Voorwoord

Ik had zelf niet naar een bedrijf gestapt met een vraag naar een Bachelorproef. Hierdoor moest ik kiezen uit de aan vragen vanuit bedrijven. Mijn drie keuzes dat ik had doorgegeven aan de school waren al ingenomen. Door het eigenlijk te laat indienen van de voorstelen van Antwerp Space heb ik nog de kans gehad om bij Antwerp Space mijn Bachelorproef te doen. Ik bedank daarvoor mijn bedrijfspromotor Donald Heyman voor deze voorstellen nog door te sturen ook al was het te laat. En de vlotte samenwerking. Daarnaast wil ik ook mijn schoolpromotor Pedro Wijns bedanken voor de hulp. Ten slotte nog een speciaal woord van dank aan mijn familie.

Samenvatting

Het doel van dit eindwerk is om een extra veiligheid te maken voor het testen van space grade elektronica. De voedingen die worden gebruikt voor deze elektronica zijn Latching Current Limiters (LCL). Deze worden ingedeeld in LCL-klasse en rond deze LCL-klasse maakte ik mijn beveiliging.

Vanuit het bedrijf ben ik gestart met een industriële eFuse development bordje. Een eFuse is een ic dat de stroom zal onderbreken wanneer de spanning of de stroom boven een instelpunt gaat. Ik moest dus zien of de gegeven ic’s goed genoeg waren voor een LCL-klassen 1,2 en 3 en of dat er alternatieven waren die mogelijk beter geschikt waren. Na het vinden van een goede ic kon ik verder naar het maken van een volledige pcb met een microcontroller en een usb interface met LabVIEW. Ik heb dan een eerste prototype gemaakt met een tps26631 en een arduino MKRZERO. Na het testen hebben we beslist welke extra functionaliteit mag blijven.

Er was nog geen toolchain voor dit project. Ik heb dus gekeken wat ik kon gebruiken voor een arduino bord. PlatformIO is in mijn opinie de beste toolchain voor arduino in een professionele context.

Een plan voor een finaal product is gemaakt. Er was geen tijd om dit ook echt helemaal uit te voeren.

Inhoudstafel

[Voorwoord 2](#_Toc72183080)

[Samenvatting 3](#_Toc72183081)

[Inhoudstafel 4](#_Toc72183082)

[Inleiding 6](#_Toc72183083)

[1 blokschema 7](#_Toc72183084)

[2 Software 8](#_Toc72183085)

[2.1 Doel 8](#_Toc72183086)

[2.2 IDE’s 8](#_Toc72183087)

[2.3 User interface 9](#_Toc72183088)

[2.3.1 Modbus over virtual com port 9](#_Toc72183089)

[2.3.1.1 Coils 9](#_Toc72183090)

[2.3.1.2 Inputs 9](#_Toc72183091)

[2.3.1.3 Finite state machine modbus 10](#_Toc72183092)

[2.3.1.4 Control and wait flowchart 11](#_Toc72183093)

[2.3.2 Front panel 12](#_Toc72183094)

[2.3.2.1 Local user interface flowchart 13](#_Toc72183095)

[2.3.3 LabVIEW 15](#_Toc72183096)

[2.3.3.1 Instellen 15](#_Toc72183097)

[3 Hardware 16](#_Toc72183098)

[3.1 Component keuze 16](#_Toc72183099)

[3.1.1 eFuse 16](#_Toc72183100)

[3.1.2 ESD en overspanning beveiliging 16](#_Toc72183101)

[3.1.2.1 Ingang 16](#_Toc72183102)

[3.1.2.2 Uitgang 17](#_Toc72183103)

[3.2 eFuse TPS26631 17](#_Toc72183104)

[3.2.1 Spanning limiet instellingen 17](#_Toc72183105)

[3.2.1.1 LCL-classes 17](#_Toc72183106)

[3.2.1.2 Extra instelpunten 19](#_Toc72183107)

[3.2.2 Stroom limiet instellingen 20](#_Toc72183108)

[3.2.2.1 Class1 20](#_Toc72183109)

[3.2.2.2 Class 2 20](#_Toc72183110)

[3.2.2.3 Class 3 20](#_Toc72183111)

[3.2.3 Power Good 20](#_Toc72183112)

[3.3 Optocoupler voorschakel weerstand 21](#_Toc72183113)

[3.3.1.1 eFuse kant 21](#_Toc72183114)

[3.3.1.2 Digitale kant 21](#_Toc72183115)

[3.4 Stroom berekeningen 21](#_Toc72183116)

[3.5 Prototype 21](#_Toc72183117)

[3.5.1 Schema’s 22](#_Toc72183118)

[3.5.2 PCB 24](#_Toc72183119)

[3.5.3 Tests 25](#_Toc72183120)

[3.5.3.1 Spanning punten 25](#_Toc72183121)

[3.5.3.2 Stroom limiet 25](#_Toc72183122)

[3.5.3.3 Afschakel snelheid 25](#_Toc72183123)

[3.5.3.4 Temperatuur 27](#_Toc72183124)

[3.5.4 Evaluative 27](#_Toc72183125)

[3.5.4.1 Spanning instellingen 27](#_Toc72183126)

[3.5.4.2 Stroom limieten 28](#_Toc72183127)

[3.5.4.3 Extra instellingen 28](#_Toc72183128)

[3.5.4.4 Problemen die ik heb ondervonden tijdens het testen 28](#_Toc72183129)

[3.6 Prototype V0.2 28](#_Toc72183130)

[3.6.1 Schema 28](#_Toc72183131)

[3.6.1.1 Analoog 28](#_Toc72183132)

[3.6.1.2 Digitaal 30](#_Toc72183133)

[3.6.1.3 Assembly 32](#_Toc72183134)

[3.6.2 Front panel 32](#_Toc72183135)

[3.6.3 Aanpassingen tegenover eerste prototype 32](#_Toc72183136)

[besluit…. 33](#_Toc72183137)

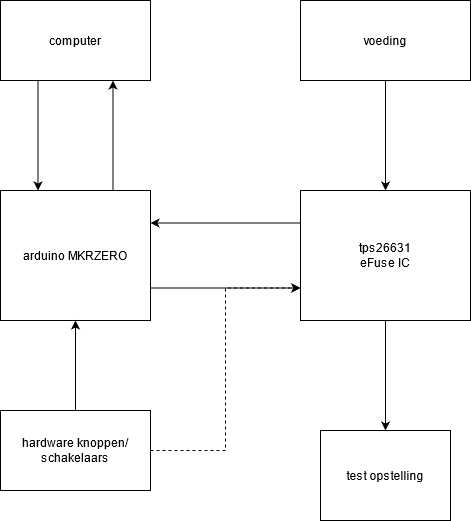
[lijst van figuren 34](#_Toc72183138)

[Literatuurlijst 35](#_Toc72183139)

Inleiding

Het doel van dit project is om een extra veiligheid te maken voor de dure elektronica dat wordt gebruikt bij Antwerp Space. Bij Antwerp Space wordt er gewerkt met space grade elektronica. Deze onderdelen kost veel meer dan onderdelen dat worden gebruikt in consumentenelektronica. De voedingen die worden gebruikt voor deze elektronica zijn Latching Current Limiters (LCL). Deze worden ingedeeld in LCL-klasse en rond deze LCL-klasse moet ik mijn beveiliging maken. Om het risico op fouten zoals een foute bron instelling of het omgekeerd polariseren van een bron te verminderen is er beslist om een eFuse ic of iets gelijkaardig te gebruiken. Er waren al twee development bordjes van een eFuse ic bij Antwerp Space. Dat was alles dat ze hadden om van te beginnen. Vandaar kan ik verder onderzoek doen naar een goede oplossing.

# blokschema



Figuur 1 - blokschema

# Software

## Doel

Het doel van de software is om de eFuse te kunnen aansturen over usb en (optioneel) met een lokale interface. Voor dit project was er voor de software nog niets. Ze hebben mij gevraagd om te beslissen welke IDE we gingen gebruiken. Se enige voorwaarde is dat het compatibel moest zijn met arduino of de controllers die worden gebruikt door arduino.

## IDE’s

Bruikbare IDE’s voor arduino bordjes:

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
|  | Microchip MPLAB | PlatformIO | Arduino | IAR Embedded Workbench |
| Prijs | Gratis | Gratis | Gratis | Niet vermeld je moet een quote vragen |
| Editor | custom | VSCode, … | Custom(arduino ide 2 is bijna identiek aan VSCode) | Custom of Eclipse |
| Debugging | Ja | Ja | Alleen in V2 momenteel in beta | Ja |
| Unit Testing | Mogelijk maar niet veel documentie. | Ingeboud. Goede documentatie. | Mogelijk met extra software vooral voor arduino bordjes | Extern |
| Code Coverage | Ja | Extern | Extern | Extern |
| Open source | Nee | Ja | Ja | Nee |
| Extras | MPLAB Code Configurator(GUI controller configurator tool), microchip HAL library. | Support voor arduino en veel andere platforms en libraries. | Arduino libraries. | Functional safetey certificcation, … |

Mijn keuze hier is PlatformIO. Deze heeft de meeste functionaliteit en is gratis.

## User interface

### Modbus over virtual com port

Voor communicatie met een computer is er gekozen voor Modbus RTU. Dit is een gestandaardiseerd protocol. Hierdoor kan ik gemakkelijk data van de eFuse binnen nemen en data sturen naar de eFuse.

#### Coils

Eerste prototype:

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Adres | Coil name | Function |
| 1 | ON/OFF | De efuse aan en uit zetten. |
| 2 | LCL-class 1 | Maximumstroom 1.4A spanning van 22V tot 38V |
| 3 | LCL-class 2 | Maximumstroom 2.8A spanning van 22V tot 38V |
| 4 | LCL-class 3 | Maximumstroom 4.2A spanning van 22V tot 38V |
| 5 | 12V | Maximum spanning 12V (optioneel niet in het finale ontwerp) |
| 6 | 5V | Maximum spanning 5V (optioneel niet in het finale ontwerp) |
| 7 | Arduino led | Led van de arduino (voor het testen van modbus) |

PrototypeV0.2:

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Adres | Coil name | Function |
| 1 | ON/OFF eFuse 1 | De eerste eFuse aan en uit zetten. |
| 2 | LCL-class 1 eFuse 1 | Maximumstroom 1.4A spanning van 22V tot 38V voor eerste eFuse |
| 3 | LCL-class 2 eFuse 1 | Maximumstroom 2.8A spanning van 22V tot 38V |
| 4 | LCL-class 3 eFuse 1 | Maximumstroom 4.2A spanning van 22V tot 38V |
| 5 | ON/OFF eFuse 2 | De 2de eFuse aan en uit zetten. |
| 6 | LCL-class 1 eFuse 2 | Maximumstroom 1.4A spanning van 22V tot 38V voor 2de eFuse |
| 7 | LCL-class 2 eFuse 2 | Maximumstroom 2.8A spanning van 22V tot 38V voor 2de eFuse |
| 8 | LCL-class 3 eFuse 2 | Maximumstroom 4.2A spanning van 22V tot 38V voor 2de eFuse |
| 9 | ON/OFF eFuse 3 | De 3de eFuse aan en uit zetten. |
| 10 | LCL-class 1 eFuse 3 | Maximumstroom 1.4A spanning van 22V tot 38V voor 3de eFuse |
| 11 | LCL-class 2 eFuse 3 | Maximumstroom 2.8A spanning van 22V tot 38V voor 3de eFuse |
| 12 | LCL-class 3 eFuse 3 | Maximumstroom 4.2A spanning van 22V tot 38V voor 3de eFuse |
| 13 | ON/OFF eFuse 4 | De 4de eFuse aan en uit zetten. |
| 14 | LCL-class 1 eFuse 4 | Maximumstroom 1.4A spanning van 22V tot 38V voor 4de eFuse |
| 15 | LCL-class 2 eFuse 4 | Maximumstroom 2.8A spanning van 22V tot 38V voor 4de eFuse |
| 16 | LCL-class 3 eFuse 4 | Maximumstroom 4.2A spanning van 22V tot 38V voor 4de eFuse |

Als een LCL-class coil op 1 wordt gezet worden de andere op 0 gezet. Als je een instelling op 0 zet gebeurt er niets. Als alle instellingen op 0 worden gezet gaat de software in een fout modus.

#### Inputs

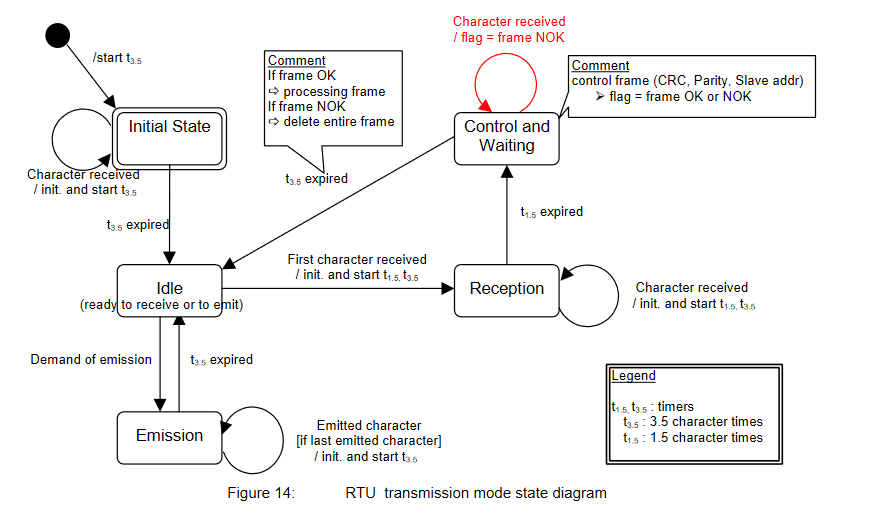
Eerste prototype:

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Adres | Input name | Function |
| 1 | Hardware Fout | Er is een fout opgetreden (overvolt, undervolt of overcurrent) |
| 2 | Software Fout | Er is geprobeerd een foute configuratie naar de eFuse te schrijven. |
| 3 | Pgood | Is de Vout van de eFuse > dan 22V (niet gebruikt in finale product kan misleidend zijn. Zie hardware) |

PrototypeV0.2:

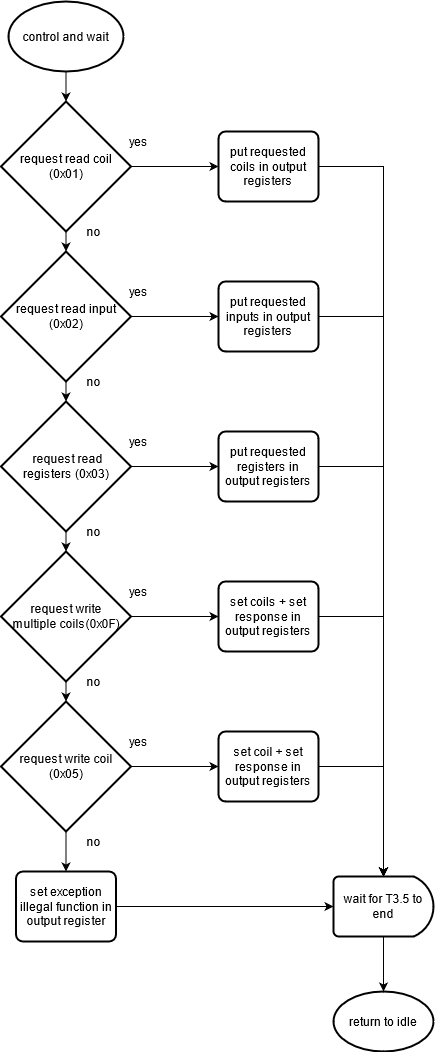
|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Adres | Input name | Function |
| 1 | ON/OFF eFuse 1 | Is de eerste eFuse aan. |
| 2 | Hardware Fout eFuse 1 | Er is een fout opgetreden (overvolt, undervolt of overcurrent) eerste eFuse |
| 3 | Software Fout eFuse 1 | Er is geprobeerd een foute configuratie naar de eFuse te schrijven. Eerste eFuse |
| 1 | ON/OFF eFuse2 | Is de 2de eFuse aan. |
| 2 | Hardware Fout eFuse 2 | Er is een fout opgetreden (overvolt, undervolt of overcurrent) 2de eFuse |
| 3 | Software Fout eFuse 2 | Er is geprobeerd een foute configuratie naar de eFuse te schrijven. 2de eFuse |
| 1 | ON/OFF eFuse 3 | Is de 3de eFuse aan. |
| 2 | Hardware Fout eFuse 3 | Er is een fout opgetreden (overvolt, undervolt of overcurrent) 3de eFuse |
| 3 | Software Fout eFuse 3 | Er is geprobeerd een foute configuratie naar de eFuse te schrijven. 3de eFuse |
| 1 | ON/OFF eFuse 4 | Is de 4de eFuse aan. |
| 2 | Hardware Fout eFuse 4 | Er is een fout opgetreden (overvolt, undervolt of overcurrent) 4de eFuse |
| 3 | Software Fout eFuse4 | Er is geprobeerd een foute configuratie naar de eFuse te schrijven. 4de eFuse |

#### Finite state machine modbus



Figuur 2 - modbus fsm

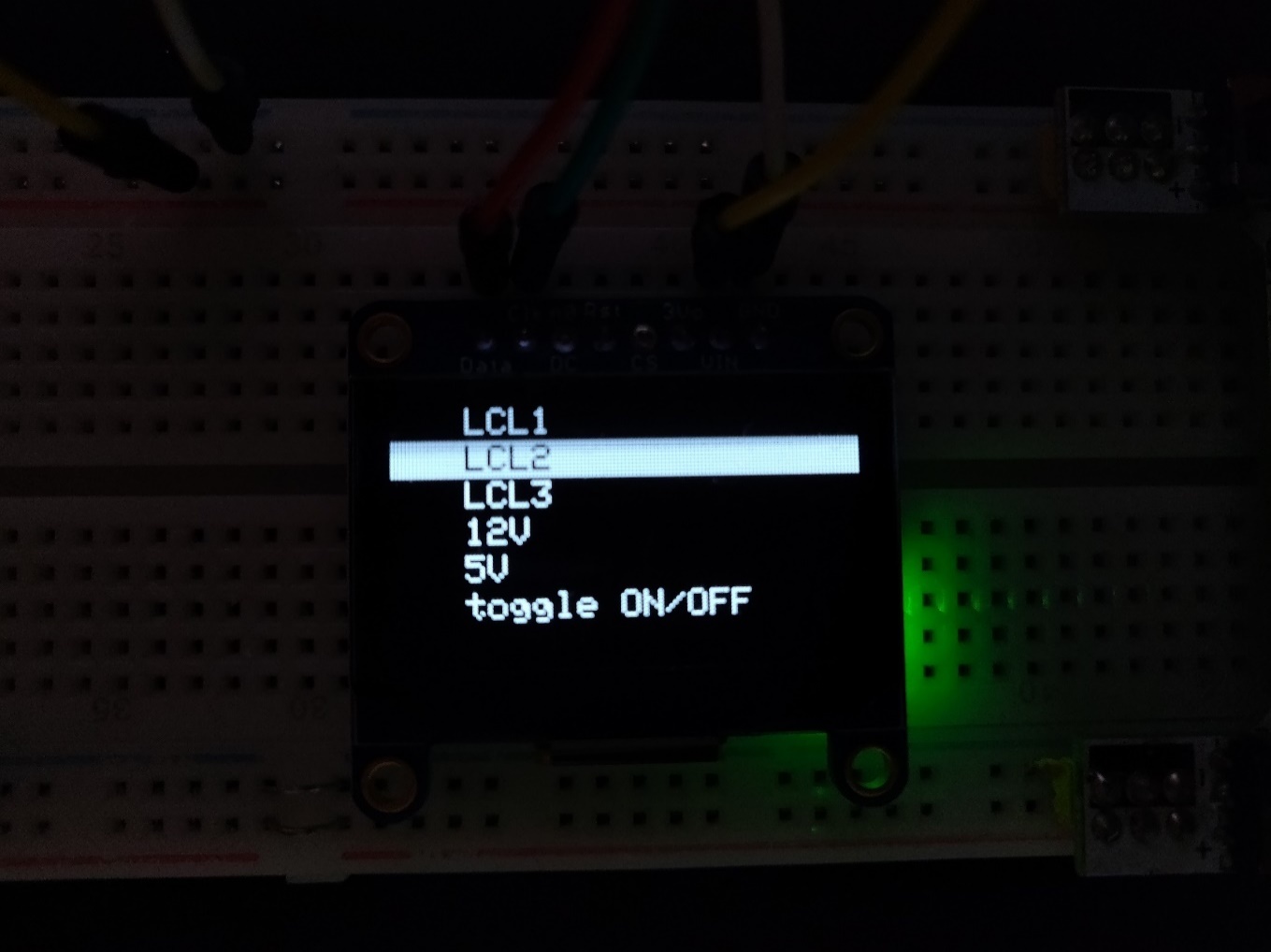
#### Control and wait flowchart



Figuur 3 - control and wait flowchart

### Front panel

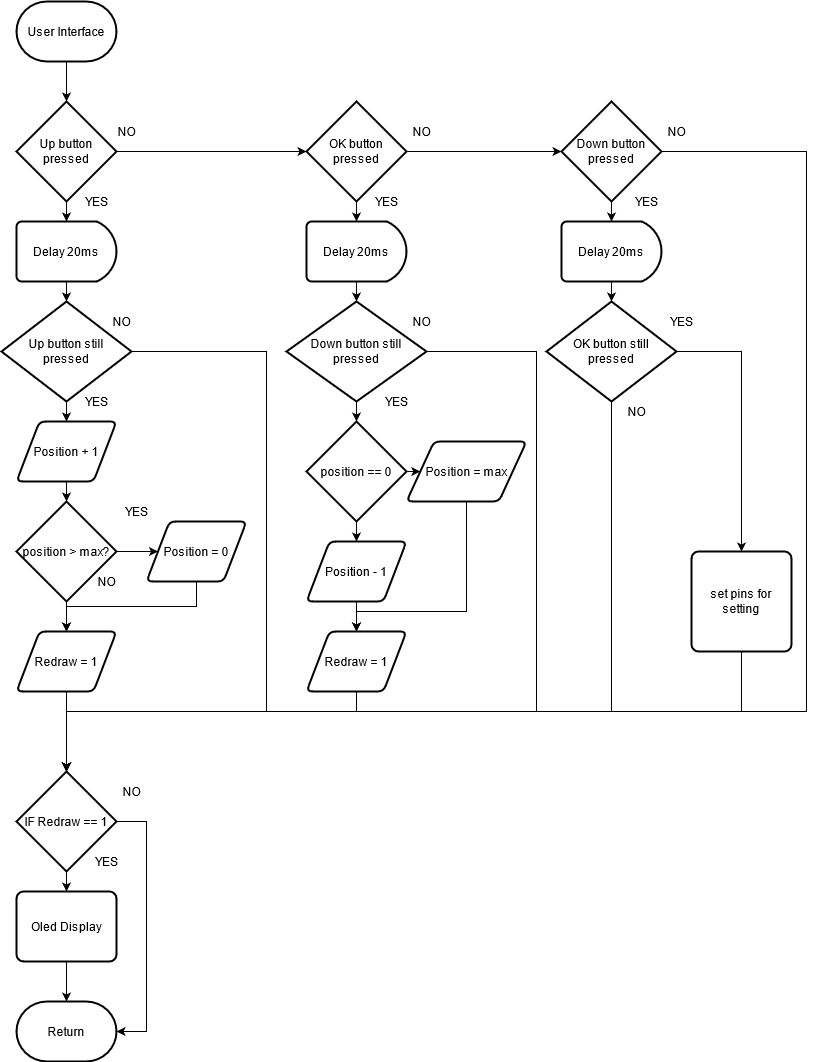
Op de oled display kan je de eFuse instellen.



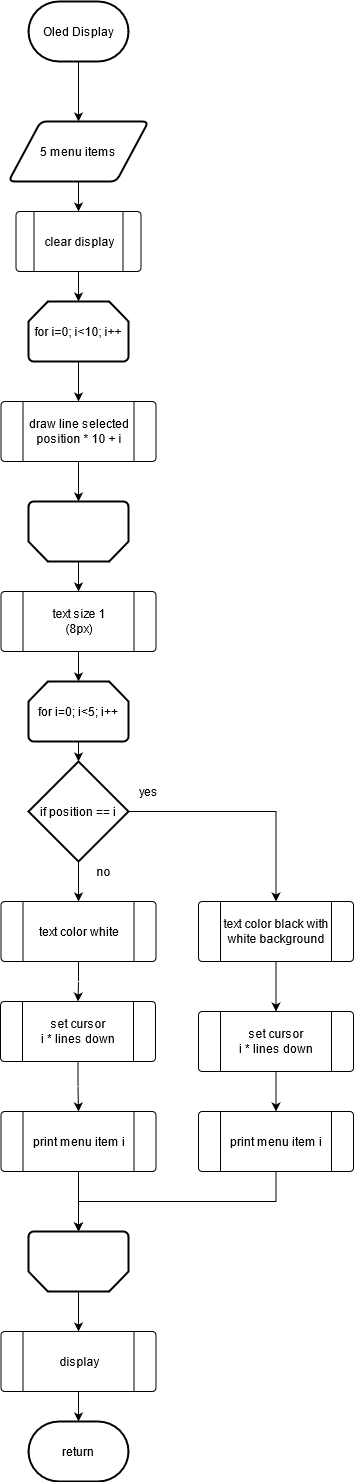
Figuur 4 - Oled UI

Een kleine joystick kan gebruikt worden om een instelling te selecteren.

#### Local user interface flowchart



Figuur 5 - Local user interface flowchart



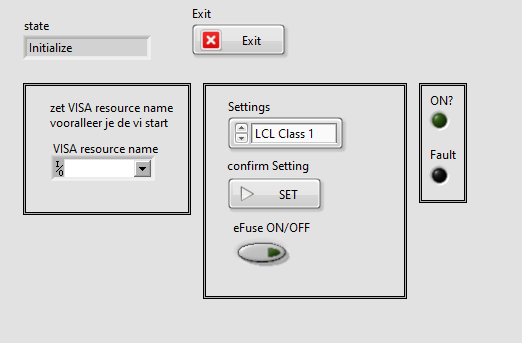
Figuur 6 - Local user interface flowchart

### LabVIEW

In LabVIEW kan je zien of er een fout is opgetreden, de eFuse aan en uit zetten en de configuratie selecteren.

#### Instellen

Om de juiste instelling te doen moet je eerst de juiste com port selecteren. Dan kan je de LCL-klas selecteren en op set klikken om de instelling te bevestigen. En dan kan je de eFuse in schakelen.



Figuur 7 - LabVIEW UI

# Hardware

## Component keuze

### eFuse

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| eFuse | ST stef01 | TI tps2660x | TI tps2663x |
| Voltage range | 8 to 48V | 4.2 to 60V | 4.5 to 60V |
| Continuous current | 4A | 2.23A | 6A |
| Max current | 6A | N/A | N/A |
| Parallel theoretisch mogelijk | Ja | Ja | Ja |
| Prijs | 2euro | = | 3euro |
| Reverse polarity protection | Externe fet | Intern | Externe fet |
| Piek stroom | N/A | 3x limiet gemeten | 2x limiet gedefinieerd in de datasheet |

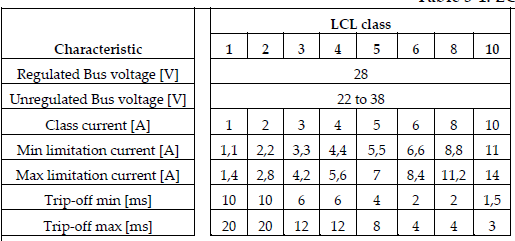
De tps2660 ic is het meest kost effectief. Zou genoeg zijn voor een class 1 of 2 voeding maar heeft geen overhead. Bij LCL-klasse 2 zit je aan de minimumstroom limiet.

De STEF01 is goedkoop voor wat hij aan kan maar door mijn slechte ervaring met het evaluatie bord en de enkele bi directionele fout pin is het moeilijk om deze aan te raden. Kan LCL-klasse 3 maar de 5V instelling of lager gaat niet.

De tps2663 is duurder maar heeft hogere limieten dan de andere. Deze ic kan het meesten inclusief klasse 3 en 5V.

Een 3.3V instelling is niet belangrijk dus deze komt er niet bij.

De gekozen ic is de TPS26631 deze laat hogere piek stromen toe en is geschikt voor de toepassing.



### ESD en overspanning beveiliging

#### Ingang

Op de ingang gebruik ik een bi-directionele TVS-diode. Deze zijn meer gebruikt bij lage spanningen. Er is geen extra fuse nodig omdat deze “open” breken, kan een voordeel zijn. Ze gaan ook langer mee.

#### Uitgang

Op de uitgang heb ik een schottky diode voor ESD protection.

## eFuse TPS26631



Figuur 8 - eFuse TPS26631 simplified

### Spanning limiet instellingen



In specs: V(OVPR)= 1.2 V and V(UVLOR)= 1.2 V

#### LCL-classes

LCL-classes definiëren een spanning tussen 22 en 38V.

Bestaande enkele weerstanden E24: 1M+75K,27K,36K

Bestaande enkele weerstanden alternatief 1 E24: 1M+75K,24K,36K

Bestaande enkele weerstanden alternatief 2

E24: 1M,24K,33K

Bestaande enkele weerstanden alternatief 3 E12: 1M,22K,33K

Bestaande enkele weerstanden alternatief 3 E12: 910k+75k,24K,33K

Bestaande enkele weerstanden alternatief finall recommended E24: 910k+75k,24K,51K//91k=32683

#### Extra instelpunten

12V:

Bestaande enkele weerstanden E24 985k//430k,24k,51K//91k:

5V:

Bestaande enkele weerstanden E24 985k//430k,24k,91k:

### Stroom limiet instellingen



#### Class1

Bestaande weerstand -> 13k

#### Class 2

Bestaande weerstand -> 6.8k

#### Class 3

Bestaande weerstand -> 4.3k

### Power Good



## Optocoupler voorschakel weerstand

#### eFuse kant

Led 1.3V @ 5mA

Bestaande weerstand: 4.3kΩ

38/0.06 = 633.33ohm current limit analog opto coupler

#### Digitale kant

Led 1.3V @ 5mA

Bestaande weerstand: 390Ω

## Stroom berekeningen

Max vermogen usb 5V: 2.5W

Max stroom uit 3.3V regulator van de arduino: max 800 mA

2.5W @ 3.3V = 757.5mA

Stroomverbruik controller: 150mA max

Stroomverbruik relais: 4 x 73.3mA = 293.2mA

Stroomverbruik leds 10mA

Optocouplers max: 2x 10mA

Stroom oled display: max 1mA

293.2+150+20+10-1=474.2mA

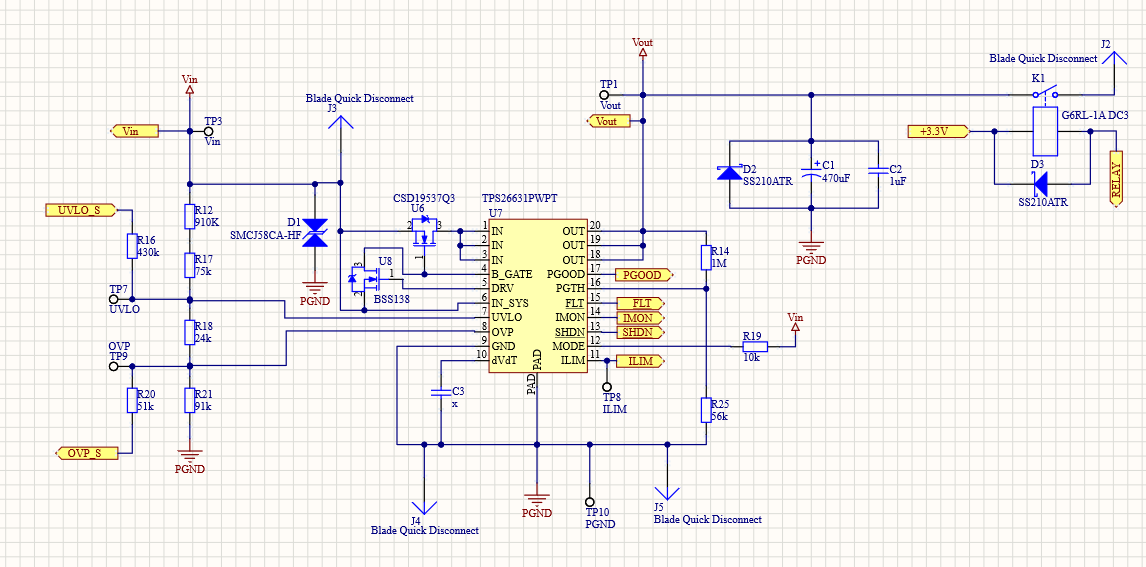
757.5mA – 474.2mA = 283.3mA overhead

## Prototype

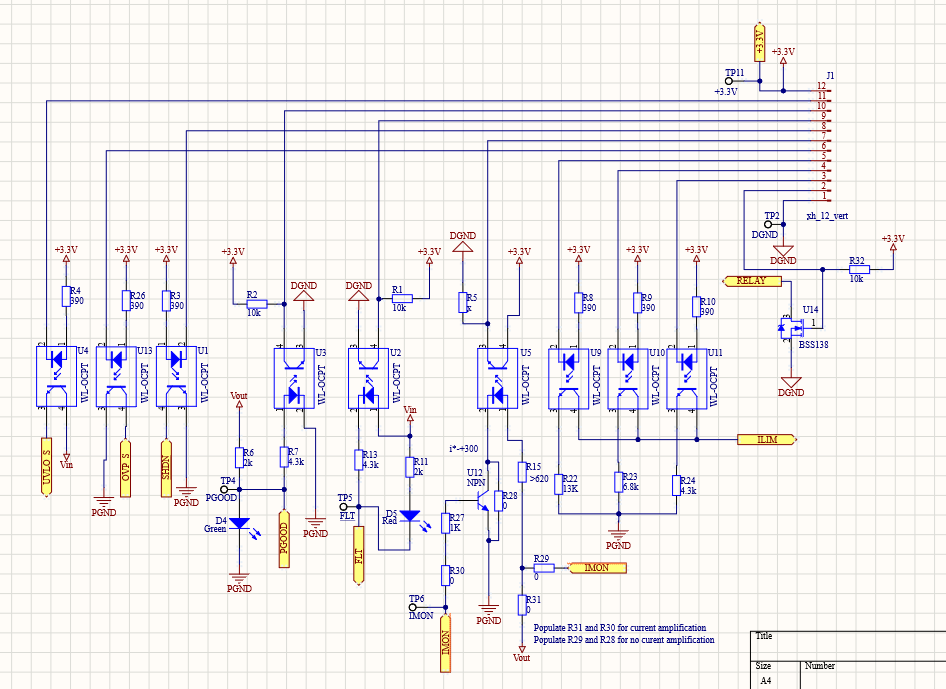
Een prototype is gemaakt met alle minimum functionaliteit en een paar extra’s.

* LCL-klasse 1,2 en 3.
* Output relay.
* Spanning instelling voor 5V,12V(optioneel) en 22V tot 38V.
* Aanstuur baar met headers

### Schema’s



Figuur 9 - eFuse analog schema



Figuur 10 - eFuse digitaal schema

Pinout header

1. GND
2. Relay
3. Ilim 4.2A
4. Ilim 2.8A
5. Ilim 1.4A
6. Ovp\_s pull down voor 12V of 22V tot 38V
7. Imon niet gebruikt
8. SHDN pull down voor shutdown
9. Fault output
10. Pgood output
11. Uvp\_s pull down voor 12V of 5V
12. 3.3V

### PCB

A screenshot of a computer

Description automatically generated with medium confidenceA screenshot of a computer

Description automatically generated with low confidence

Figuur 11 - eFuse PCB

### Tests

#### Spanning punten

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Instelling | Overvolt protection | Undervolt protection |
| LCL-Klasse | 37.78V | 20.43V |
| 12V | 14.46V | 10.71V |
| 5V | 5.45V | 4.2V (geen fout word gegeven maar de eFuse schakelt uit) |

#### Stroom limiet

|  |  |
| --- | --- |
| Instelling | Stroom limiet |
| LCL-Klasse 1 | ±1.35A |
| LCL-Klasse 2 | ±2.5A |
| LCL-Klasse 3 | ±3.9A |

#### Afschakel snelheid

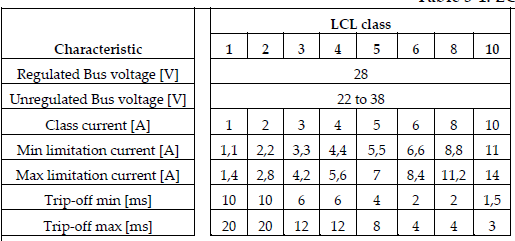
|  |  |
| --- | --- |
| Instelling | Tijd |
| LCL-klasse | 770µs met microcontroller relais uitschakelen no load    Figuur 12 – afschakelsnelheid no load relai  8.8ms met max stroom. Als er een lichte load aan hangt wordt deze tijd uit gerekt. Deze meeting is gedaan met een 100µF condensator en een weerstand van 26Ohm    Figuur 13 - afschakelsnelheid met load geen relai  4ms Met het relais uitschakelen 26Ohm    Figuur 14 - afschakelsnelheid met load en relai |
| 12V | 4.5ms met load en relais |
| 5V | 4.7ms met load en relais  Figuur 15 - afschakelsnelheid met load en relai 5V |

#### Temperatuur

De casetemperatuur van de mosfet en efuse na 15min aan max vermogen is niet boven 60°C gegaan. Er was de vraag of er 1 model mosfet kan gebruikt worden. Na deze meeting is het niet aangeraden om 1 soort mosget te gebruiken. de mosfet gekozen voor het hogere vermogen kost 10x meer dan de kleinere mosfet gebruikt voor de relais en gate driver mosfet.

### Evaluative

Tabel met de waarden die ik wil bekomen:



Figuur 16 - LCL-Klasse

#### Spanning instellingen

Het doel was van 22 tot 38. De gemeten waarden van mijn prototype zijn van 20,4 tot 37,8. Het overvolt punt mocht iets hoger liggen maar voor een eerste prototype is dit zeker geen slecht begin.

#### Stroom limieten

De stroom limieten zijn goed alleen de LCL-klasse 1 is aan de hoge kant maar dat is geen probleem.

#### Extra instellingen

Deze zijn niet verplicht maar werken goed.

#### Problemen die ik heb ondervonden tijdens het testen

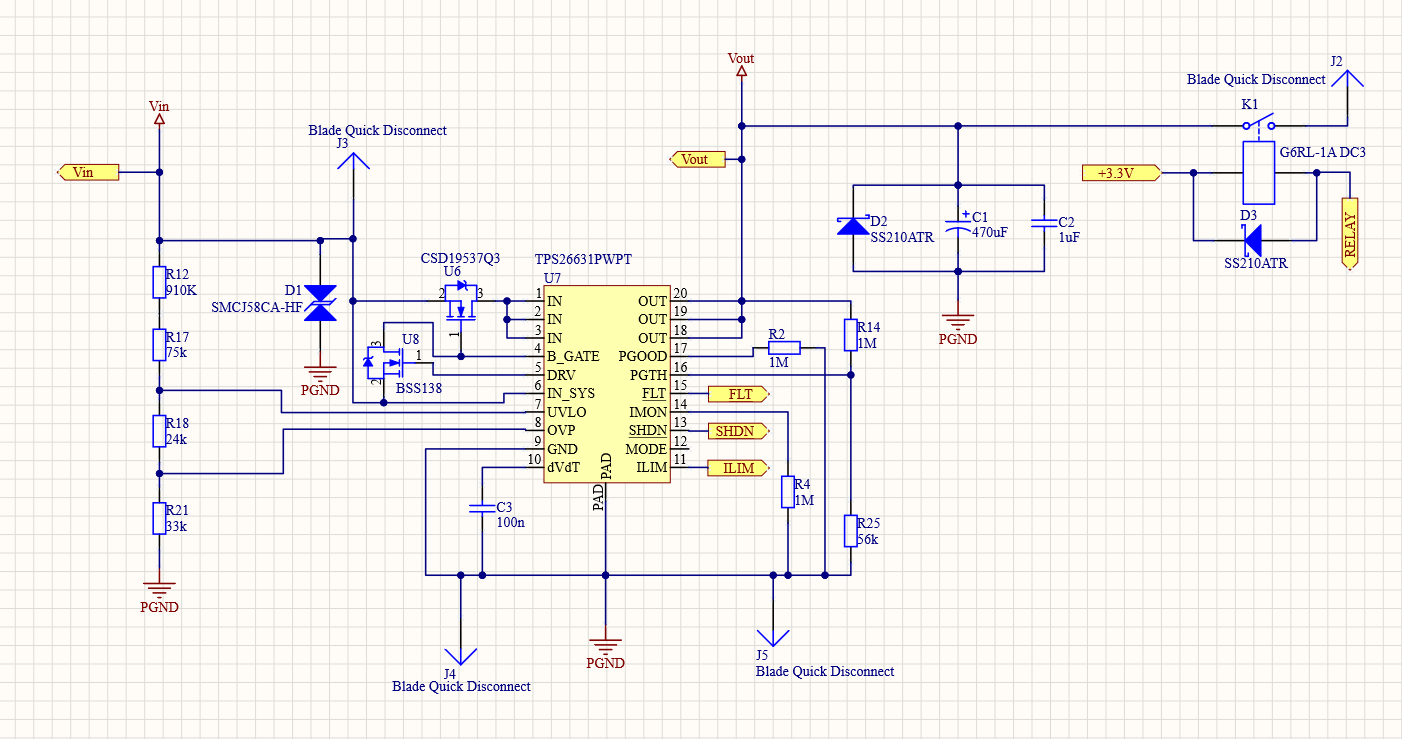
* Als de voeding wordt ingeschakeld wanneer de eFuse aan staat krijg je een fout tijdens de soft start van de labo voeding.
* Alleen het relais uitschakelen bij een fout is niet goed. De eFuse ic moet ook ge reset worden bij sommige fouten dus is het best om dit bij elke fout te doen.
* Door het snel in- en uitschakelen tijdens het testen kan inrush current een fout geven. Als je de eFuse niet te snel (< 2s) terug in probeert te schakelen zou dit geen probleem mogen creëren.

## Prototype V0.2

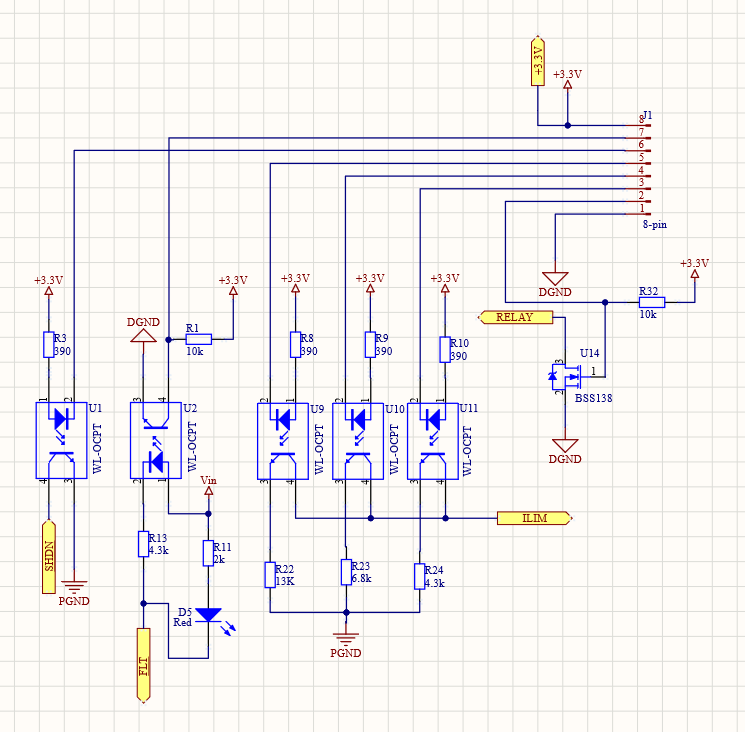
Dit zou een finaal product kunnen zijn als er geen fouten in zitten.

### Schema

#### Analoog



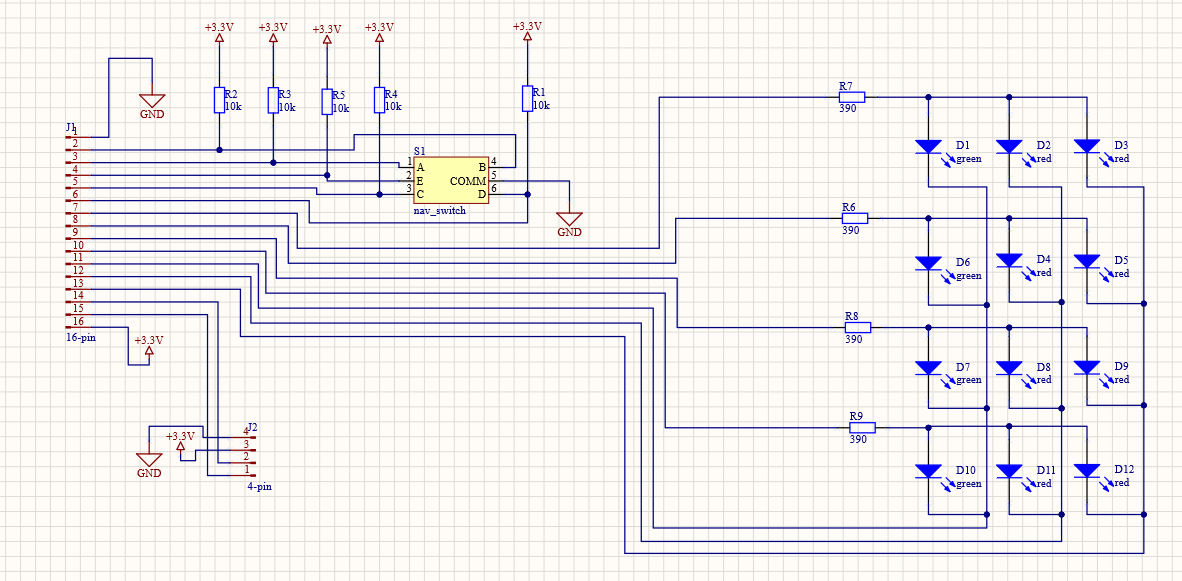
Figuur 17 - eFuse analoog schema V0.2



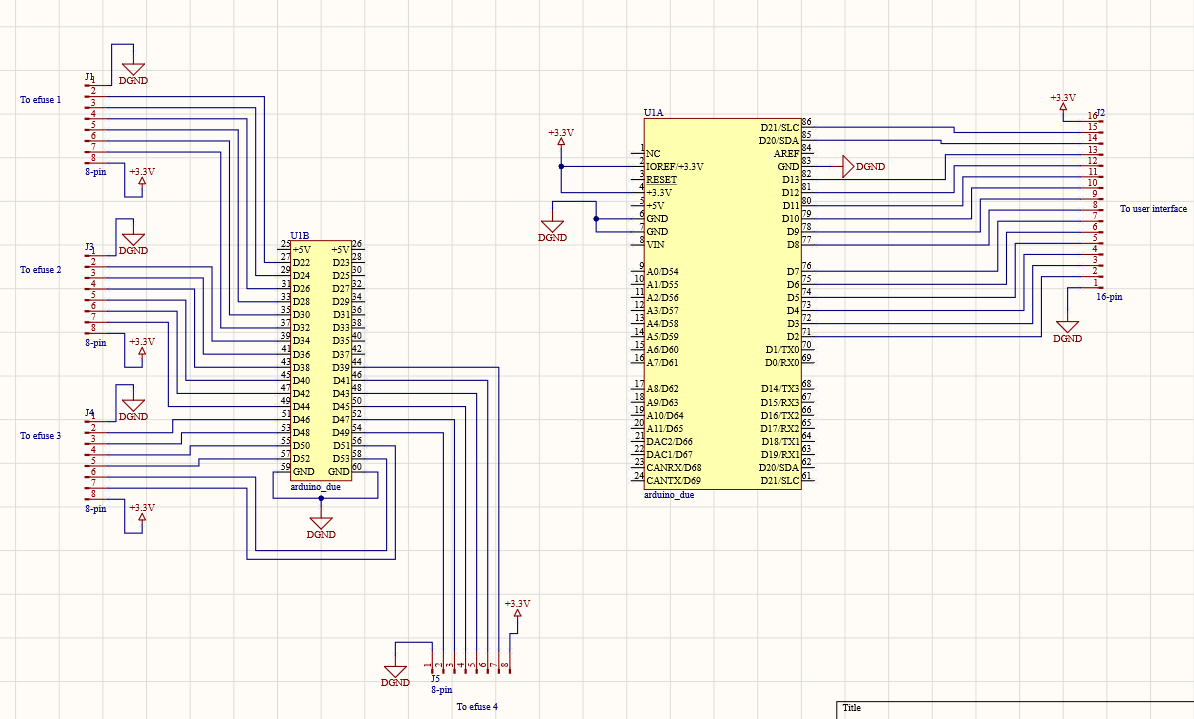
Figuur 18 - eFuse digitaal schema V0.2

#### Digitaal

Front panel ui

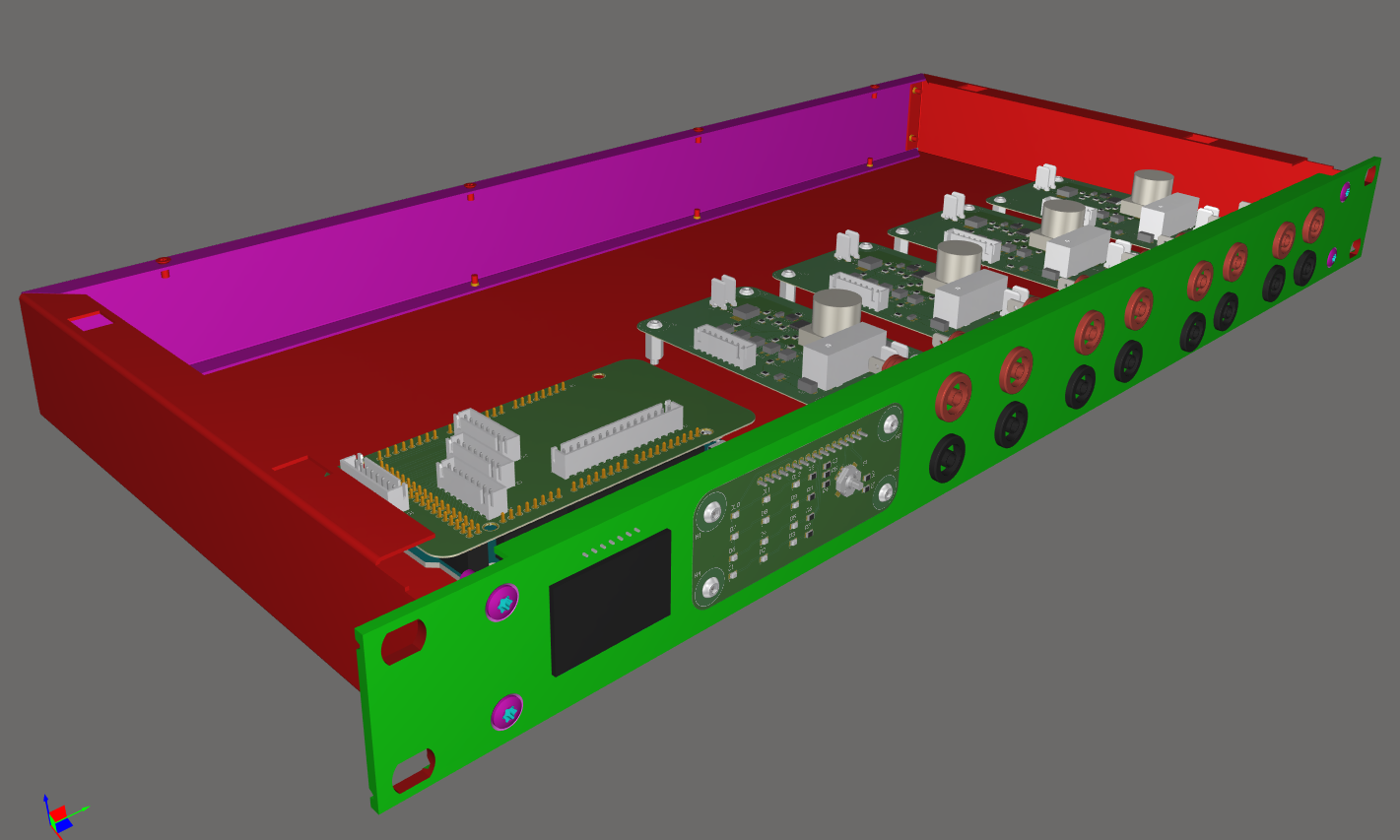


Figuur 19 - front panel schema

Controller interface pcb voor 4 fuses in een behuizing.

Figuur 20 - controller bord schema

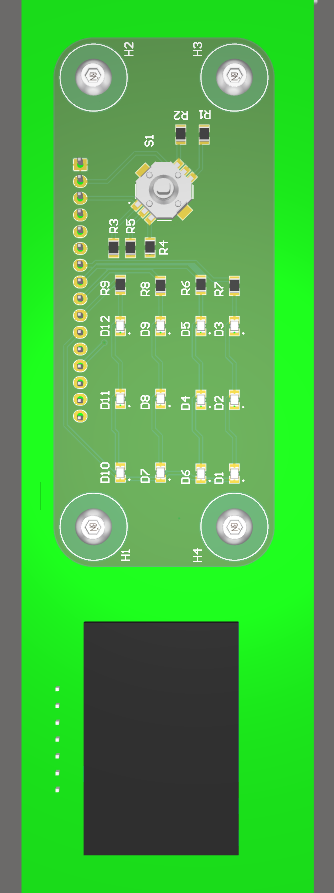
Assembly



Figuur 21 – Assembly

Een 19 inch 1U rack wordt gebruikt als behuizing waarin 4eFusen kunnen geplaatst worden.

### Front panel



Figuur 22 - front pannel UI

Op de voorkant van de behuizing is een oled dislpay en een joystick. Hiermee kan je de eFuse instellen. Er zijn ook 12 indicatie leds die weergeven of de individuele eFusen aan zijn of een fout detecteren.

### Aanpassingen tegenover eerste prototype

* Pgood verwijdert.
* Extra spanning instellingen verwijdert.
* Stroommeting verwijdert. (Werkte niet)
* PCB’s voor het digitale deel.

besluit….

Typ hier je besluit

lijst van figuren

[Figuur 1 - blokschema 7](#_Toc72184532)

[Figuur 2 - modbus fsm 10](#_Toc72184533)

[Figuur 3 - control and wait flowchart 11](#_Toc72184534)

[Figuur 4 - Oled UI 12](#_Toc72184535)

[Figuur 5 - Local user interface flowchart 13](#_Toc72184536)

[Figuur 6 - Local user interface flowchart 14](#_Toc72184537)

[Figuur 7 - LabVIEW UI 15](#_Toc72184538)

[Figuur 8 - eFuse TPS26631 simplified 17](#_Toc72184539)

[Figuur 9 - eFuse analog schema 22](#_Toc72184540)

[Figuur 10 - eFuse digitaal schema 22](#_Toc72184541)

[Figuur 11 - eFuse PCB 24](#_Toc72184542)

[Figuur 12 – afschakelsnelheid no load relai 25](#_Toc72184543)

[Figuur 13 - afschakelsnelheid met load geen relai 26](#_Toc72184544)

[Figuur 14 - afschakelsnelheid met load en relai 26](#_Toc72184545)

[Figuur 15 - afschakelsnelheid met load en relai 5V 27](#_Toc72184546)

[Figuur 16 - LCL-Klasse 27](#_Toc72184547)

[Figuur 17 - eFuse analoog schema V0.2 29](#_Toc72184548)

[Figuur 18 - eFuse digitaal schema V0.2 29](#_Toc72184549)

[Figuur 19 - front panel schema 30](#_Toc72184550)

[Figuur 20 - controller bord schema 31](#_Toc72184551)

[Figuur 21 – Assembly 32](#_Toc72184552)

[Figuur 22 - front pannel UI 32](#_Toc72184553)

Literatuurlijst

eFuse-LCL1-3