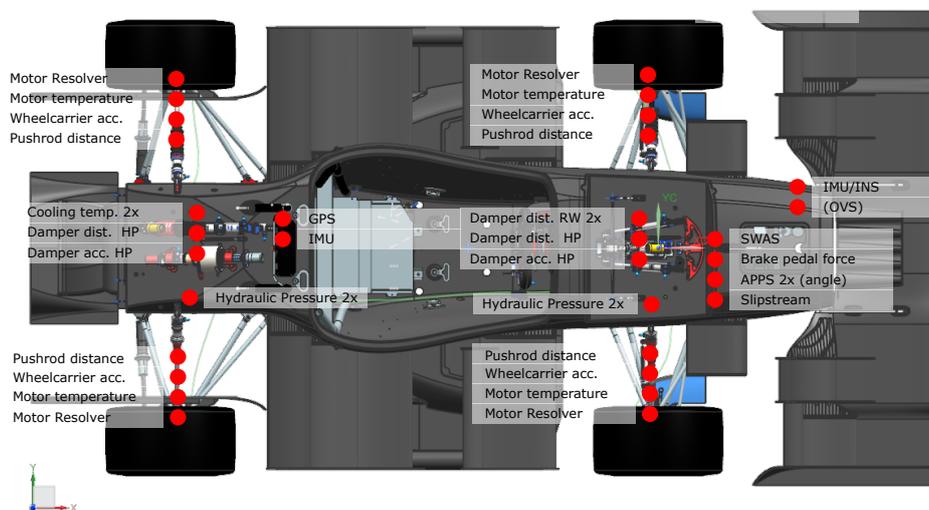


Abbildung 5.1: Sensorübersicht gemäss Planung für das Jahr 2021

In Abbildung 5.1 sind alle fest integrierten Sensoren in *alvier* aufgeführt. Die Sensoren sind entweder direkt via CAN mit der Vehicle Control Unit (VCU) verbunden oder sie sind an eine der zahlreichen Printplatten im Fahrzeug angeschlossen. Diese sind jeweils mit einem Mini-CAN-Modul (MCM) bestückt. Die Funktionsweise der MCM wird in der PAIND-Arbeit von Lucas Nideröst beschrieben. Auf diesen MCM werden die Sensorsignale eingelesen, ausgewertet und als Frames auf den CAN-Bus gesendet.

5.2 Einleitung

Nachdem im vergangenen Semester die Konzeptentscheidungen getroffen wurden wie in der Industriearbeit beschrieben, fand in diesem Semester die Umsetzung statt (Schwager, 2020). In den folgenden Abschnitten wird auf die neu eingesetzten Komponenten eingegangen.

5.3 Quadraturencoder

Die angedachten Quadraturencoder wurden nicht umgesetzt, weil dafür im Packaging des MRF-Dämpfers schlicht kein Platz war um es einzubauen. Aus diesem Grund werden die Dämpfer nun die Geschwindigkeit der Radträger aus der Ableitung der Hall Distanzsensoren erhalten. Erste Plots aus den Logdaten wurden erstellt, die Berechnung der genauen Signal to Noise Ratio (SNR) ist noch ausstehend. Sie dazu auch Unterabschnitt 6.3.1.

5.4 Dehnmessstreifen

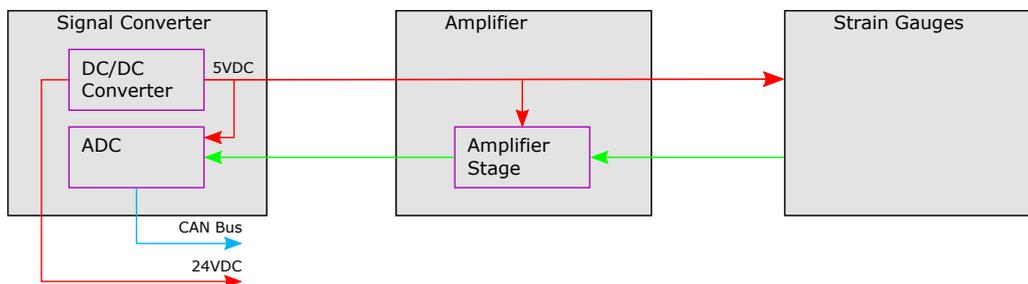


Abbildung 5.2: Blockschaltbild von der Verkabelung der Dehnmessstreifen

5.4.1 Bedarf

Um die Lasten an den Radträgern zu validieren sollen Dehnmessstreifen verwendet werden. Die mechanische Auslegung wurde von Tobias Jäggi gemacht und deshalb hier an dieser Stelle nicht behandelt. In Tabelle 5.1 sind die Ergebnisse seiner Arbeit aufgeführt.

Tabelle 5.1: Lastfälle und korrespondierende Messsignalauslenkungen

Platzierung	Zug [N]	Druck [N]	Signalamplitude Zug [mA]	Signalamplitude Druck [mA]
FLF	9166	7061	2.503	1.928
FLA	5653	8660	1.543	2.365
FUF	2621	3549	1.418	1.921
FUA	1060	3682	0.573	1.993
RLF	5259	5565	2.097	2.219
RLA	5336	4509	2.128	1.798
RUF	2445	2598	1.323	1.406
RUA	3290	2997	1.781	1.622
Tierod vorne	950	953	0.719	0.722
Tierod hinten	495	1000	0.375	0.757

Das Signal Converter Modul sowie die Dehnmessstreifen sind zugekaufte Komponenten, die direkt so von einer Spezialfirma vertrieben werden. Da an den Radträgern die mechanische Deformation mit kleiner Auslenkung erwartet wird, aufgrund der Lastfälle, wird auch das Messsignal klein ausfallen und den Messbereich des Analog Digital Converter (ADC) nicht ausnutzen können. Der ADC auf dem Signal Converter ist ein ratiometrischer Wandler mit einem Messbereich von 3 mV/V um $\frac{U_E}{2}$. Bei

einer Erregerspannung von 5 V in dieser Anwendung entsprechend 15 mV. In Tabelle 5.1 ist ersichtlich, dass bei den grössten Lastfällen nur 17 % des Messbereichs ausgenutzt werden. Im Extremfall werden sogar nur 2.5 % des Messbereichs genutzt. Gewünscht ist eine Auslenkung von 60 % bis 70 % damit die Auflösung verbessert, aber auch unerwartete Lastspitzen abgebildet werden können. Aus diesem Grund wurde entschieden, dass es vorteilhaft ist das Messsignal vor der Wandlung zu verstärken.

5.4.2 Berechnung Fehler

Tabelle 5.2: Kenndaten aus dem Datenblatt des Umsetzers von Zemic

Kenndaten	Wert
Erregungsspannung	5 V
Auflösung	24 Bit
Anzahl Stufen	16 777 216
Genauigkeit bei 50 Hz	0.008 %
Genauigkeit bei 200 Hz	0.014 %

Kenndaten Bei 50 Hz beträgt somit der Fehler $2^{24} \cdot 0.008\% = 1324$ Stufen, bei 600 Hz beträgt der Fehler $2^{24} \cdot 0.014\% = 2349$ Stufen. Diese Werte liegen zwischen 10 Bit = 1024 und 12 Bit = 4096. Wir gehen normalerweise auf dem CAN-Bus nicht über eine Aktualisierung von 200 Hz, entsprechend wird der Fehler mit 11 Bit = 2048 Stufen angenommen. Dies entspricht einer Reduzierung der SNR um 68 dB.

Aus der Berechnung von Tobias Jäggi geht hervor, dass die Spannungsänderung in der Wheatstone-Brücke bei einer Erregungsspannung der Brücke von 5 V maximal 2.5 mV beträgt. Bei einem Messbereich des ADC von 15 mV entspricht dies rund 1.12 Mio/mV. $1.12 \text{ Mio/mV} \cdot 2.5 \text{ mV} = 2.80 \text{ Mio} \approx 21 \text{ Bit}$. Da die 11 LSB wegfallen und nur Rauschen produzieren haben wir eine effektive Auflösung von 10 Bit oder 1024 unterschiedliche signifikante Werte. Beim tiefsten zu erwartenden Lastfall von 0.375 mV reduziert sich diese Auflösung entsprechend auf 154 Werte.

5.4.3 Verstärker

Ursprünglich wurde eine Schaltung mit Spannungsfolgern in Betracht gezogen, um die Wheatstone-Brücke nicht zu belasten und damit keinen Fehler einzuführen. In Gesprächen mit Alumni des Vereins sahen diese jedoch Gleichtaktstörungen und insbesondere Störungseinkopplung über die Versorgungsspannung als grösseres Problem. Aus diesem Grund wurde eine Schaltung mit einem direkt zwischengeschalteten voll-differenziellen Verstärker gewählt. Der Fehler durch die Belastung wurde wie folgt berechnet.

$$V_{OCM} = \frac{V_{Supply}}{2} \quad (5.1)$$

Die Belastung entsteht daraus, dass Strom über R_1 in den Verstärker fliesst durch die Spannungsdifferenz zwischen der unabgeglichenen Brücke und V_{OCM} . Dieser ist definiert durch Gleichung 5.2, da die Eingänge des Operationsverstärker (OP) immer V_{OCM} entsprechen.

$$\frac{\Delta V - V_{OCM}}{R_G} = I_B \quad (5.2)$$

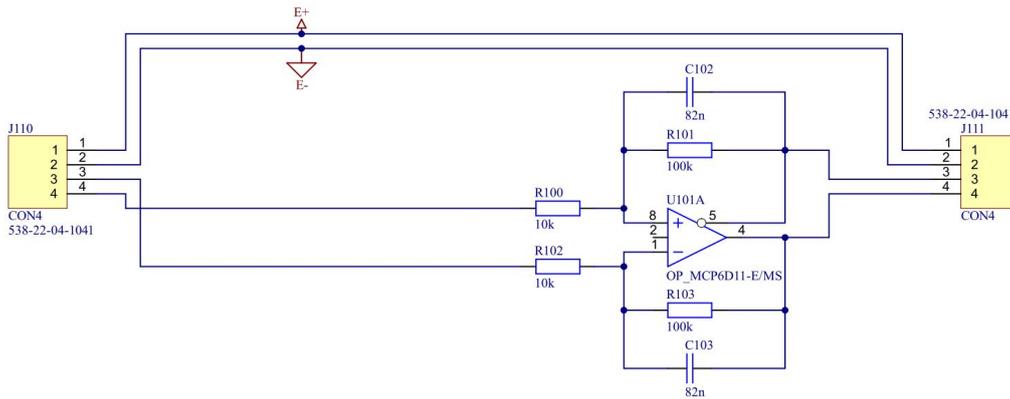


Abbildung 5.3: Ausschnitt aus der Verstärkerschaltung die an die Messbrücke gehängt wird

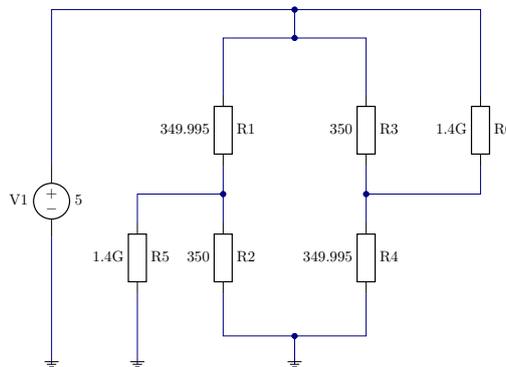


Abbildung 5.4: Ersatzschaltbild das durch die Belastung entsteht

Mittels einer Ersatzschaltung kann aus diesen Gegebenheiten der Fehler berechnet werden, der durch die Belastung entsteht.

Aus der mechanischen Berechnung von Tobias Jäggi wird ein ΔR von 0.05Ω erwartet. Im Falle einer unbelasteten Brücke ist der Referenzwiderstand genau 350Ω .

$$\Delta V_{UB} = \frac{5 \text{ V} \cdot 350 \Omega}{349.995 \Omega + 350 \Omega} - 2.5 \text{ V} = 17.8573 \mu\text{V} \tag{5.3}$$

$$I_B = \frac{\Delta V}{R_G} = \frac{17.8573 \mu\text{V}}{10 \text{ k}\Omega} = 1.7857 \text{ nA} \tag{5.4}$$

$$R_{parallel} = \frac{V_{OCM} + \Delta V_{UB}}{I_B} = 1.4 \text{ G}\Omega \tag{5.5}$$

Aus diesem Parallelwiderstand kann ein Ersatzwiderstand für den Referenzwiderstand berechnet werden wie in Gleichung 5.6

$$R_{Ersatz} = \frac{1}{\frac{1}{350 \Omega} + \frac{1}{1.4 \text{ G}\Omega}} = 349.999 \text{ 912 } \Omega \tag{5.6}$$

Wenn man diesen Ersatzwiderstand in die obere Gleichung 5.3 eingibt, ergibt sich ein ΔV_B von nur noch $17.54 \mu\text{V}$. Dies entspricht einer Differenz von 1.76% .

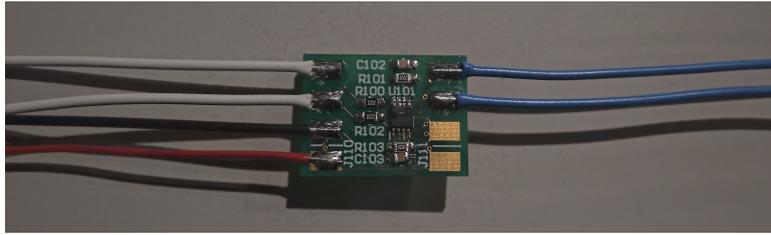


Abbildung 5.5: Kleinformat PCB zur Verstärkung des Brückensignals

5.4.4 PCB

Das PCB wurde mit den Überlegungen designt, dass die eingekauften Komponenten aus Fremdproduktion sind und deshalb der Verstärker nicht direkt integriert werden kann. Da die Komponenten zur Validierung ans Fahrzeug kommen ist es vorteilhaft, wenn Sie möglichst klein sind. Der Formfaktor bei diesem PCB beträgt nur $16.1 \text{ mm} \times 21.7 \text{ mm}$. Die Dehnmessstreifen werden einmalig auf extra gefertigte Stahlquerlenker geklebt. Aus diesem Grund wurden auch die PCB so klein gefertigt, dass man sie nur mit einem Schrumpfschlauch schützen kann. Weiter wurde deshalb auch auf Stecker verzichtet und nur Löt pads für Litzen designt, da sich diese besser eignen um in einem Schrumpfschlauch spritzwasserdicht verstaubt zu werden. Die Berechnungen wurden anhand der Daten des *MCP6D11* von Microchip durchgeführt. Aufgrund eines Lieferengpasses wurde ein *THS4561* voll-differenzieller Verstärker mit ähnlichen Werten und demselben Footprint von Texas Instrument bestellt.

In Abbildung 5.5 ist das PCB bestückt ersichtlich. Die Konfiguration wurde für die Inbetriebnahme verwendet. Deshalb ist der Ausgang für die DMS Versorgungsspannung nicht angeschlossen. Das Vorgehen war folgendes:

- Visuelle Prüfung
- "Flying Probe" Prüfung
- Spannungsmessung DC

Tabelle 5.3: Messungen Inbetriebnahme des DMS-PCB

MP 1	MP 2	Messwert
E+	E-	OL
In+	In-	196 k Ω
out	E	>25 M Ω
In	E	>25 M Ω
R101		81.9 k Ω
R103		81.8 k Ω
R100		10.0 k Ω
R102		10.0 k Ω
Δ In	Δ Out	x 8.37

Bei der DC-Spannungsmessung wurde überprüft, ob die Gleichspannungsverstärkung wirklich der ausgelegten Verstärkung entspricht. Dazu wurden exakt 100 mV an die verstärkenden Eingänge gelegt und am Ausgang konnten 837 mV gemessen werden. Bei einer bestückten Verstärkung von 8.2 entspricht dies einem Fehler von 2%.

5.5 Linearpotentiometer RWS

Im Winter tauchte der Bedarf für einen neuen Sensor auf. Das RWS System sollte ursprünglich über ein eingebautes Schleifkontaktpotentiometer überwacht werden. Aufgrund der unpassender mechanischer Fertigungstoleranzen, konnte dieses nicht verwendet werden. Der Schleifkontakt ist im Betrieb zweimal abgerissen deswegen. Aus diesem Grund wurde entschieden ein VarioOhm Eurosensor mit 75 mm Auslenkung extern zu verwenden. Die Verwendung eines Absolutpositionssensors erwies sich als zwingend. Im Testbetrieb konnte bei einer Regelung auf den Motor alleine ein Drift festgestellt werden, sodass die Hinterräder nach dem Testrun nicht mehr geradeaus zeigten. Diese Probleme konnten mit den Absolutpositionspotentiometern eliminiert werden. Die Potentiometern wurden ausgewählt, weil sie sich als Fahrwerksdistanzsensoren in früheren Jahren bewährt haben und im Lager noch in grosser Zahl verfügbar sind. Das System ist genauer beschrieben in Unterabschnitt 6.3.5.

6 | Aktoren

6.1 Einleitung

In dieser Arbeit soll die Umsetzung der neuen Aktorenkonzepte genauer beschrieben werden. Eine Auflistung aller Aktoren findet sich in der PAIND vom Herbstsemester 2020 (Schwager, 2020).

6.2 Übersicht

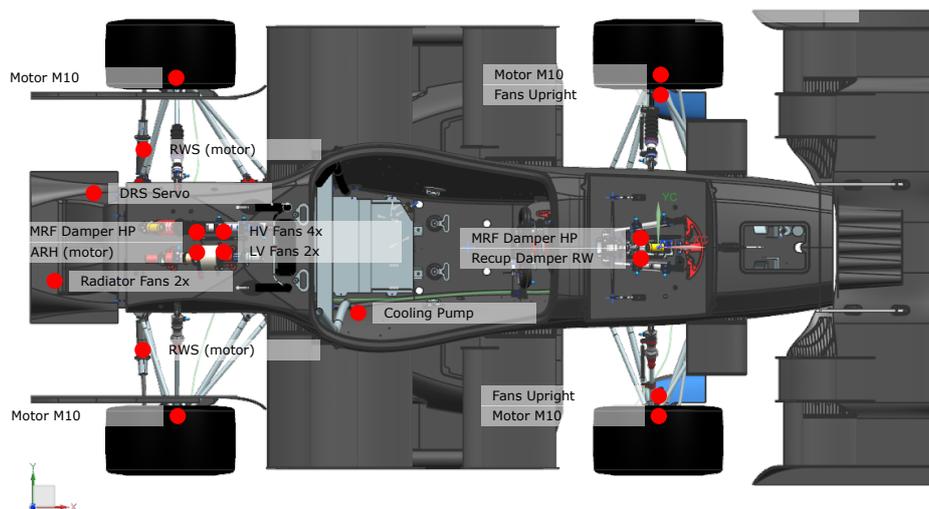


Abbildung 6.1: Aktorenübersicht gemäss Planung für das Jahr 2021

In Abbildung 6.1 sind alle Aktoren in *alvier* aufgeführt. Die Aktoren sind entweder mit Direct-CAN mit der VCU verbunden oder an eine der zahlreichen Printplatten im Fahrzeug angeschlossen. Die VCU sendet dabei Steuerbefehle an das jeweilige MCM, welches diese Befehle in eine für den Aktor brauchbare Form umwandelt.

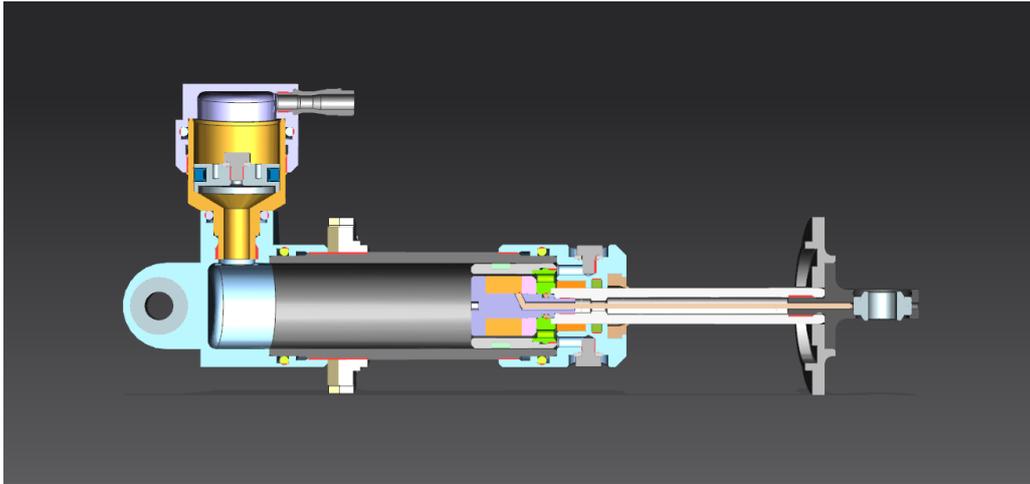


Abbildung 6.2: Schnitt durch den MRF Dämpfer

6.3 Konzepte

6.3.1 MRF-Dämpfer

Im Fahrzeug sind insgesamt drei Dämpfer verbaut. Zwei sind dabei für die Modi Heave und Pitch und ein Dämpfer für Roll zuständig. Für *alvier* 2021 sollen die beiden Heave/Pitch Dämpfer steuerbar sein. Auf den beiden Printed Circuit Board (PCB) sind die Heave/Pitch Dämpfer aufgeteilt. Auf der letztjährigen Version des PCB waren jeweils zwei Dämpferregelungen vorgesehen. Dieses Jahr wurde entschieden, dass Roll weiterhin konventionell sein soll. Deshalb wurde um Platz und Gewicht zu sparen eine Regelung entfernt. Dazu werden sie mit einer magnetrheologischen Flüssigkeit gefüllt. Durch die Änderung der Viskosität der Flüssigkeit unter dem Einfluss eines magnetischen Feldes, kann die Dämpfungskonstante im Betrieb angepasst werden. Die magnetischen Partikel in der Flüssigkeit richten sich dabei je nach magnetischem Feld stärker aus und erhöhen so den Widerstand. Die Dämpfer werden mit einem Strom, der auf von einer Schaltung auf dem FDE-PCB geregelt wird, angesteuert. Im Kolben ist eine Spule gewickelt, die vom Strom durchflossen wird und das Magnetfeld erzeugt. Anschaulich wird dies in Abbildung 6.2. Die höchste natürlich mögliche Frequenz ist die, der ungedeerten Masse mit rund 16 Hz. Darauf muss die Stromregelung mindestens ausgelegt werden.

$$L = N^2 \cdot \mu_0 \cdot \mu_r \cdot \frac{A}{l} \quad (6.1)$$

Die Spule wurde ursprünglich mit einer Induktivität von 185 mH ausgelegt. Der Spulenkern hat eine Permeabilität von 6000 und besteht aus Weicheisen. Die Länge der Spule beträgt 10 mm und sie hat eine Fläche von insgesamt 50 mm². Die maximale Stromänderung ist gegeben durch die Gleichung $u(t) = L \cdot \frac{di(t)}{dt}$. Mit den eingesetzten Werten ergibt sich eine maximale Stromänderung von 91.9 mA/ms. Bei einer Akkuspannung von 17 V kann somit eine Vollaussteuerung von 2 A mit maximal 22.7 Hz betrieben werden.

Beim Zusammenbau des Prototypen konnte die Spule genau so gebaut werden und auch die Werte am Dämpferprüfstand waren vielversprechend. Ein Industriepartner stellte zur Validierung Ihren Dämpferprüfstand zur Verfügung. Durch die Konstruktion muss der isolierte Spulendraht durch die Kolbenstange geführt werden. Beim Zusammenbauen birgt dies das Risiko, dass feinste Haarrisse in

der Isolation entstehen. Teilweise stellten sich in der Flüssigkeit Kurzschlüsse ein, die die Dämpferkonstante zusammenbrechen liessen. Deshalb wurde entschieden die Spule zu vergiessen. Mit den 70 Wicklungen war dies jedoch nicht machbar. Am Prüfstand hat sich gezeigt, dass die Dämpfungskonstante bereits bei 1 A in die Sättigung geht. Entsprechend besteht hier das Potential auf 60 Wicklungen zurückzugehen und damit die Induktivität auf 135.7 mH zu reduzieren. Somit sollte das Magnetfeld weiterhin bis zum vollen Potential aufgebaut werden können und die Spule vergossen werden. Berechnet man die magnetische Flussdichte mit der Formel für einen Zylinder wie in Gleichung 6.2, erreicht man die Sättigung mit einem Strom von unter 1.2 A, was 40 % unter den möglichen 2 A liegt. Durch die tiefere Induktivität kann zudem die maximale Stromänderung auf 125.3 mA/ms gesteigert werden. Dies ergibt eine regelbare Frequenz von maximal 31.3 Hz. Damit wird auch der Sicherheitsfaktor weiter verbessert.

$$B = \mu \cdot \frac{N \cdot I}{l} \quad (6.2)$$

6.3.2 Kühlung

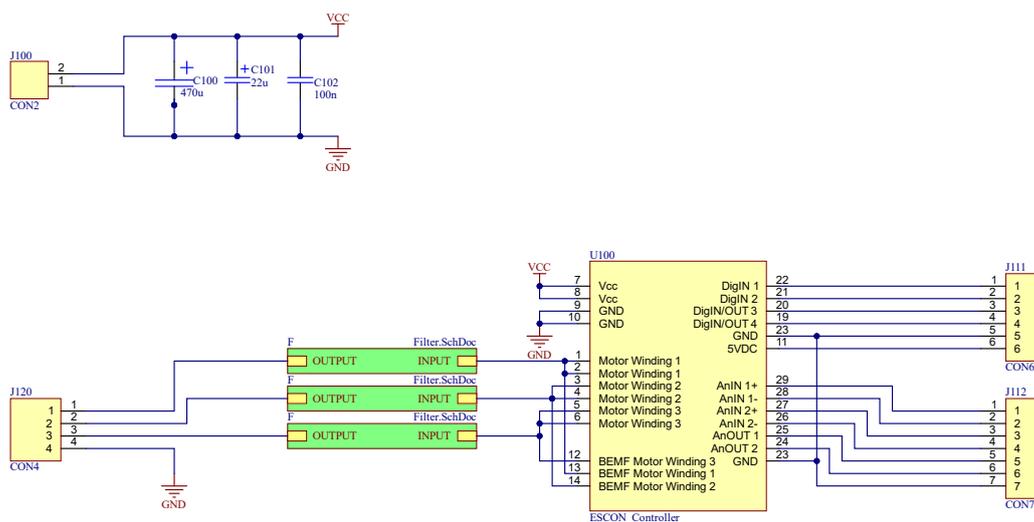


Abbildung 6.3: Schema des PCB zur Verbindung der notwendigen Komponenten

Als Radiatorlüfter waren zunächst 24 V Lüfter aus der 4100N Serie von ebmpapst verbaut. Diese dienten dazu die Wärme aus dem Kühlwasser abzuführen. Für diese Saison wurden verschiedene Optionen geprüft, um eine leichtere Kühlung zu ermöglichen. Wie bereits in der vergangenen Saison sollte die Hinterachse weiterhin wassergekühlt bleiben. Die zusätzlichen Antriebe an der Vorderachse sollten nicht an die Wasserkühlung angeschlossen werden sondern je eine eigene Luftkühlung erhalten. Aus Zeitgründen wurde diese Option verworfen und stattdessen die Wasserkühlung verbessert.

Die Wasserkühlung wurden in diesem Semester durch ein neues Konzept ersetzt. Die herkömmlichen Lüfter werden durch selbstgebaute Lüfter ersetzt. Dafür wird ein kleiner Sensorloser Motor mit Gegen-EMK verwendet, um handelsübliche Karbonrotoren von Multikoptern anzutreiben und einen Luftstrom zu erzeugen. Diese selbstgebaute Lösung wiegt insgesamt 220 g im Gegensatz zu den herkömmlichen Lüftern, die 430 g auf die Waage bringen. Im Zuge des Neudesigns wurde auch die Ausrichtung des Luftstroms auf die Aerodynamik optimiert. Dadurch konnte beim Abtriebsbeiwert eine Verbesserung um 0.1 erreicht werden.

Auch der Radiator selber wurde umdesignt und anstelle einer herkömmlichen Struktur wurde eine Minimaloberflächenstruktur im 3D-Druckverfahren hergestellt. Mittels einer speziellen triply periodic minimal surface Lattice Struktur kann das Volumen des Körpers, bei maximaler Oberfläche für den Wärmetausch zwischen Kühlwasser und Luftstrom, minimiert werden. Aufgrund des kleineren Volumens des Kühlkörpers befindet sich auch weniger Wasser im Kühlsystem, was das Gewicht weiter senkt. Das Gewicht des Radiators konnte von 950 g auf 800 g gesenkt werden. Mehr ins Gewicht fällt jedoch die Reduzierung des Wassergewichts von 434 g auf 258 g. Insgesamt ergibt sich daraus eine Gewichtsreduzierung um 28.5 %.

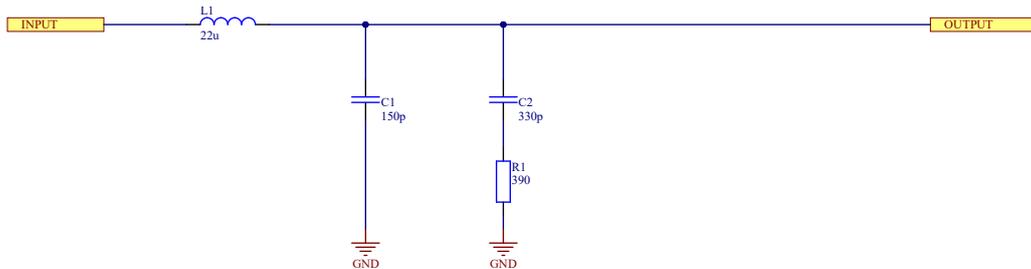


Abbildung 6.4: Schema des Filters in Anlehnung an die Vorlage im Datenblatt des Motor Controllers

Für die Implementierung des Motor-Controllers von Maxon wurde eine kleine Printplatte designt. Das Schema dazu ist in Abbildung 6.3 ersichtlich. Das PCB dient als Breakout-Board für die Stromversorgung sowie die Digital- und Analogports. Ebenfalls wurden Kondensatoren für die Spannungstabilisierung vorgesehen. Die Notwendigkeit von Phasenfiltern kann gemäss der Formel Gleichung 6.4 aus dem Datenblatt von Maxon berechnet werden (Maxon, 2018). Es konnte so gezeigt werden, dass mit dieser Konfiguration kein zusätzliches Filter notwendig ist. Trotzdem können mit einem Filter die Störaussendungen verringert werden. Deshalb wird wie im Datenblatt vorgeschlagen eine 22 µH Drossel vorgesehen. Die Filterschaltung ist in Gleichung 6.4 ersichtlich. Der Typ ist der gleiche, der auch zur Eingangsspannungsfiltrierung auf dem FDE-PCB eingesetzt wird. Damit ist man frei die Filterung zu implementieren oder den Schaltungsteil zu überbrücken, um die Motoren ungefiltert zu betreiben.

$$L_{phase} = \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{V_{cc}}{3 \cdot f_{PWM} \cdot I_N} - (0.3 \cdot L_{motor}) \right) \quad (6.3)$$

$$L_{phase} = \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{24 \text{ V}}{3 \cdot 53.6 \text{ kHz} \cdot 4 \text{ A}} - (0.3 \cdot 301 \text{ µH}) \right) = -26.49 \text{ µH} \quad (6.4)$$

6.3.3 Schwierigkeiten

Die Maxon-Controller sehen es vor, dass die Eingangsspannung dauerhaft anliegt und mittels eines Freigabesignals die Motoren Ein- und Ausgeschaltet werden. Aufgrund der späten Design-Entscheidung für dieses System, musste es mit den alten Lüftern kompatibel sein, um es im Zweifelsfall einfach umbauen zu können. Nicht berücksichtigt wurde dabei, dass es keine Konfigurationseinstellung gibt mit der man die Controller über die Spannungsversorgung und das PWM alleine steuern kann. Es ist zwingend ein zusätzliches Freigabe-Signal erforderlich. Der erste Lösungsversuch bestand daraus, die Eingangsspannung auf einen Input-Pin abzuschlaufen. Wird jedoch das Signal angelegt bevor der Controller gestartet ist, wechselt er in den Fehlerzustand und kann nur über das Neusetzen des Freigabesignals zurückgesetzt werden. Aus diesem Grund wurde nachträglich zusätzlich ein RC-Glied eingebaut, um das anlegen des Signals zeitlich zu verzögern. Die Versorgungsspannung beträgt maximal 24 V. Das Signal soll um rund eine Sekunde verzögert angelegt werden. Der Schaltpunkt der Eingänge liegt

bei 2 V. Mit zwei Freiheitsgraden konnte eine Komponente frei gewählt werden. Aus diesem Grund wurde der Kondensator aus dem Bestand anhand eines passenden Formfaktors ausgesucht. Dessen Wert war damit mit 10 μF vorgegeben. Mittels der Gleichung 6.5 kann daraus der benötigte Widerstand berechnet werden. Der genaue Widerstand wäre 1.15 $\text{M}\Omega$ es wurde jedoch ein 1 $\text{M}\Omega$ Widerstand eingesetzt, was eine Ladezeit von knapp unter 1 s bedeutet.

$$R = \frac{\left(\frac{-time}{C}\right)}{\log\left(1 - \frac{U_c}{U_q}\right)} \quad (6.5)$$

$$R = \text{frac}\left(\frac{-1}{C}\right)\log\left(1 - \frac{2}{24}\right) \quad (6.6)$$

6.3.4 ARH

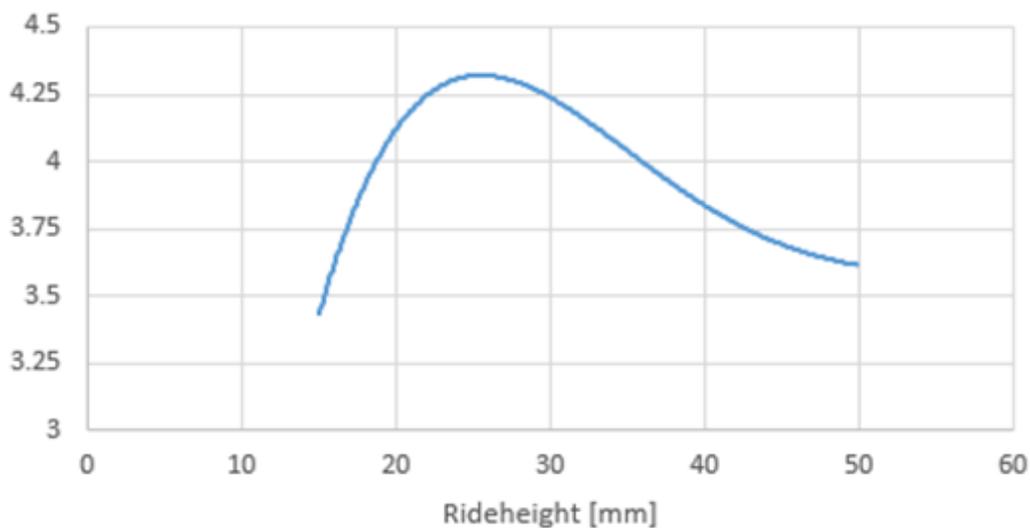


Abbildung 6.5: Kurve des Auftriebsbeiwerts bei verschiedenen Fahrzeughöhen, gemessen zwischen Unterboden und Strasse

Damit kann ausserhalb der Rennen auf Knopfdruck die Bodenfreiheit erhöht werden. Während des Rennens soll dem Modus Pitch entgegengewirkt werden. Als Aktor für das System ist ein Brushless Motor mit einer Spindel von Maxon vorgesehen. Mit dem EPOS4 Controller von Maxon wird der Motor angesteuert. Der Controller wird direkt über CAN von der VCU gesteuert.

In Abbildung 6.5 kann man erkennen, dass der Auftriebsbeiwert von der Fahrzeughöhe ab Boden abhängig ist. Mittels Computational Fluid Dynamics (CFD) konnte gezeigt werden, dass die optimale Fahrzeughöhe bei 25 mm liegt. Im Regelwerk der Formelastudent wird im Stand vor und nach dem Rennen eine Bodenfreiheit von 30 mm verlangt. Als Sicherheitsmarge werden weitere 5 mm eingerechnet, da eine zu tiefe Bodenfreiheit nach dem Rennen zur Disqualifikation führen kann. Im Rennen selber darf die Bodenfreiheit reduziert werden. Um die optimale Aerodynamikperformance zu erreichen ist es entsprechend sinnvoll ein System zu haben, um die Bodenfreiheit während des Fahrens zu reduzieren.

Durch das absenken während der Fahrt kann der Masseschwerpunkt des Fahrzeugs um über 2% gesenkt werden. Der Schwerpunkt sinkt von 305 mm auf 29 mm. Der Grund warum nicht die ganzen

10 mm erreicht werden, ist die Position des ARH Systems, die über der XY-Ebene des Massenschwerpunkts liegt.

Allerdings wird das Fahrzeug durch das System um 1.5 kg schwerer. Gewichtsmässig addieren sich der Motor mit 125 g, das Kugelumlauf-Spindelgetriebe mit 330 g sowie die mechanischen Komponenten mit rund 875 g. Zusätzlich erfordert das System noch Anpassungen am Heave-Pitch-Zylinder selber, sowie Leitungen und PCB inklusive Box um auf rund 1.5 kg Gesamtgewicht zu kommen.

In der Laptime Simulation ergibt sich aus dem um 4% verbesserten C_T und des um 1% tieferen Masseschwerpunkts und der Gewichtssteigerung ein Nettogewinn von 0.22% in der Rundenzeit. Die oben genannten Rules sind nachfolgend aufgelistet (Formula Student Germany, 2020):

- **T2.3.2** - The minimum static ground clearance of any portion of the vehicle, other than the tires, including a driver, must be a minimum of 30 mm.

6.3.5 RWS

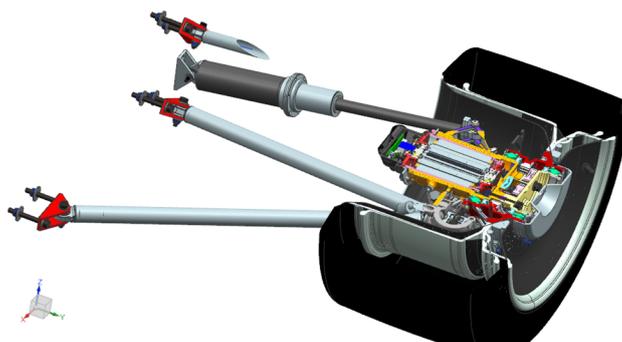


Abbildung 6.6: Eine Pendelstütze der Radaufhängung wird mit einer variablen motorisierten Stange ersetzt.

Mit einem erlaubten Winkel von 6° gemäss Regel (T2.6.11) lohnt es sich, ein System einzubauen, welches die Räder an der Hinterachse abhängig vom Lenkwinkel mitlenkt. Die Motoren und Controller stammen von Maxon und sind die gleichen Modelle wie in Unterabschnitt 6.3.4 beschrieben. Aus Kompatibilitätsüberlegungen werden auch die Kabel und Stecker gleich konfektioniert, mit Ausnahme der zusätzlichen Absolutpositionssensoren aus Abschnitt 5.5.

In Abbildung 6.7 ist ersichtlich wie die Hinterradlenkung das Fahrzeug unterstützen soll. Das Ziel ist es, den Schlupfwinkel β gegen Null zu bringen, damit sich der Schwerpunkt des Fahrzeugs in die gleiche Richtung bewegt wie die Räder des Fahrzeugs. Auch das Untersteuer- und Übersteuerverhalten des Fahrzeugs kann so reduziert werden. Ebenfalls wird, die Zeit in der sich das Fahrzeug in einer transienten Fahrsituation befindet, minimiert.

Die Hinterradlenkung ermöglicht eine Regelung der Giergeschwindigkeit des Fahrzeugs. Die Vorteile sind dabei dieselben wie oben erwähnt. Dazu kommen, dass sich das Fahrzeug besser so verhält wie es der Fahrer will. Und man kann die maximale laterale Kraft auf die Räder aufrechterhalten. Damit werden die Reifen möglichst optimal ausgenutzt und die Kurvengeschwindigkeit kann maximiert werden.

Die oben genannten Regeln sind nachfolgend aufgelistet (Formula Student Germany, 2020):

7 | FDE-PCB

7.1 Einleitung

Das FDE-PCB ist hauptsächlich dafür zuständig Sensoren und Aktoren, die über keine eigene CAN-Anbindung verfügen mit der VCU zu verbinden. Dasselbe Board wird sowohl im vorderen wie auch im hinteren Teil des Fahrzeugs eingesetzt. Einerseits ist der Mikrocontroller (MC) auf dem MCM nicht geeignet um so viele Sensor auszulesen und andererseits reduziert sich damit auch die Leitungslänge zu den Sensoren, was Störungen reduziert. Ein grosser Vorteil ist, dass die Sensoren mit Ausnahme des Bremsdrucks, eines zusätzlichen Dämpfer-Distanzsensors und der Kielsonde symmetrisch im vorderen wie im hinteren Teil des Fahrzeugs vorliegen.

7.2 Neues PCB

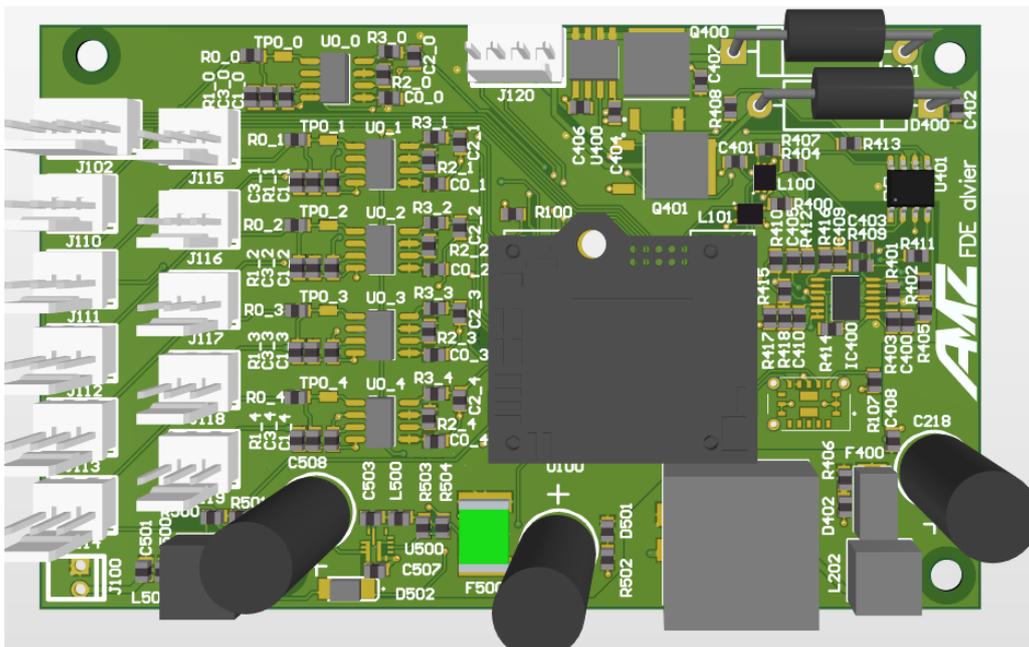


Abbildung 7.1: Oberfläche des neuen FDE-PCB

Im Herbstsemester wurden für das für das Layout auf dem FDE-PCB einige Schaltungsanpassungen entwickelt sowie ein Zonenkonzept ausgelegt. Beim Layout wurde insbesondere das Zonenkonzept beachtet, um auch mit dem Betrieb des MRF-Dämpfers keine Probleme mit Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV) zu erhalten. Zudem wurde Wert darauf gelegt, dass neu auch der Silkscreen sauber im Layout implementiert ist, damit er in der Produktion gedruckt werden kann. Dies verspricht eine verbesserte Störungssuche, wenn man die Komponenten aus dem Schema anhand der Beschriftung direkt auf dem PCB finden kann.

Das PCB wurde mit der Kielsonden-Auswertungseinheit um Sensorfunktionalität erweitert, sowie zusätzliche Reserve-Filter eingeplant. Trotzdem konnte das Layout weiter optimiert werden. Mit der Entfernung je einer Stromsteuerung für MRF-Dämpfer konnte Platz geschaffen werden. Es wurden mehr kritische Komponenten auf die Vorderseite des PCB verschoben und trotzdem konnte die Fläche des PCB um 6.5 % verkleinert werden. Bei der Produktion wurde mit Optiprint abgeklärt, inwiefern die Dicke des PCB verringert werden kann. Aus diesen Abklärungen wurde die Dicke des FR4-Materials auf 1.2 mm reduziert und das PCB sollte trotzdem allen zu erwartenden Belastungen standhalten. Die im Betrieb herrschenden Vibrationen sollten keinen Unterschied machen und auch für das Handling beim Inbetriebnehmen oder messen ist es so genügend widerstandsfähig. Total konnte das Gewicht mit diesen Massnahmen von 24 g auf 17 g reduziert werden. Dies entspricht einer Reduktion des nackten PCB um beinahe 30 %.

7.2.1 Schwierigkeiten

Die Lieferketten für Elektronikbauteile waren in der ganzen Welt gestört. Insbesondere grosse Branchen wie die Automobilindustrie kämpfen damit, dass sie nicht in ausreichendem Umfang beliefert werden können. Teilweise mussten Produktionslinien oder ganze Werke heruntergefahren werden. Der Effekt ist auch bei den Kleinmengen spürbar. Schaltungskomponenten, die während der Entwicklung noch problemlos erhältlich waren, fehlten plötzlich in den Lagern als im Januar und Februar bestellt werden sollte. Der neu evaluierte DC/DC-Wandler *TPS56637RPAR* von Texas Instruments war nicht mehr lieferbar und hatte Lieferfristen von bis zu 34 Wochen und mehr. Glücklicherweise wurde die Bestellung gerade noch kurz vorher auf eine angekündigte Lieferung an Mouser im Mai bestellt. Das geschätzte Lieferdatum war zu diesem Zeitpunkt der 04. Mai. Da die Lage zu dieser Zeit nicht nach Entspannung ausgesehen hat, wurden mehrere Möglichkeiten analysiert. Der Wechsel auf einen anderen Wandler mit gleichem Footprint erwies sich als unmöglich, da der Footprint keinem Standard entsprach und die Auswahl entsprechend nicht vorhanden war. Als Notlösung wurde die Variante ausgewählt, dass ein Evaluationsbaord bestellt und der Chip davon ausgelötet würde. Die Verfügbarkeit wurde geprüft und war vorhanden. Glücklicherweise kündigte Mouser kurz vor Abschluss dieser Bestellung die Auslieferung an. Am 27. April wurde das Paket direkt aus Texas eingeflogen.

7.2.2 Inbetriebnahme

Die Inbetriebnahme konnte nach einiger Verzögerung begonnen werden. Im ersten Schritt wurde das PCB vorne und hinten mit den Surface-mounted Device (SMD)-Komponenten bestückt. Insbesondere die No-Leads Footprints stellten dabei einen Lerneffekt dar. Die Spulen hatten teilweise einen unterliegenden Footprint, waren aufgrund der Grösse jedoch kein Problem. Der obenerwähnte Baustein *TPS56637RPAR* vereint jedoch zehn Löt pads auf nur 3.1 mm × 3.1 mm Grundfläche. Mit der geteilten Kamera an der Lötstation in Horw konnte der Baustein mit Fingerspitzengefühl platziert werden. Bei der Widerstandsprüfung konnte kein Kurzschluss detektiert werden.

In einem weiteren Schritt wurden die kritischen Stellen wie die Spannungsversorgungen sowie insbesondere alle Anschlüsse des *TPS56637RPAR* auf Kurzschlüsse geprüft. Auf der zuerst bearbeiteten Rückseite wurden an vier Stellen die Widerstände zu nahe platziert, sodass Sie sich beim Reflowlöten zueinander gezogen hatten. Auf der Vorderseite konnte mit präziser Platzierung dieses Problem komplett umgangen werden.

7.3 Ausblick

Aufgrund anderer dringend anstehender Arbeiten konnte das FDE-PCB bisher noch nicht vollständig in Betrieb genommen werden. Im nächsten Schritt werden die Durchloch-Komponenten eingelötet. Sobald dies abgeschlossen ist, kann die Platine mit Spannung versorgt und die Spannungslevel der Versorgung auf Ihre Richtigkeit geprüft werden. Danach müssen die Signaleingangspfade alle mit einem Testsignal beaufschlagt werden, damit die Verstärkung verifiziert werden kann. Da MRF-Dämpfer dieses Jahr das erste Mal nach 2017 wieder ans Fahrzeug kommen sollen, wird einiges an Aufwand für die Inbetriebnahme und Validierung erwartet. Die Verzögerung liegt jedoch nicht alleine auf Seite der Elektrotechnik, sondern auch die mechanischen Dämpfer sind noch nicht einsatzbereit. Geplant ist, dass die Dämpfer nach dem ersten Event ans Fahrzeug kommen und getestet werden können.

8 | Schlussdiskussion

Die schönste Seite an diesem Projekt, war die Zusammenarbeit mit dem unglaublichen Team. Mit technischen Kenntnissen, aber vorallem mit scheinbar unbegrenzter Motivation ausgestattet trieb das Team das Projekt voran. Die Dynamik war bereichernd und half über so manche Schwierigkeiten hinweg. Es war immer der Geist spürbar, dass jeder für sich und das Team das beste will und bereit ist Vollgas zu geben.

In der technischen Weiterentwicklung lag der Fokus insbesondere auf Aufrechterhaltung und Verbesserung der Zuverlässigkeit. Um trotz Zweijahreszyklus Konkurrenzfähig zu bleiben, konnten aber auch neue Konzepte gepusht und erprobt werden. Dies ermöglichte in diesem per se interdisziplinären Projekt Einsicht in unzählige Gebiete. Man half mit bei Aerodynamik, Fahrwerk und natürlich allen Elektrotechnischen Herausforderungen. Geschult wurde auch das Gesamtverständnis fürs Fahrzeug und die Fähigkeit allgemein ein Projekt von weiter weg zu betrachten. Ich bin überzeugt, dass der AMZ jeden Studenten zu einem besseren Ingenieur macht.

Bei allem Lob muss man auch beleuchten, dass ein Prestigeprojekt auch Schattenseiten hat. Der AMZ droht teilweise an seinem eigenen Anspruch zu scheitern. Nach jahrelangen schleichenden Kürzungen der Teilnehmer wird die Arbeitslast des einzelnen bisweilen nicht mehr bearbeitbar. Die daraus entstehenden Konflikte sind menschlich anspruchsvoll und belasten einzelne Mitglieder schwer. Der Führungsstil ist oft von Unerfahrenheit geprägt was den Umgang mit Kritik nicht immer einfach gestaltet. Insbesondere wenn Erfahrung aus dem Projekt aus Vorjahren mit Erfahrung aus dem Beruf aufeinandertreffen.

Aber auch zwischenmenschliche Schwierigkeiten führen zu einem Wachstum. Die Stimmung unter den Studenten wie auch mit der Teamleitung hat sich entwickeln können. Bereichernd ist auch die Zusammenarbeit mit Veteranen. Die Freundschaft und Hilfsbereitschaft im Team wird mit Sicherheit weit über die Wettkampfsaison Bestand haben. Ich persönlich habe zweifelsfrei ein Wachstum sowohl persönlich fachlich wie auch in der Begeisterung mitgemacht. Ein Highlight für mich ist, dass ich mich befähigt fühle ein komplexes Projekt auszulegen und zu bearbeiten in Zukunft. Sei es im privaten, beruflich oder als Start-Up. Zuerst steht jedoch die mit Spannung erwartete Wettkampfsaison an. Wir hoffen alle, dass sich die Mühen gelohnt haben und wir allen zeigen können, dass *alvier* konkurrenzfähig ist.

Abbildungsverzeichnis

Titelbild	1
II.I Punkteverteilung Formula Student nach FSG Regelwerk	vii
II.II Skipad Strecke	viii
II.III Organigramm Module <i>alvier</i>	ix
II.IV Organigramm Modul Electronics	x
2.1 Einziger Hinweis, dass der ESF dieses Jahr nicht notwendig ist	3
2.2 Aktueller Stand der Auswertung auf der FSG-Website	4
3.1 Ausschnitt aus dem CBOM mit eingepreisten Teilen und Prozessen	5
3.2 Beispiel einer Kostenabschätzung anhand des FDE-PCB	6
4.1 Blockschaltbild von der Verkabelung der Lüfter mit dem bestehenden LV-Supply	7
4.2 Blockschaltbild von der Verkabelung des Active Ride Height Systems	8
4.3 Blockschaltbild von der Verkabelung des Rear Wheel Steering Systems	9
5.1 Sensorübersicht gemäss Planung für das Jahr 2021	10
5.2 Blockschaltbild von der Verkabelung der Dehnmessstreifen	11
5.3 Ausschnitt aus der Verstärkerschaltung die an die Messbrücke gehängt wird	13
5.4 Ersatzschaltbild das durch die Belastung entsteht	13
5.5 Kleinformat PCB zur Verstärkung des Brückensignals	14
6.1 Aktorenübersicht gemäss Planung für das Jahr 2021	16
6.2 Schnitt durch den MRF Dämpfer	17
6.3 Schema des PCB zur Verbindung der notwendigen Komponenten	18
6.4 Schema des Filters in Anlehnung an die Vorlage im Datenblatt des Motor Controllers	19
6.5 Kurve des Auftriebsbeiwerts bei verschiedenen Fahrzeughöhen, gemessen zwischen Unterboden und Strasse	20
6.6 Eine Pendelstütze der Radaufhängung wird mit einer variablen motorisierten Stange ersetzt.	21
6.7 Darstellung der wirkenden Kräfte im Fahrrad Modell (Milliken, W.F. and Milliken, D.L., 1995)	22
7.1 Oberfläche des neuen FDE-PCB	23

Tabellenverzeichnis

II.1	Zeitplan AMZ Saison 2021	xi
5.1	Lastfälle und korrespondierende Messsignalauslenkungen	11
5.2	Kenndaten aus dem Datenblatt des Umsetzers von Zemic	12
5.3	Messungen Inbetriebnahme des DMS-PCB	14

Literatur- und Quellenverzeichnis

8.1 Quellen

Literatur- und Quellenverzeichnis

- Elektrotechnik Studenten. (2016). *Industrieprojekt, formula student electric* (Unveröffentlichte Diplomarbeit). Hochschule Luzern.
- Elektrotechnik Studenten. (2018). *Industrieprojekt, formula student electric* (Unveröffentlichte Diplomarbeit). Hochschule Luzern.
- Emmenegger, S. (2015). *Industrieprojekt, formula student electric* (Unveröffentlichte Diplomarbeit). Hochschule Luzern.
- Erich Styger, Rolf Mettler. (2021). *Bachelorarbeit, formula student electric* (Bericht). Hochschule Luzern.
- Formula Student Germany. (2020, September). *Formula student rules 2020 v1*. Zugriff am 01.10.2019 auf https://www.formulastudent.de/fileadmin/user_upload/all/2020/rules/FS-Rules_2020_V1.0.pdf
- Leone, R. (2020). *Industrieprojekt, formula student electric* (Unveröffentlichte Diplomarbeit). Hochschule Luzern.
- Maxon. (2018). *ESCON Module 50/4 EC-S* (Datasheet). Autor. Zugriff auf https://www.maxongroup.ch/medias/sys_master/root/8834399567902/446925-ESCON-Module-50-4-EC-S-Geraete-Referenz-De.pdf (Online; abgerufen am 10.06.2021)
- Milliken, W.F. and Milliken, D.L. (1995). *Race car vehicle dynamics* (Bd. 400). Society of Automotive Engineers Warrendale, PA.
- Schwager, C. (2020). *Industrieprojekt, formula student electric* (Unveröffentlichte Diplomarbeit). Hochschule Luzern.

A | Anhang

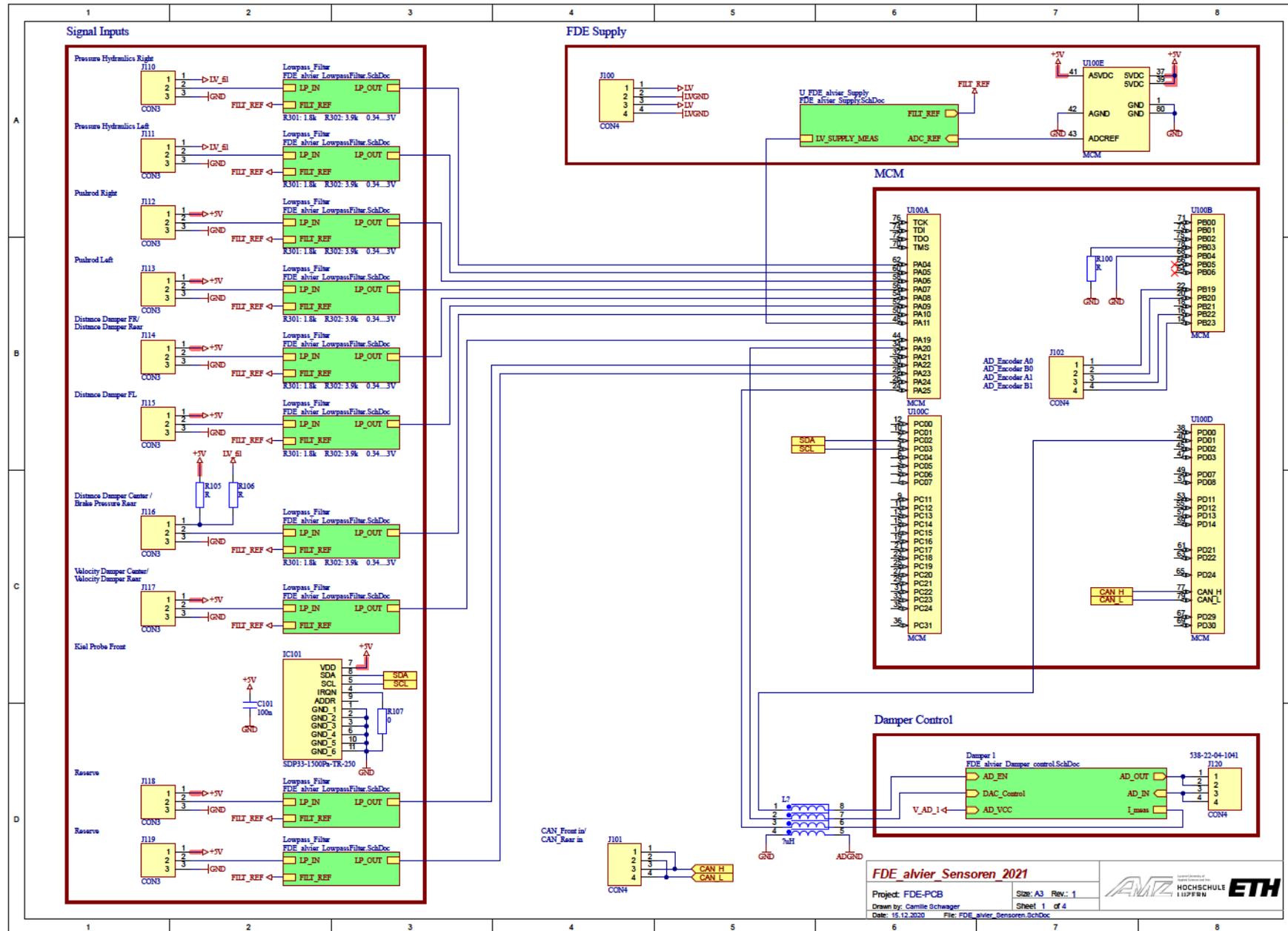
1.1 Anhang 1

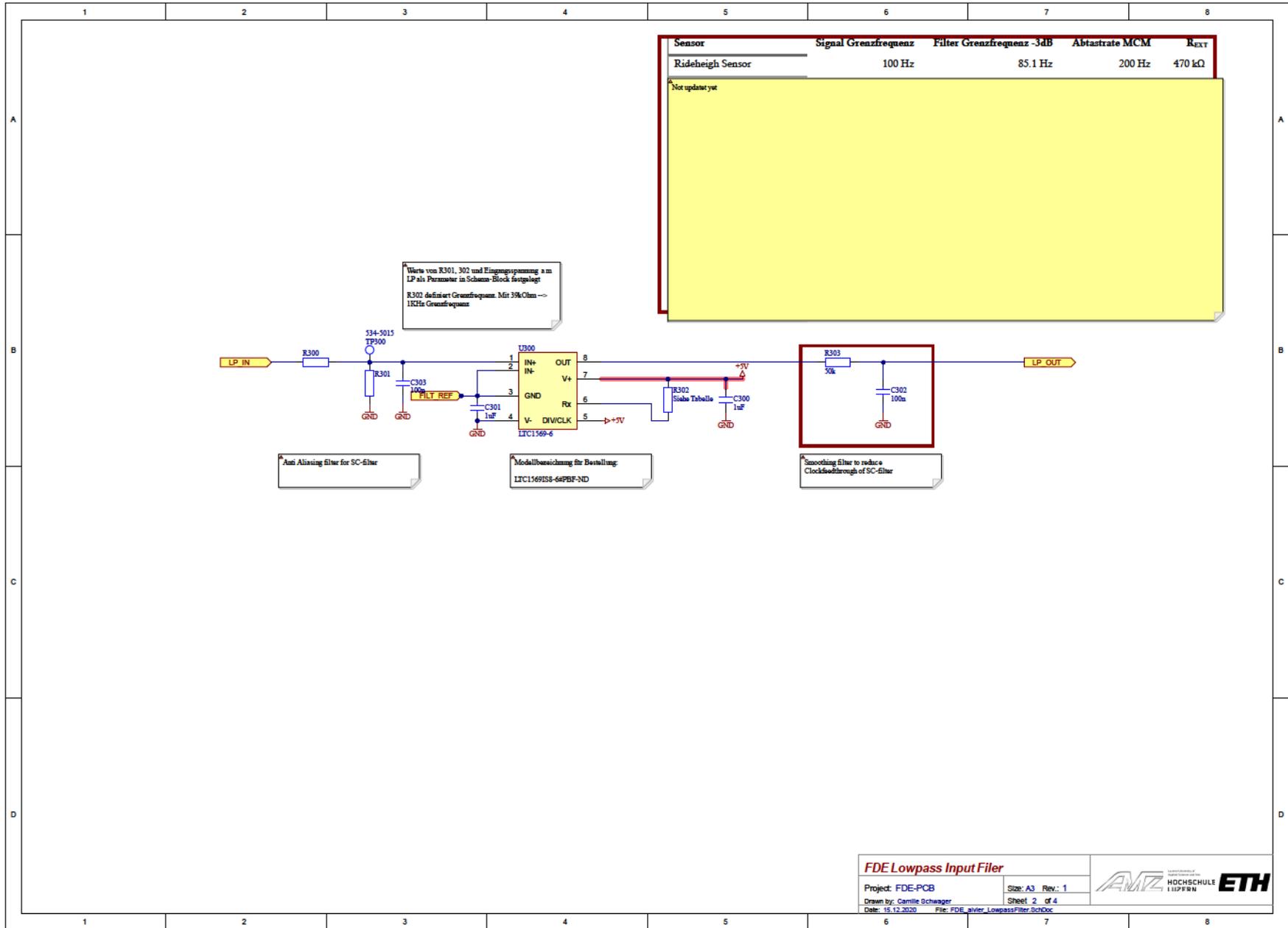
1.2 SD-Speicherkarte

Der komplette Anhang, inklusive Berechnungen, Datenblätter und weiterführender Dokumentation ist auf der angefügten SD-Speicherkarte zu finden.

Anhang auf SD-Speicherkarte

1.3 Schema FDE-PCB

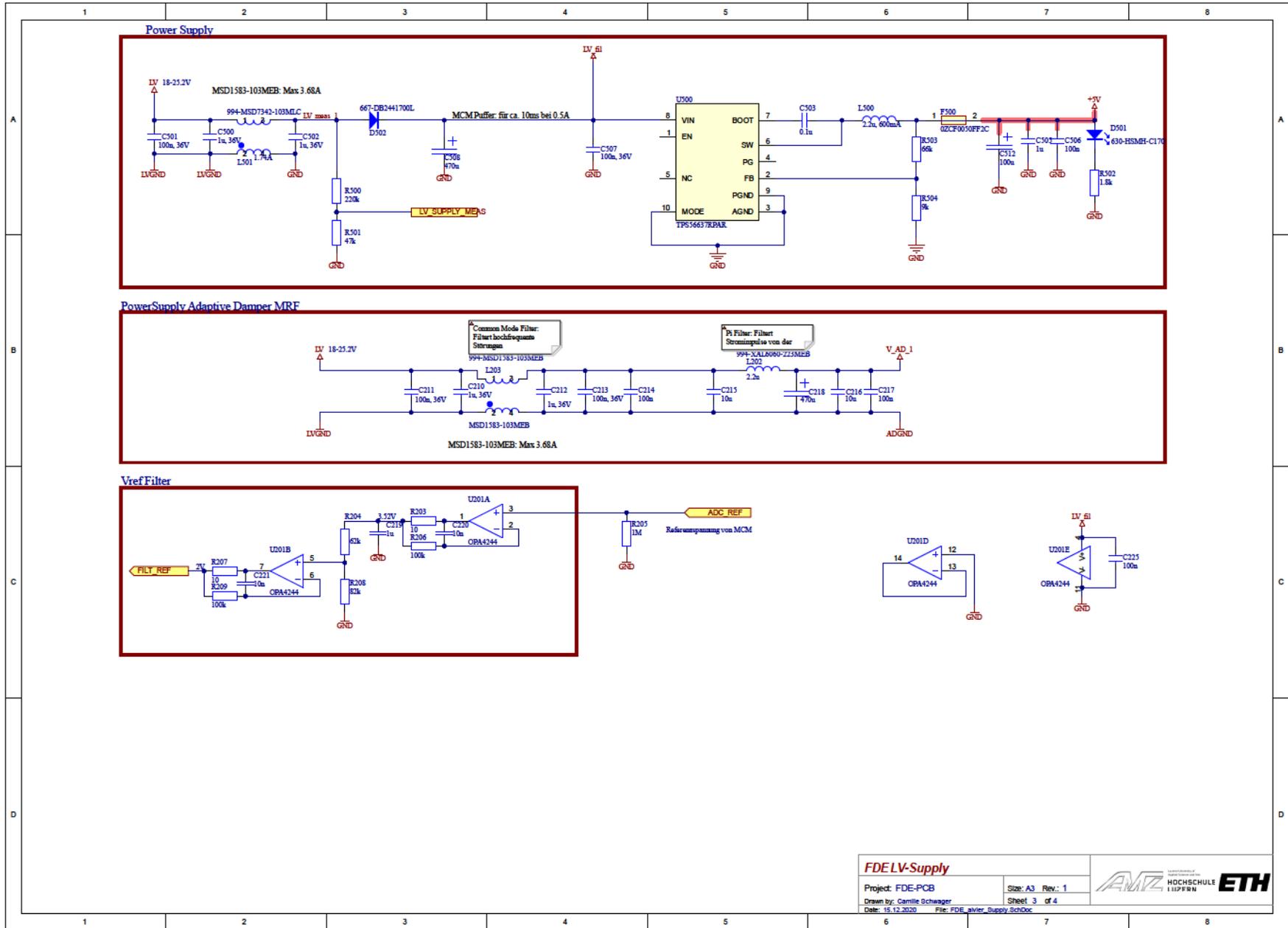




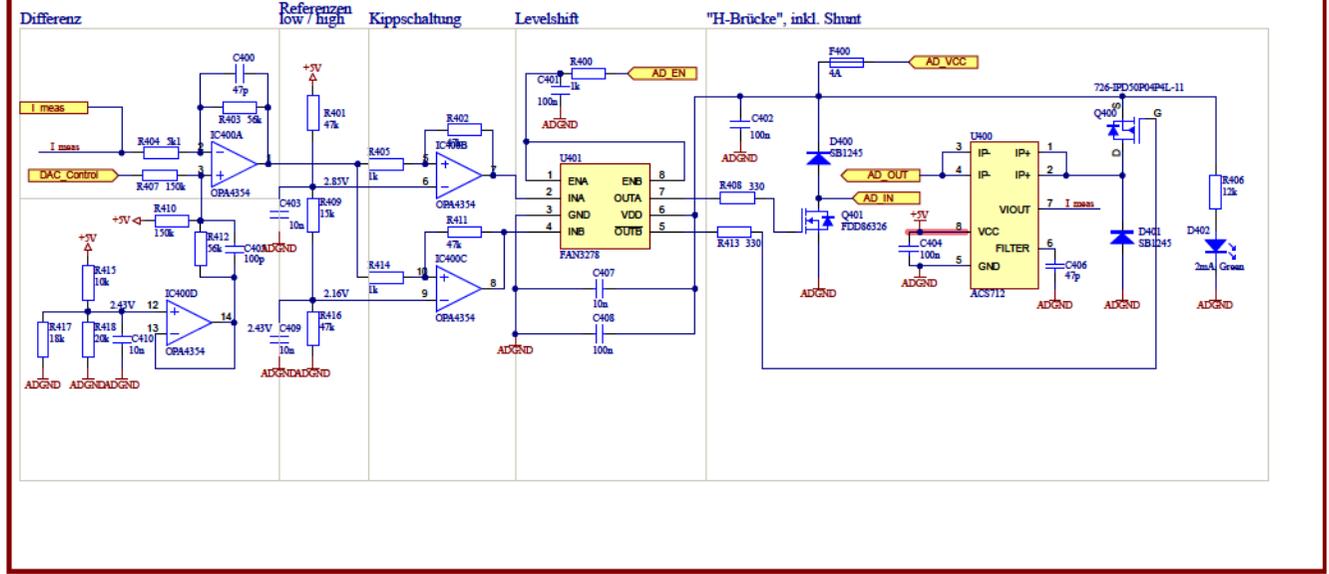
FDE Lowpass Input Filter

Project: FDE-PCB
 Drawn by: Camille Schaefer
 Date: 15.12.2020
 Size: A3, Rev.: 1
 Sheet: 2 of 4
 File: FDE_alvier_LowpassFilter_SCHDoc





Damper Control



Power Supply AD

