



Instituut voor Engineering en Applied Science  
Opleiding Elektrotechniek

### Afstudeerverslag Stedin

Testopstelling Smart Device

*Bachelor thesis*

**Younes Boulmani**

Rotterdam, 8 november 2024

Docentbegeleider:  
Bedrijfsbegeleider:

De heer Fogarty  
Mark Burghout en Koen Peelen

## Samenvatting

Stedin, een netbeheerder, werkt aan het DA3-project (Distributie Automatisering project) om de kwaliteit van het stroomnet in meer dan 22.000 middenspanningstations beter te monitoren. Dit project helpt het toenemende probleem van netcongestie, veroorzaakt door de elektrificatie van huishoudens en bedrijven, effectiever aan te pakken. Voor dit project worden DA3-C en DA3-D boxen ingezet, ook wel "Smart Devices" genoemd, die met behulp van Rogowski-spoelen de afgaande elektrische velden in een middenspanningstation meten. Voordat deze Smart Devices in een station worden geïnstalleerd, worden ze getest in het lab met behulp van een Omicron-apparaat, dat verschillende testscenario's van een middenspanningstation simuleert. De huidige Omicron is echter duur (80-90 duizend euro), complex in gebruik, en beperkt doordat het slechts één van de 32 poorten van het Smart Device tegelijkertijd kan testen. Bovendien is het apparaat vaak niet beschikbaar, omdat het gehuurd wordt van andere afdelingen, wat de voortgang van het DA3-project vertraagt.

Het doel van dit project is het ontwikkelen van een eenvoudigere, snellere en kosten effectievere testsysteem dat meerdere poorten tegelijk kan testen door Rogowski-spoelsignalen te simuleren, waarmee de Omicron kan worden vervangen. De afstudeerde startte met een theoretisch en praktisch onderzoek naar de mogelijkheden voor het simuleren van het Rogowski-spoelsignaal. Uit het onderzoek is gebleken dat het gebruik van een DAC-chip de meest geschikte methode is voor het simuleren van het Rogowski-spoelsignaal, gebaseerd op de vereisten en de klantwensen van Stedin.

Met behulp van de Yourdon-analyse en op basis van de klantwensen zijn functionele en niet-functionele eisen opgesteld. Op basis hiervan werd een architectuur en detailontwerp gemaakt, wat leidde tot de ontwikkeling van een PCB met alle benodigde deelsystemen. Elk deelsysteem werd eerst afzonderlijk getest in unit-tests. Uit deze tests bleek dat de oorspronkelijke DAC-chip niet naar wens functioneerde, waardoor de afstudeerde belangrijke functionele eisen voor het testsysteem niet binnen de deadline kon behalen en een herkansingstraject moest volgen.

In het herkansingstraject heeft de afstudeerde, volgens de V-model projectmethodiek, het detailontwerp aangepast met een nieuwe DAC-chip en een nieuwe PCB ontwikkeld. Na het uitvoeren van de unit-tests werden ditmaal alle essentiële tests succesvol behaald, waarna de integratie van alle deelsystemen werd getest. Vervolgens zijn acceptatietesten uitgevoerd om te verifiëren dat het testsysteem aan alle gestelde eisen voldoet.

Uit de resultaten van de acceptatietesten blijkt dat aan alle belangrijke functionele en niet-functionele eisen is voldaan. Het testsysteem heeft een gebruiksvriendelijke interface en kan diverse belangrijke testscenario's simuleren binnen de maximaal toegestane afwijkingen. Bovendien is het in staat om meerdere poorten van het Smart Device gelijktijdig te testen. Hiermee kan het systeem de Omicron vervangen, waardoor deze niet langer nodig is voor het testen van de Smart Devices.

Dankzij deze succesvolle resultaten zal het Smart Device-team binnen Stedin binnenkort overschakelen naar het nieuwe testsysteem, dat voortaan zal worden ingezet voor het testen van Smart Devices en hun hardware-revisies.

## Summary

Stedin, a grid operator, is working on the DA3 project (Distribution Automation Project) to better monitor the quality of the power grid across more than 22,000 medium-voltage substations. This project is helping to more effectively address the growing problem of grid congestion caused by the electrification of households and businesses. This project deploys DA3-C and DA3-D boxes, also known as "Smart Devices," which use Rogowski coils to measure the outgoing electric fields in a medium-voltage substation. Before these Smart Devices are installed in a substation, they are tested in the lab using an Omicron device, which simulates various test scenarios of a medium-voltage substation. However, the current Omicron is expensive (80-90 thousand euros), complex to use, and limited in that it can only test one of the Smart Device's 32 ports at a time. Moreover, the device is often unavailable because it is borrowed from other departments, which slows down the progress of the DA3 project.

The aim of this project is to develop a simpler, faster, and more cost-effective testing system capable of testing multiple ports simultaneously by simulating Rogowski coil signals, thus replacing the Omicron. The intern began with a theoretical and practical investigation into the possibilities for simulating the Rogowski signal. The study found that using a DAC chip was the most suitable method for simulating the Rogowski coil signal, based on the requirements and customer needs of Stedin.

Subsequently, using Yourdon analysis and based on client requirements, several functional and non-functional requirements were defined. An architecture and detailed design were created based on these requirements. This detailed design led to the development of a PCB that contains all necessary subsystems. Each subsystem was first tested separately in unit tests. These tests showed that the original DAC chip did not function as desired, preventing the intern from meeting critical functional requirements for the testing system within the deadline and necessitating a resit phase.

In the resit phase, the intern, following the V-model project methodology, revised the detailed design with a new DAC chip and developed a new PCB. After running unit tests, all essential tests were successfully achieved, followed by integration testing of all subsystems. Subsequently, acceptance tests were performed to verify that the testing system met all specified requirements.

The results of the acceptance tests indicate that all major functional and non-functional requirements have been met. The testing system has a user-friendly interface and can simulate various essential test scenarios within allowed tolerances. Additionally, it can test multiple ports of the Smart Device simultaneously. This allows the system to replace the Omicron, making it no longer necessary for testing the Smart Devices.

Thanks to these successful results, the Smart Device team within Stedin will soon transition to the new testing system, which will now be used for testing Smart Devices and their hardware revisions.

## Inhoudsopgave

Samenvatting.....	2
Summary .....	3
Inhoudsopgave.....	4
Afkortingen .....	8
Begrippenlijst .....	8
Inleiding.....	9
Probleemstelling.....	9
Doelstelling.....	9
Schema.....	10
Huidige situatie/probleemstelling .....	10
Doelstelling.....	10
Optioneel.....	11
Achtergronden .....	12
Belang.....	12
Projectmethodiek.....	12
Doelgroepen en suggesties voor het lezen .....	12
Onderzoeksfase .....	13
1.1 Onderzoeksplan.....	13
1.1.1 Onderzoeks vragen .....	13
1.1.2 Afbakening .....	13
1.1.3 Methode .....	14
1.2 Samenvatting .....	15
Definitiefase.....	16
2 Definiëren van de eisen .....	16
2.1 Systeemcontext .....	16
2.2 Procesbeschrijving .....	17
2.3 Systeemfuncties.....	18
2.3.1 Beheer testsysteem .....	18
2.3.2 Bepaal het gesimuleerde signaal .....	18
2.3.3 Simuleer signaal.....	19
2.3.4 Weergeef status systeem .....	20
2.3.5 Toon actieve testscenario .....	20
2.3.6 Genereer testrapport.....	21
2.4 Niet functionele eisen.....	21
3 Acceptatietest.....	22

3.1	Testomgeving.....	22
3.2	Hardware.....	22
3.3	Firmware .....	22
3.4	Testcase .....	22
<b>Architectuurfase</b> .....	24	
<b>4</b>	<b>Architectuurfase (Architecture Phase).....</b>	<b>24</b>
4.1	Architectuur ontwerp .....	24
1.1	Ontwerpbesluiten.....	24
4.2	Deelsystemen .....	25
4.2.1	DAC .....	26
4.2.2	Microcontroller.....	26
4.2.3	Userinterface .....	26
4.2.4	RS485- transceiverchip .....	27
4.2.5	Voeding.....	27
4.3	Interfaces.....	27
4.3.1	Voeding en alle deelsystemen .....	27
4.3.2	Microcontroller en DAC (SPI) .....	28
4.3.3	Microcontroller en Userinterface.....	28
4.3.4	Microcontroller en RS485- tranceiverchip .....	28
4.4	Traceability .....	29
<b>Detailontwerpfase (Detail Design Phase)</b> .....	30	
<b>5</b>	<b>Detailontwerp.....</b>	<b>30</b>
5.1	Herontwerp .....	30
5.2	DAC.....	31
5.2.1	Probleem met de AD1934WBSTZ-RL .....	31
5.2.2	Overstap naar een 16-bits DAC .....	31
5.2.3	Componentkeuze.....	32
5.2.4	Hardware ontwerp.....	32
5.2.5	Output stage .....	32
5.2.6	Duplicatie fase .....	32
5.3	Microcontroller.....	33
5.3.1	Componentkeuze.....	33
5.3.2	USB-interface .....	33
5.3.3	Hardware ontwerp.....	34
5.3.4	Schakeling microcontroller .....	34
5.4	Voeding.....	35

5.4.1	3.3Volt en -3.3Volt .....	35
5.4.2	LDO .....	38
5.4.3	Connector .....	38
5.5	RS485- tranceiverchip.....	39
5.5.1	Componentkeuze.....	39
5.5.2	Schakeling .....	39
5.6	Userinterface .....	40
5.6.1	RGB LED .....	40
5.6.2	Bedieningspaneel .....	40
5.7	PCB Design.....	41
5.8	Schema's.....	42
5.9	BOM .....	42
5.10	Softwaredesign .....	43
5.10.1	Embedded Software .....	43
5.10.2	GUI software.....	44
<b>Testfase</b>	.....	45
6	Realisatiefase.....	45
6.1	Samenvatting unitesten en integratietesten .....	45
6.2	Testresultaten .....	45
6.2.1	Testresultaat en conclusie.....	45
6.2.2	Testrapport .....	47
7	Conclusie .....	48
8	Aanbevelingen.....	49
9	Bibliografie .....	51
<b>Bijlage A: plan van aanpak</b>	.....	52
<b>Bijlage B: onderzoeksartikel</b>	.....	83
<b>Bijlage C: Programma van eisen</b>	.....	114
<b>Bijlage D: Architectuurontwerp</b>	.....	127
<b>Bijlage E: Detailontwerpfase</b>	.....	136
<b>Bijlage F: Unittestfase</b>	.....	179
<b>Bijlage G: Integratie testfase</b>	.....	205
<b>Bijlage H: Acceptatie testfase</b>	.....	217
<b>Bijlage I: Handleiding</b>	.....	249
<b>Bijlage J: Opdrachtomschrijving</b>	.....	269
<b>Bedrijfsbeoordeling</b>	.....	273
<b>Reflectieverslag</b>	.....	275

Competentie verantwoording .....277

## Versie Historiek

Revisie Datum	Auteur	Omschrijving
1.0	1-07-2024	Younes Boulmani
1.1	10-10-2024	Younes Boulmani
1.2	17-10-2024	Younes Boulmani
1.3	23-10-2024	Younes Boulmani
1.4	28-10-2024	Younes Boulmani
1.5	2-11-2024	Younes Boulmani
1.6	5-11-2024	Younes Boulmani
2.0	8-10-2024	Younes Boulmani

## Afkortingen

### **DA**

Distributie Automatisering

### **MSR**

Middenspanningstationruimte

### **RTU**

Remote Control Unit

### **MEM**

Multi Energy Measurement Unit

### **DAC**

Digital to Analog Converter

### **THD**

Total Harmonic Distortion

### **UI**

User Interface

### **GUI**

Graphical User Interface

### **PCB**

Printed Circuit Board

## Begrippenlijst

Term	Uitleg
DA3-project	Dit project binnen Stedin is gericht op het ontwikkelen van een meetsysteem voor middenspanningsruimtes, om de kwaliteit van de stroom in de elektrische velden te monitoren.
DA3-C en DA3-D boxen.	Apparaten, ook wel Smart Devices genoemd, ontwikkeld in het DA3-project. Deze apparaten meten de kwaliteit van stromen in MSR's en bestaan uit een RTU en maximaal vier MEM's.
Rogowski-spoel	Een type stroommeetsensor die wordt gebruikt voor het meten van wisselstroom zonder fysiek contact met de geleider. De Rogowski-spoel genereert een spanningssignaal dat evenredig is met de verandering in stroom.
MEM	Een meetunit die de eigenschappen van de stroom meet via gekoppelde Rogowski-spoelen.
RTU	De hoofdcontrole-unit van het Smart Device, die data verzamelt van gekoppelde MEM-units en communicatie mogelijk maakt met het centrale systeem.
Omicron	Een apparaat dat beschermingsrelais en andere systemen in energie-installaties test door simulaties uit te voeren. Het bevat meerdere stroombronnen en spanningsuitgangen, geschikt voor zowel elektromechanische als digitale relais.
DAC	Een component dat digitale signalen omzet in analoge signalen.

## Inleiding

Stedin is een netbeheerder die actief is in het grootste deel van Zuid-Holland en de provincies Utrecht en Zeeland. Het bedrijf zorgt ervoor dat meer dan 2,3 miljoen huishoudens en zakelijke klanten toegang hebben tot energie om te wonen, werken en ondernemen.

Net als andere netbeheerders staat Stedin voor grote uitdagingen. Door de snelle elektrificatie van huishoudens en bedrijven ontstaan er voortdurend nieuwe congestiepunten in het netbeheergebied die eerder niet waren voorspeld. Het DA3-project (Distributie Automatisering Project) is een initiatief om deze uitdagingen aan te pakken door het elektriciteitsnet uitgebreider te monitoren. Zo krijgt Stedin beter inzicht in het elektriciteitsnet en kan het efficiënter inspelen op netcongestieproblemen door het net slim uit te breiden waar dat nodig is.

Binnen dit project worden DA3-C en DA3-D boxen, ook wel "Smart Devices" genoemd, ontwikkeld en geplaatst in ruim 22.000 MSR's (Middenspanningstationsruimtes). Deze Smart Devices meten de stroom in verschillende velden en sturen deze data door voor analyse.

Elk Smart Device bestaat uit een RTU (Remote Terminal Unit) waarop maximaal vier MEM's (Multi Energy Measurement Units) kunnen worden aangesloten, met de mogelijkheid om per MEM acht Rogowski-spoelen aan te sluiten. Elke Rogowski-spoel kan metingen uitvoeren over drie fasen, waardoor één Smart Device 3-fasenmetingen kan verrichten in maximaal 32 velden (zie figuur 1 ter illustratie).

Voor het testen van dit Smart Device wordt momenteel gebruikgemaakt van een Omicron, een apparaat dat 3-fasestromen kan genereren. Deze Omicron is echter kostbaar (80 tot 90 duizend euro) en beperkt tot het testen van één poort tegelijk. Stedin streeft naar een efficiëntere testopstelling die het inductiespoelsignaal van de Rogowski-spoel simuleert om het Smart Device effectiever te testen. Deze aanpak is niet alleen essentieel voor bestaande apparaten, maar ook voor de verdere ontwikkeling van DA3 en toekomstige projecten.

## Probleemstelling

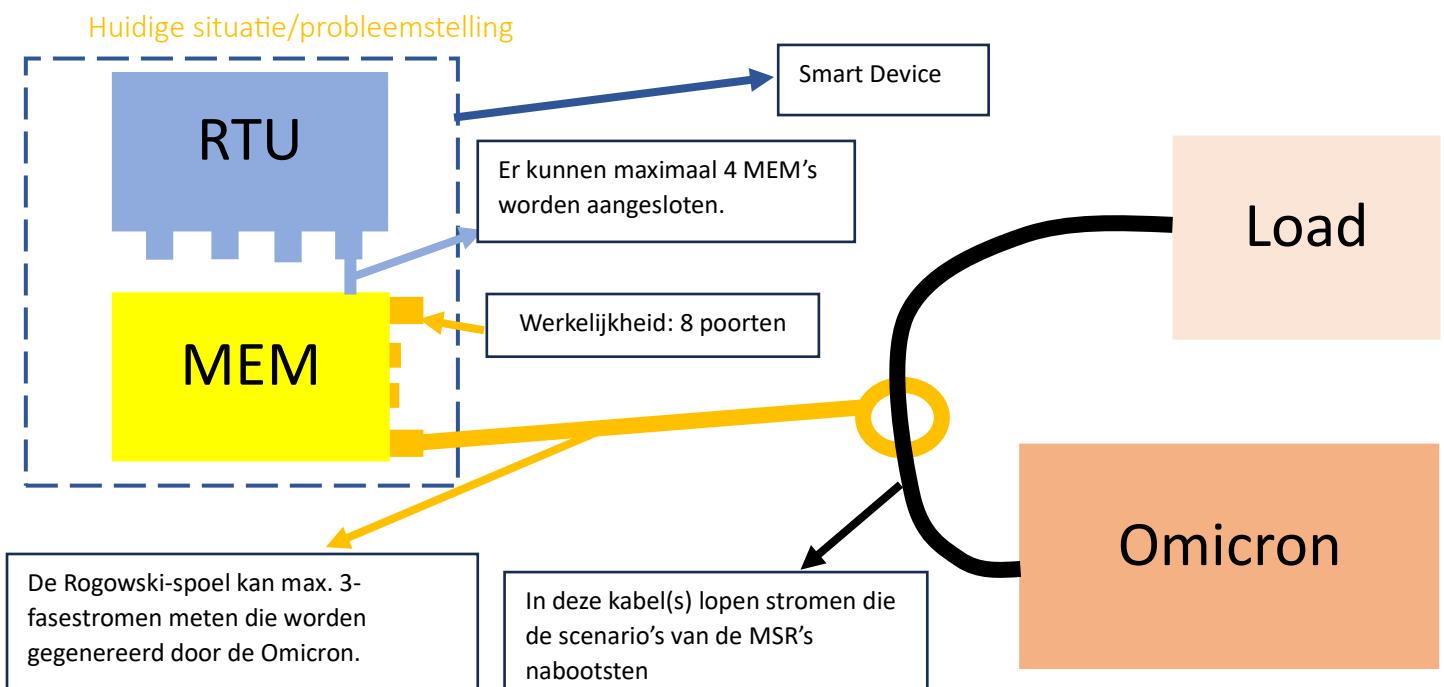
Het huidige testapparaat, de Omicron, kan slechts één poort van het Smart Device tegelijkertijd testen. Bovendien is het apparaat groot en zwaar (afmetingen: 450x145x390mm; gewicht: 16,8 kg). Daarnaast is de Omicron vrij complex om te bedienen. Dit maakt het dus vrij lastig om deze Smart Devices en de hardware revisies ervan te testen. Een eenvoudigere en gebruikersvriendelijker oplossing die meer poorten kan testen, is dus gewenst.

## Doelstelling

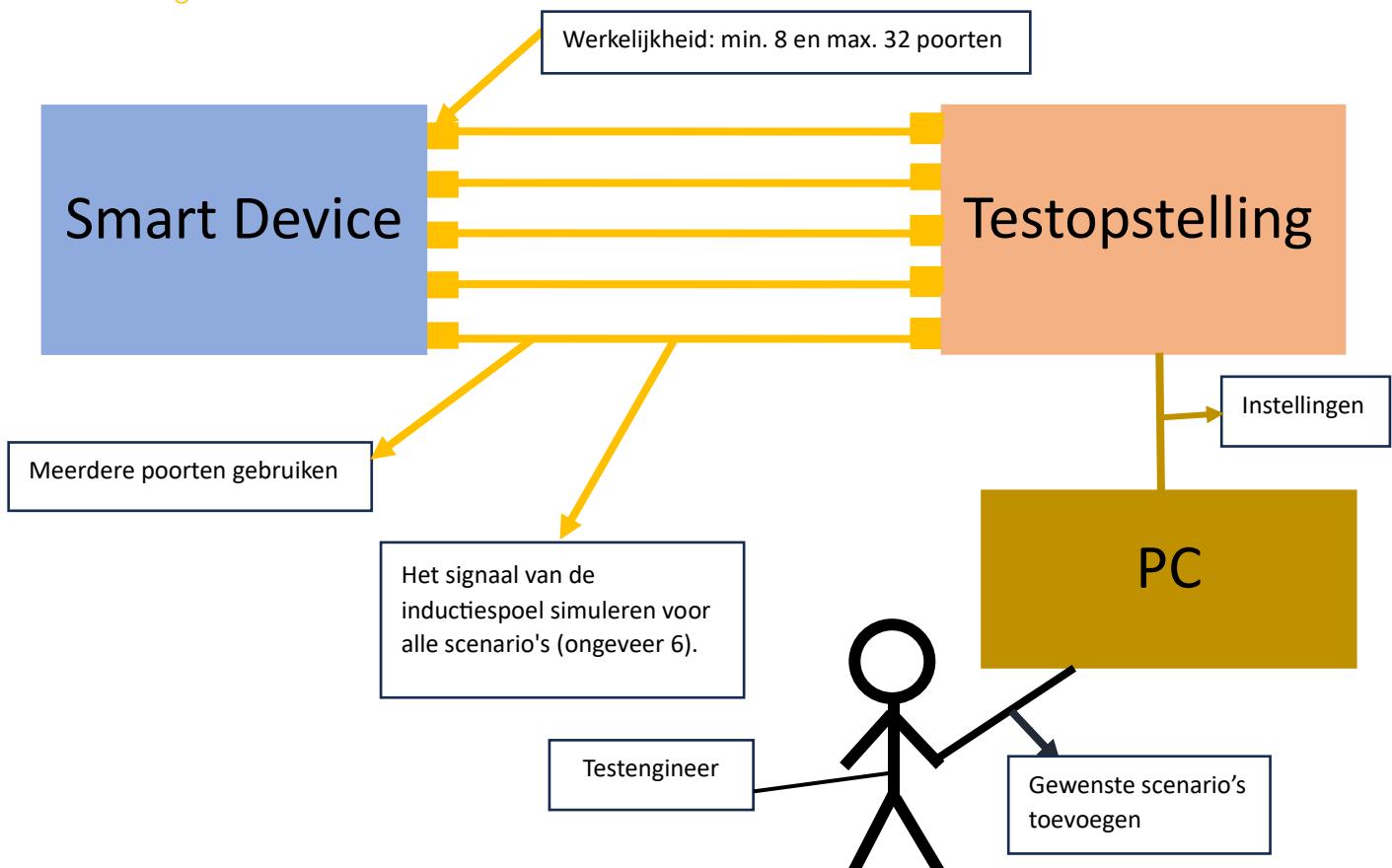
Het doel is om een eenvoudigere en snellere testopstelling te ontwikkelen die meerdere poorten gelijktijdig van de MEM kan testen door de signalen van de Rogowski-spoel te simuleren per scenario. Hierbij kan de testengineer de gewenste scenario's eenvoudig instellen via een gebruiksvriendelijke UI (User Interface). Hierdoor verloopt de testmethode veel sneller en eenvoudiger dan de voorgaande methode met de Omicron, waardoor de Omicron overbodig wordt. Aanvullend streeft Stedin ernaar om hiermee ook diverse scenario's te kunnen testen.

**Schema**

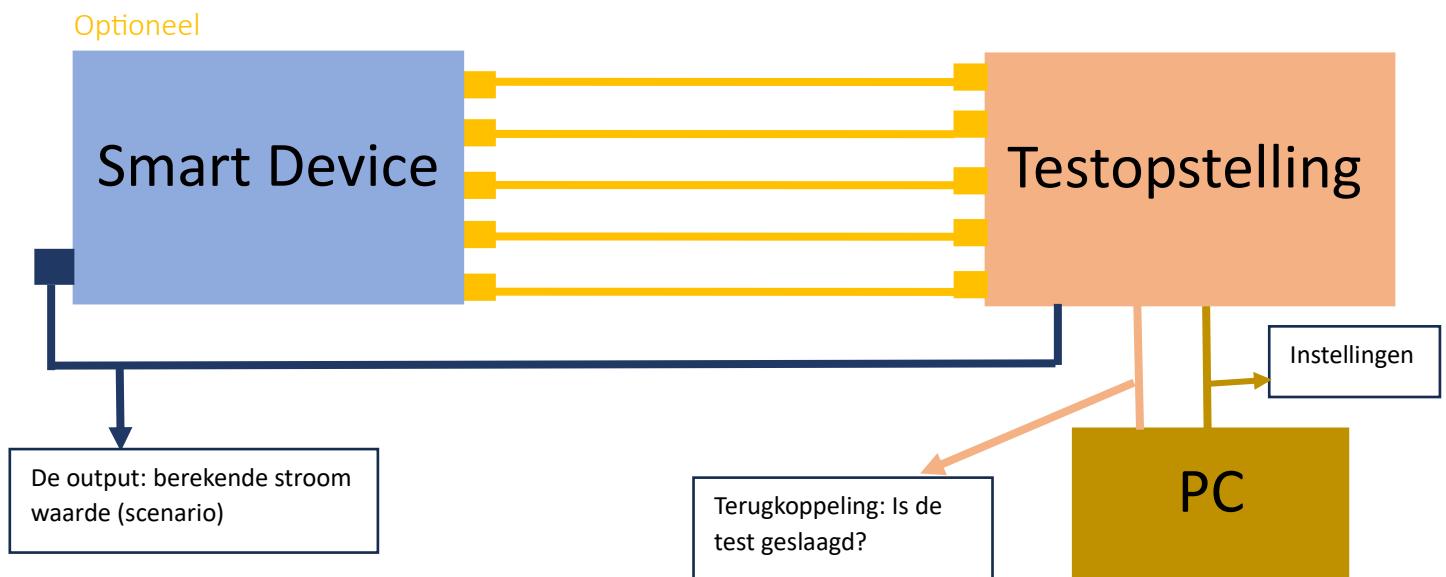
In figuur 1 tot en een met 3 zijn de schema's weergegeven van de huidige situatie/probleemstelling, de doelstelling en eventuele optionele toevoegingen aan de opdracht.



Figuur 1, het schema van de huidige testmethode met de Omicron.

**Doelstelling**

Figuur 2, Het gewenste resultaat.



Figuur 3, het gewenste resultaat met optionele toevoegingen.

## Achtergronden

Van 12 februari 2024 tot 28 november 2024 heeft de afstudeerdeerder, Younes Boulmani, gewerkt aan een project voor het ontwerpen en realiseren van een testopstelling voor het Smart Device, dat onderdeel uitmaakt van het DA3-project van Stedin. Dit project is grotendeels uitgevoerd op de vestiging van Stedin in Delft, waar de afdeling Smart Devices zich bevindt. Het doel van deze afstudeerstage was om de kennis die de afgelopen jaren is opgedaan toe te passen binnen een onderneming en een waardevolle bijdrage te leveren aan Stedin door de opdracht uit te voeren. Hierbij is het belangrijk dat de afstudeerdeerder kan aantonen dat hij alle acht engineeringcompetenties op hbo-eindniveau goed beheert.

## Belang

De afstudeeropdracht is belangrijk voor het Smart Device team van Stedin. Als het project succesvol is en het product aan alle eisen voldoet, zal Stedin aanzienlijke kosten en tijd besparen. Bovendien kunnen er sneller en eenvoudiger meer relevante scenario's getest worden dan met de huidige oplossing.

## Projectmethodiek

De projectactiviteiten zijn belangrijk om het project goed te laten verlopen en zo aan het eind een goed product te kunnen leveren. Het project wordt uitgevoerd volgens het V-model. Het V-model is een gestructureerde projectaanpak waarbij de aandacht evenredig wordt verdeeld tussen projectdefinitie (en vertaling naar technisch ontwerp) en validatie/verificatie van gedefinieerde projecteisen en behoeften (Marselis, n.d.) [1].

## Doelgroepen en suggesties voor het lezen

De doelgroepen van het project zijn het Smart Device team van Stedin en de docenten. Het projectdocument is gebaseerd op het V-model. Om de stappen van het V-model goed te kunnen volgen, wordt geadviseerd het document in chronologische volgorde te lezen. Mocht er onduidelijkheid ontstaan tijdens het lezen of wil de lezer gedetailleerde informatie, dan wordt aangeraden de bijlage te raadplegen.

In het stageverslag komen veel referenties voor met “{x}”, die verwijzen naar de bijlagen. Deze verwijzingen bevatten hyperlinks. Daarnaast zijn er in het stageverslag ook verwijzingen met “[ ]” te vinden, die verwijzen naar bronnen die beschreven staan onder het hoofdstuk “bibliografie”. Er is gebruikgemaakt van de APA-bronvermelding.

# Onderzoeksfase

## 1.1 Onderzoeksplan

In dit hoofdstuk wordt het onderzoeksplan behandeld. De onderzoeks vragen, afbakening en gekozen methoden komen aan bod. Een uitgebreide beschrijving van het onderzoeksplan, inclusief de probleemstelling, doelstelling, data en resultaten, is te vinden in de bijlage **{Bijlage B: onderzoeksartikel}**.

### 1.1.1 Onderzoeks vragen

In dit hoofdstuk zijn de onderzoeks vragen geformuleerd die relevant zijn voor het bereiken van de doelstelling van het onderzoek.

#### Hoofdvraag

Hoe kun je het opgewekte Rogowski-spoelsignaal simuleren om het Omicron device te vervangen?

#### Deelvragen

##### ***Hoe werkt de huidige testmethode?***

- Wat zijn de stappen die worden uitgevoerd tijdens de huidige testmethode?
- Hoe werkt de Rogowski-spoel?
- Welke metingen of parameters worden onderzocht om de werking of betrouwbaarheid van het Smart Device te beoordelen?
- Wat zijn de nadelen of beperkingen van de huidige testmethode die moeten worden opgelost bij het ontwikkelen van een nieuwe methode?

##### ***Wat voor signaal moet er gesimuleerd worden om het Smart Device te kunnen testen?***

- Wat zijn de specificaties van het Rogowski-inductiesignaal dat wordt opgewekt door het Omicron device voor elk scenario?
- Welke eigenschappen van het Rogowski-spoelsignaal zijn cruciaal voor een nauwkeurige simulatie?
- Hoe nauwkeurig moet het gesimuleerde signaal zijn om het Smart Device betrouwbaar te kunnen testen?

##### ***Wat is de beste methode om het Rogowski-spoelsignaal te simuleren?***

- Welke methoden/technologieën zijn beschikbaar om het signaal te simuleren?
- Wat zijn de voor- en nadelen van deze methoden/technologieën?
- Welke methode is het meest geschikt voor de huidige toepassing?

## 1.1.2 Afbakening

In deze paragraaf wordt aangegeven waar het onderzoek wel en niet betrekking op heeft en wordt een duidelijke afbakening gemaakt.

### 1.1.2.1 Inclusief

#### **Het onderzoek richt zich specifiek op:**

- Het ontwikkelen van een snellere en eenvoudigere testopstelling voor het efficiënt testen van Smart Devices, geïnstalleerd in middenspanningsruimtes.
- Het simuleren van het opgewekte signaal van de Rogowski-spoel (CR-200), waarbij de resultaten en conclusies ook relevant zullen zijn voor andere current sensors met vergelijkbare eigenschappen.

- Beperking van de signaalsimulatie tot de gewenste testscenario's.
- Het simuleren van signalen voor de diverse gewenste testscenario's.
- Het bepalen van de benodigde nauwkeurigheid van het gesimuleerde signaal voor het testen van het MEM-101-systeem.
- Evaluatie van de effectiviteit van de methoden met inachtneming van de klanteisen van Stedin.

### 1.1.2.2 *Uitsluiting van het Onderzoek*

#### **Het onderzoek omvat niet:**

- De werking van andere current sensors dan de Rogowski-spoel (CR-200).
- Tests ter verificatie van de effectiviteit en kwaliteit van de methoden.
- Onderzoek naar of de gewenste testscenario's ook leiden tot een betere monitoring van het elektriciteitsnetwerk en het aanpakken van de toename van de elektriciteitsvraag.
- Andere aspecten van de werking van het Smart Device binnen het elektriciteitsnetwerk.
- Andere mogelijke toepassingen van de ontwikkelde testmethode buiten het specifieke gebruik bij Stedin.
- Technische evaluatie van apparaten of methoden die niet direct relevant zijn voor het simuleren van het Rogowski-spoelsignaal.

### 1.1.3 Methode

In dit hoofdstuk wordt de methode van het onderzoek besproken. Het onderzoek zal worden uitgevoerd aan de hand van de volgende aanpak:

#### ***1. Vooronderzoek:***

- Analyse van de huidige testmethode, inclusief de stappen die worden uitgevoerd en de werking van de Rogowski-spoel.
- Onderzoek naar de metingen of parameters die worden gebruikt om de integriteit en functionaliteit van het Smart Device te beoordelen.
- Identificatie van nadelen of beperkingen van de huidige testmethode die moeten worden aangepakt bij de ontwikkeling van een nieuwe methode.

#### ***2. Dataverzameling:***

- Raadplegen van literatuur en datasheets om inzicht te krijgen in de werking van de Rogowski-spoel.
- Uitvoeren van praktisch onderzoek om meetresultaten te verkrijgen en het minimale benodigde gesimuleerde signaal te bepalen.
- Bestuderen van literatuur over simulatiemethoden en -technologieën om geschikte benaderingen te identificeren.

#### ***3. Expertconsultatie:***

- Overleg met Electrical Engineers binnen Stedin om inzicht te krijgen in de haalbaarheid van voorgestelde simulatiemethoden en voor praktisch advies.

De benodigde gegevens zijn verzameld via literatuuronderzoek, praktisch onderzoek en expertconsultatie, met alle bronnen vermeld in de "Bibliografie". Betrouwbare databanken zoals Google Scholar, JSTOR en IEEE zijn gebruikt, waarbij de betrouwbaarheid van de bronnen kritisch is beoordeeld op basis van auteur, citaties en publicatiedatum.

## 1.2 Samenvatting

Dit onderzoek, uitgevoerd in het kader van Stedin's DA3-project, richt zich op het ontwikkelen van een efficiëntere testopstelling voor Smart Devices (bestaande uit een MEM101 een multi measurement unit die de stroomeigenschappen meet) in middenspanningsstations. De aanleiding voor deze studie ligt in de toenemende elektriciteitsvraag, versneld door de elektrificatie van huishoudens en bedrijven, wat het belang van uitgebreide netwerkmonitoring benadrukt. De huidige testmethode, gebruikmakend van het Omicron Device en Rogowski-spoelen, kent een hoge complexiteit en is tijdrovend, wat een snellere en eenvoudigere oplossing wenselijk maakt.

Centraal staat de onderzoeks vraag: "Hoe kun je het opgewekte Rogowski-spoelsignaal simuleren om het Omicron device te vervangen?" Om deze vraag te beantwoorden, richt het onderzoek zich op de werking en beperkingen van de huidige testmethode en de Rogowski-spoel, evenals op de specificaties van het te simuleren Rogowski-inductiesignaal. Verschillende simulatiemethoden, waaronder Directe Digitale Synthese (DDS), het gebruik van een DAC-chip, Function Generator IC's, Programmeerbare Microcontrollers, Analoge Circuitontwerpen, FPGA en softwareprogramma's zoals MATLAB, worden onderzocht om de meest geschikte methode voor de huidige toepassing te identificeren.

Uit het onderzoek is gebleken dat het opgewekte Rogowski-spoelsignaal, specifiek voor de Current Sensor CR-200, beschreven kan worden met de formule  $V_{out}(t) = I(t) \times \frac{1}{10000}$ . Deze bevinding benadrukt het belang van nauwkeurige simulatie van het Rogowski-spoelsignaal. Afwijkingen in het gesimuleerde signaal kunnen leiden tot significante verschillen in meetresultaten bij de MEM101, vooral gezien de precisie waarmee de MEM101 unit kleine veranderingen detecteert.

Diverse simulatiemethoden, waaronder het gebruik van een door een microcontroller aangestuurde DAC-chip, zijn onderzocht. Hierbij zijn de voor- en nadelen van elke methode geïnventariseerd en vergeleken op basis van criteria zoals flexibiliteit, nauwkeurigheid, kostenefficiëntie, de leercurve, en het vermogen om meerdere signalen tegelijkertijd te genereren. Uit dit onderzoek is gebleken dat de methode van het gebruik van een DAC-chip het best presteert op deze criteria en zich onderscheidt door zijn hoge nauwkeurigheid/resolutie en flexibiliteit. Deze eigenschappen zijn essentieel voor het genereren van complexe signalen, die een nauwkeurige simulatie van het Rogowski-spoelsignaal mogelijk maken. Deze methode maakt ook de generatie van meerdere signalen mogelijk, waardoor het haalbaar wordt om gelijktijdige tests op meerdere poorten van het Smart Device uit te voeren, resulterend in aanzienlijke tijdsbesparingen.

De studie concludeert dat het gebruik van een DAC-chip de meest geschikte methode is voor het simuleren van het Rogowski-spoelsignaal, gebaseerd op de vereisten en de klantwensen van Stedin, dankzij de hoge precisie en flexibiliteit. Dit legt de basis voor de ontwikkeling van efficiëntere testopstellingen voor Smart Devices en biedt perspectieven voor toekomstig onderzoek naar signaalsimulatie voor geadvanceerde Smart Devices, wat bijdraagt aan een verbeterde monitoring van het elektriciteitsnetwerk.

## Definitiefase

### 2 Definiëren van de eisen

In dit hoofdstuk wordt doormiddel van de Yourdon analyse alle functionele en niet functionele eisen opgesteld. De onderbouwing van deze eisen is te vinden in de bijlage **{Bijlage C: Programma van eisen}**

#### 2.1 Systeemcontext

Na aansluiting op de voeding controleert het testsysteem of er verbinding is met de PC via USB. Zodra de verbinding tot stand is gebracht, kan de testengineer via een interface de gewenste testscenario's voor de testprocedure instellen en naar het testsysteem verzenden. Daarnaast is er een optie om een standaardtestprocedure te initiëren, bestaande uit een set vastgestelde scenario's (zie tabel 1), zodat de testengineer de instellingen niet handmatig hoeft in te voeren en te verzenden.

Wanneer de testengineer de instellingen heeft verstuurd en het testsysteem deze correct heeft ontvangen en verwerkt, geeft het testsysteem visueel aan dat het klaar is voor gebruik. De testengineer kan vervolgens op elk gewenst moment een startsignaal geven om de testprocedure te starten. Tijdens de testprocedure is zichtbaar welk testscenario op dat moment wordt uitgevoerd.

De testprocedure kan op elk moment worden gepauzeerd, waarbij het huidige scenario doorgaat zonder over te schakelen naar het volgende. De test kan worden hervat met een startsignaal en op elk gewenst moment worden beëindigd met een stopsignaal. Wanneer alle scenario's zijn doorlopen, informeert het testsysteem de testengineer dat de testprocedure is voltooid.

De klant wenst dat het testsysteem de systeemstatus (gestopt, gepauzeerd, voltooid, of gestart) visueel weergeeft aan de testengineer. Optioneel wenst de klant dat het testsysteem via het Modus-protocol kan communiceren met het Smart Device, de gemeten testscenario's uitleest en op basis daarvan een testrapport genereert over welke tests geslaagd zijn en welke niet.

Tabel 1 toont de testscenario's die worden uitgevoerd tijdens de standaardtestprocedure. Ze zijn verdeeld in twee categorieën: "Stroom Testscenario's" en "Total Harmonica Distortion (THD%)".

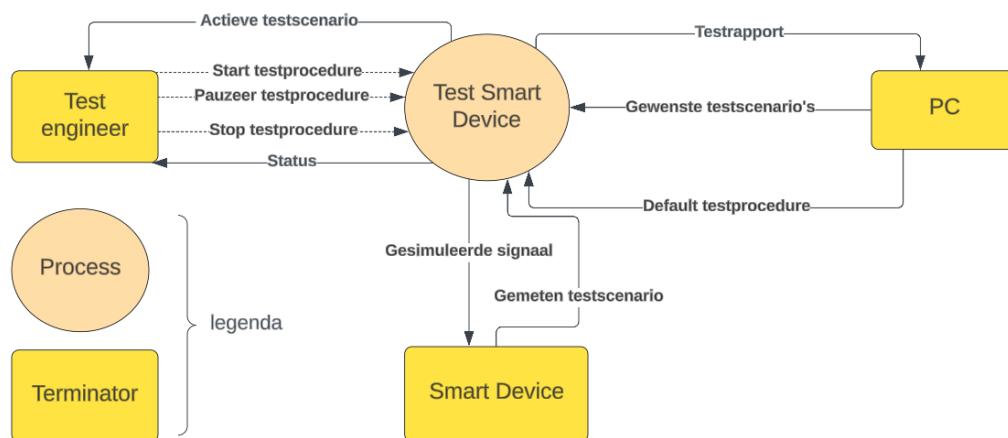
#### **Opmerking:**

*De frequentie van het grondsignaal is in alle testscenario's 50 Hz. De stromen zijn in RMS-waarde*

Categorie	Testscenario	Parameters
<i>Stroom Test Scenario's</i>	1	L1, L2, L3: 25 Ampère
	2	L1, L2, L3: 6,8 Ampère
	3	L1, L2, L3: 9,186 Ampère
<i>THD% Test Scenario's</i>	1	Stroom L1, L2, L3: 20 A. THD% = 29,15%. Ordes : 3e = 15%, 5e = 20%, 7e = 10%, 9e = 8%, 11e = 6%, 13e = 5%
	2	Stroom L1, L2, L3: 20 A; THD% = 15,8%. Ordes: 3e = 15%, 5e = 5%
	3	Stroom L1, L2, L3: 20 A; THD% = 32,02%. Ordes: 3e = 30%, 5e = 5%, 7e = 10%

*Tabel 1, De gewenste testscenario's die de testengineer kan instellen*

In figuur 4 is het data context diagram van het testsysteem weergeven.

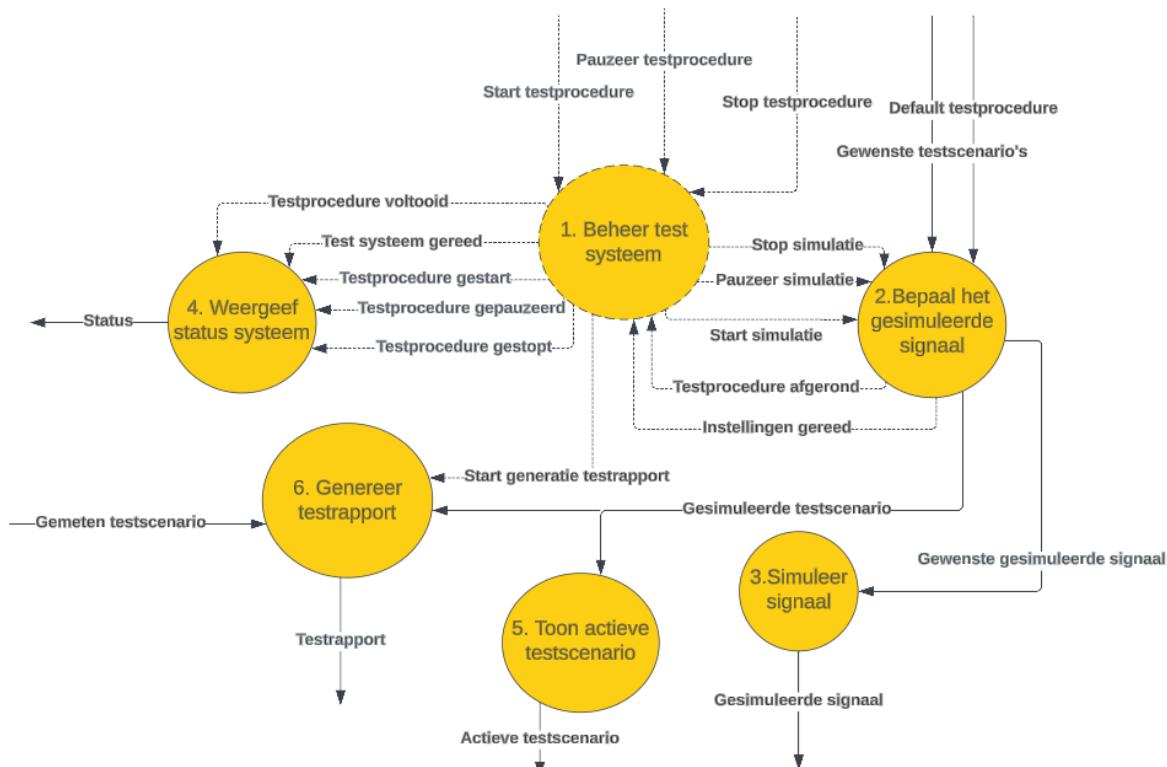


Figuur 4, data context diagram van het testsysteem

## 2.2 Procesbeschrijving

In figuur 5 is het dataflow diagram (DFD0) te zien van het testsysteem met daarin 6 processen:

1. Simuleer signaal
2. Bepaal het gesimuleerde signaal
3. Weergeef status systeem
4. Beheer testsysteem
5. Toon actieve testscenario
6. Genereer testrapport



Figuur 5, data flowdiagram (DFD0)

## 2.3 Systeemfuncties

In dit hoofdstuk worden de functionele eisen besproken van het systeem. De eisen zijn gecategoriseerd volgens de MoSCoW methode. Met MH als 'Must Have', CH als 'Could Have', SH als 'Should Have' en WH als 'Won't Have'. Figuur 5 weergeeft de dataflow diagram van het systeem. Er zijn 6 functies die geïmplementeerd moeten worden:

1. Beheer testsysteem
2. Bepaal het gesimuleerde signaal
3. Simuleer signaal
4. Weergeef status systeem
5. Toon actieve testscenario
6. Genereer testrapport

Deze functies/processen worden in de volgende paragrafen uitgebreid beschreven.

### 2.3.1 Beheer testsysteem

Het proces 'Beheer testsysteem' ontvangt start-, pauzeer- en stopsignalen van de testengineer en geeft deze door aan de relevante processen. Daarnaast zorgt het ervoor dat communicatie met de PC en het Smart Device mogelijk is.

#### *Stimulus en response*

Stimulus: Ontvangt een start-, pauzeer- en stop signaal

Response: Beheert het testsysteem op basis van de inputsignalen.

#### *Functionele en Performance requirements*

**REQ-1.1[MH]:** De testengineer kan na het instellen van alle gewenste testscenario's de testprocedure laten starten.

**REQ-1.2[MH]:** De testengineer kan de testprocedure laten stoppen.

**REQ-1.3[MH]:** De testengineer kan de testprocedure laten pauzeren.

**REQ-1.4[SH]:** De standaard default testprocedure mag niet langer duren dan een kwartier.

**REQ-1.5[MH]:** Het testsysteem communiceert met de PC volgens het USB-protocol.

**REQ-1.6[CH]:** Het testsysteem communiceert met het Smart Device via het Modbus-protocol.

**REQ-1.7[WH]:** De testengineer kan de duur van de standaardtestprocedure instellen.

**REQ-1.8[WH]:** Het testsysteem informeert de testengineer wanneer er een communicatiefout optreedt met het Smart Device.

### 2.3.2 Bepaal het gesimuleerde signaal

Het proces "Bepaal het gesimuleerde signaal" ontvangt de gewenste testscenario's van de testengineer en bepaalt welk signaal gesimuleerd moet worden op basis van de gekozen testscenario's.

#### *Stimulus en response*

Stimulus: De testengineer stelt de gewenste testscenario's in die tijdens de testprocedure moet worden uitgevoerd.

Response: Bepaalt het gewenste simulatie signaal.

### Functionele en Performance requirements

**REQ-2.1[MH]:** Het testsysteem biedt de mogelijkheid om 6 testscenario's uit te voeren voor de testprocedure, zoals weergegeven in tabel 1.

**REQ-2.2[CH]:** De testengineer kan de gewenste stroomtestscenario's instellen binnen een bereik van 5 tot 500 Ampère RMS, met stapgroottes van één duizendste.

**REQ-2.3[SH]:** De testengineer kan de 3e, 5e en 7e harmonischen van de THD% testscenario's instellen binnen een bereik van 5 tot 50% van de amplitude van de grondharmonische 50 Hz, met een stapgrootte van 1%.

**REQ-2.4 [CH]:** De testengineer is in staat om alle oneven harmonischen tot en met de 13e in te stellen binnen een bereik van 5 tot 50%, met een stapgrootte van 1%.

**REQ-2.5 [CH]:** De testengineer kan een standaardtestprocedure initiëren, waarbij alle testscenario's en bijbehorende instellingen uit tabel 1 automatisch worden verzonden.

**REQ-2.6 [WH]:** De testengineer kan de frequentie van het grondsignaal instellen binnen een bereik van 20 tot 200 Hz.

### 2.3.3 Simuleer signaal

Het proces "simuleer signaal" is in staat om het gewenste simulatiesignaal te genereren om het Smart Device te testen.

#### Stimulus en response

Stimulus: Ontvangt het gewenste simulatiesignaal

Response: Genereert het gewenste simulatiesignaal en stuurt dit door naar het Smart Device

### Functionele en Performance requirements

**REQ-3.1[MH]:** Het testsysteem is in staat om stroomtestscenario 1 (zie tabel 1) te simuleren met de maximale afwijking van 6% ten opzichte van het gewenste simulatie signaal.

**REQ-3.2[SH]:** Het testsysteem is in staat om alle testscenario's weergeven in tabel 1 te simuleren met de maximale afwijking van 6% ten opzichte van het gewenste simulatie signaal.

**REQ-3.3[CH]:** Het testsysteem is in staat om alle stroomtestscenario's te simuleren volgens REQ-2.2 met de maximale afwijking van 6%

**REQ-3.4[CH]:** Het testsysteem is in staat om het gewenste stroom testscenario te simuleren met een maximale afwijking van 3% ten opzichte van het gewenste simulatie signaal.

**REQ-3.5[SH]:** Het testsysteem is in staat om het gewenste THD% testscenario's te simuleren met een maximale afwijking van 6% ten opzichte van het ingestelde THD% door de testengineer.

**REQ-3.6[CH]:** Het testsysteem is in staat om het gewenste THD% testscenario's te simuleren met een maximale afwijking van 3% ten opzichte van het ingestelde THD% door de testengineer.

**REQ-3.7[MH]:** Het testsysteem is in staat om op 1 poort van de MEM101 de testscenario's te simuleren.

**REQ-3.8[CH]:** Het testsysteem is in staat om op 8 poorten van de MEM101 tegelijkertijd de testscenario's te simuleren.

**REQ-3.9[WH]:** Het testsysteem is in staat om de gewenste grondfrequentie te simuleren met een maximale afwijking van 1%.

#### 2.3.4 Weergeef status systeem

Het proces 'weergeef status systeem' toont de status van het systeem aan de testengineer, zoals wanneer het testsysteem gereed is, bezig is met de testprocedure, gepauzeerd is, gestopt is, of wanneer de procedure voltooid is.

##### *Stimulus en response*

Stimulus: De huidige status van het systeem

Response: Weergeeft deze status aan de testengineer

##### *Functionele en Performance requirements*

**REQ-4.1[CH]:** Het testsysteem geeft een visuele indicatie wanneer het testsysteem gereed is voor gebruik.

**REQ-4.2[CH]:** Het testsysteem geeft een visuele indicatie wanneer het gestart is met de testprocedure.

**REQ-4.3[CH]:** Het testsysteem geeft een visuele indicatie wanneer de testprocedure voltooid is.

**REQ-4.4[CH]:** Het testsysteem geeft een visuele indicatie wanneer de testprocedure gepauzeerd is.

**REQ-4.5[CH]:** Het testsysteem geeft een visuele indicatie wanneer het gestopt is met de testprocedure.

#### 2.3.5 Toon actieve testscenario

Het proces "Toon actieve testscenario" toont het actieve testscenario aan de testengineer tijdens de testprocedure.

##### *Stimulus en response*

Stimulus: Het testsysteem voert een bepaalde testscenario uit tijdens de testprocedure

Response: Toont de actieve testscenario aan de testengineer

##### *Functionele en Performance requirements*

**REQ-5.1[MH]:** Het testsysteem geeft het actieve testscenario weer aan de gebruiker.

**REQ-5.2[WH]:** Het testsysteem geeft het vorige testscenario weer aan de gebruiker.

**REQ-5.3[WH]:** Het testsysteem geeft het volgende testscenario weer aan de gebruiker.

### 2.3.6 Genereer testrapport

Het proces 'Genereer testrapport' zorgt ervoor dat er een testrapport wordt gegenereerd op basis van het gemeten testscenario door het Smart Device te vergelijken met het gewenste simulatietestscenario, en stuurt dit rapport door naar de PC.

#### *Stimulus en response*

Stimulus: Testprocedure is afgerond

Response: Genereert een testrapport door de meetresultaten van het Smart Device te vergelijken met de ingestelde testscenario's en stuurt dit door naar de PC.

#### *Functionele en Performance requirements*

**REQ-6.1[CH]:** Het testsysteem genereert een testrapport na afloop van elk testprocedure en stuurt deze door naar de PC.

### 2.4 Niet functionele eisen

**REQ-NF1[MH]:** Het testsysteem functioneert met een voeding die een ingangsspanningsbereik van 10 tot 30 VDC heeft.

**REQ-NF2[MH]:** Het testsysteem kan verbonden worden met het Smart Device doormiddel van een UTP-kabel.

**REQ-NF3[SH]:** Het testsysteem verbruikt tijdens de testprocedure niet meer dan 15 watt aan vermogen.

**REQ-NF4[CH]:** Het testsysteem weegt maximaal 5 kg.

**REQ-NF5[CH]:** De afmetingen van het testsysteem zijn maximaal 200x175x50 mm.

**REQ-NF6[WH]:** Het testsysteem is uitgerust met een oplaadbare accu.

**REQ-NF7[WH]:** Er zal behuizing gemaakt worden voor het testsysteem.

### 3 Acceptatietest

In dit hoofdstuk wordt uitgebreid beschreven hoe de eisen, die in het vorige hoofdstuk zijn gedefinieerd, getest kunnen worden. In het hoofdverslag wordt slechts één acceptatietest beschreven. De overige acceptatietesten zijn te vinden in de bijlage **{Bijlage H: Acceptatie testfase}**

#### 3.1 Testomgeving

De testen worden uitgevoerd in het testlab van het Smart Device Team van Stedin in Delft. Hier is de volgende apparatuur aanwezig:

- Labvoeding (0-30Vdc)
- Oscilloscoop
- Smart Devices

#### 3.2 Hardware

De test uitvoerder heeft de volgende hardware nodig om de testcases uit te voeren:

- PCB van het testsysteem
- Voeding (min. 4V, max. 30V, min. 100mA)
- Oscilloscoop (minimaal 3 kanalen, 2mV/divisie)
- Smart Device
- USB A naar micro B-kabel
- 9 ethernet Kabels (UTP).
- STLINK V3 en JTAG-connector
- PC
- Stopwatch/ Klok
- Dali BOX display (voor uitlezen van de MEM101)
- Meetlint
- Weegschaal

#### 3.3 Firmware

De test uitvoerder heeft de volgende firmware nodig om de testcases uit te voeren.

- STM32CubeIDE
- Python versie 3
- Het STM32CubeIDE project “Testopstelling\_DA\_BOX\_STEDIN\_V2” [[LINK REPOSITORY](#)]
- Het GUI python bestand “GUI\_Code” [[LINK REPOSITORY](#)]

#### 3.4 Testcase

Testscenario simulatie	Beschrijving
Requirement/ Specificatie:	<p><b>REQ-3.1[MH]:</b> Het testsysteem is in staat om stroomtestscenario 1 (zie tabel 1) te simuleren met de maximale afwijking van 6% ten opzichte van het gewenste simulatie signaal.</p> <p><b>REQ-3.2[SH]:</b> Het testsysteem is in staat om alle stroomtestscenario's weergeven in tabel 1 te simuleren met de maximale afwijking van 6% ten opzichte van het gewenste simulatie signaal.</p>
Voorwaarden:	<ul style="list-style-type: none"><li>• PCB van het systeem</li><li>• Voeding (min. 4V, max. 30V, min. 100mA)</li><li>• Oscilloscoop (minimaal 3 kanalen, 2mV/divisie)</li><li>• Firmware voor de PCB, “Testopstelling_DA_BOX_STEDIN_V2”</li></ul>

	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Het GUI python bestand opgeslagen in de PC.</li> <li>• Een PC met de volgende software geïnstalleerd:           <ul style="list-style-type: none"> <li>◦ STM32CubeIDE.</li> <li>◦ Python</li> </ul> </li> <li>• STLINK V3 en JTAG-connector</li> <li>• USB A naar micro B-kabel</li> </ul>
<b>Testinvoer:</b>	Standaard testprocedure (stroomtestscenario's weergeven in tabel 1)
<b>Testuitvoer:</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• De gemeten test scenario's:           <ul style="list-style-type: none"> <li>- Het sinussignaal gemeten door de oscilloscoop (voor de stroom testscenario's).</li> </ul> </li> </ul>
<b>Criteria:</b>	<p>Het gemeten resultaat voor stroomtestscenario 1 komt overeen met het ingestelde testscenario, met een maximale afwijking van 6%.</p> <p>Alle stroomtestscenario's in tabel 1 komen overeen met de ingestelde testscenario's, met een maximale afwijking van 6%.</p>
<b>Testprocedure</b>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Verbind de PCB met de voeding (10V, 100mA).</li> <li>2. Verbind de PCB met de STLINK via de STDC14-connector.</li> <li>3. Sluit de oscilloscoop aan op de uitgangen van de PCB (kanalen 1, 2 en 3 voor respectievelijk L1, L2 en L3). Stel de oscilloscoop in op 2mV/divisie en 5ms/divisie.</li> <li>4. Debug en run het STM32Cube IDE-project "Testopstelling_DA_BOX_STEDIN_V2".</li> <li>5. Verbind de PCB met de PC via een micro USB-kabel.</li> <li>6. Open het Python-bestand op de PC en start de GUI.</li> <li>7. Initieer de standaard testprocedure door op "standaard testprocedure" te klikken.</li> <li>8. Controleer of het systeem een visuele indicatie geeft dat het klaar is voor de test (blauw licht). Start de test door op "Start" te klikken.</li> <li>9. Controleer het gemeten sinussignaal (voor de stroomtestscenario's) en controleer of deze voldoet aan de criteria</li> <li>10. Herhaal stap 9 voor alle stroomtestscenario's.</li> <li>11. Nadat de testprocedure is voltooid, stop de testprocedure en controleer de meetresultaten om te verifiëren of de gestelde eisen zijn behaald op basis van de criteria.</li> </ol>
<b>Testresultaat:</b>	Zie testresultaat <b>{6.2.1}</b> voor de testresultaten en de conclusie met betrekking tot de requirements van deze testcase.
<b>Test geslaagd:</b>	<p>De test is geslaagd als:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• De testuitvoer voldoet aan de criteria</li> </ul>

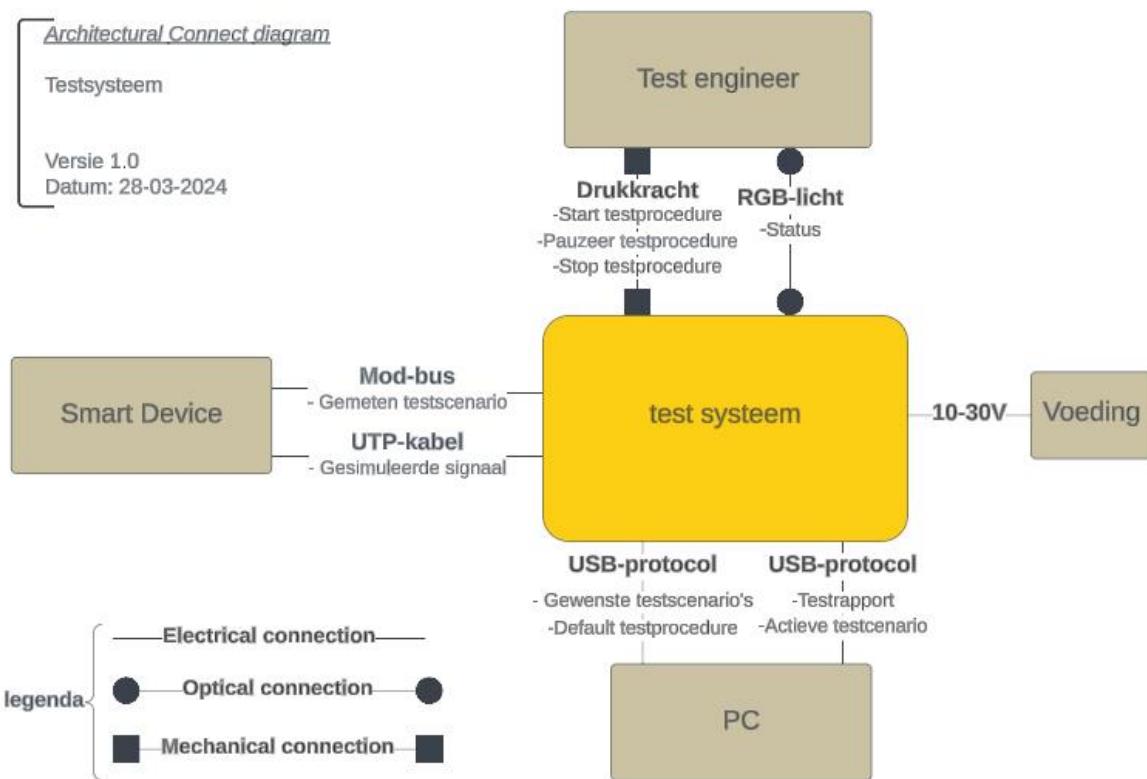
## Architectuurfase

### 4 Architectuurfase (Architecture Phase)

Het testsysteem is opgedeeld in meerdere deelsystemen, die in dit hoofdstuk worden beschreven en gespecificeerd. Ook de koppelingen tussen de verschillende deelsystemen worden uiteengezet. De onderbouwingen van de unitspecificaties zijn niet opgenomen in het hoofdverslag, maar kunnen worden geraadpleegd in de bijlage {Bijlage D: Architectuurontwerp}.

#### 4.1 Architectuur ontwerp

In figuur 6 is het architectuur context diagram weergeven van het testsysteem.



Figuur 6, ACD van het testsysteem

#### 1.1 Ontwerpbesluiten

De keuze is gevallen op microcontrollers uit de STM32F4-serie. Deze reeks microcontrollers is gebaseerd op de ARM Cortex-M4 kern en biedt uitstekende rekencapaciteit en digitale signaalverwerking (DSP)-functies. Ze beschikken over een FPU (floating point unit), wat voor onze applicatie wenselijk is omdat we veel digitale signaalbewerking zullen uitvoeren. Ook zijn de microcontrollers in deze reeks voorzien van een USB-interface, wat het mogelijk maakt om via de microcontroller te communiceren met de PC via het USB-protocol. Daarnaast heeft de afstudeerde veel ervaring met programmeren van STM32 microcontrollers in deze serie, wat de ontwikkeltijd van het project zal versnellen. Dit vergroot de kans dat het project binnen de gestelde deadline kan worden gerealiseerd.

Op basis van de onderzoeksconclusie is er gekozen voor het gebruik van een DAC-chip, aangestuurd door een microcontroller, als signaalgenerator om het signaal van de Rogowski-spoel te simuleren.

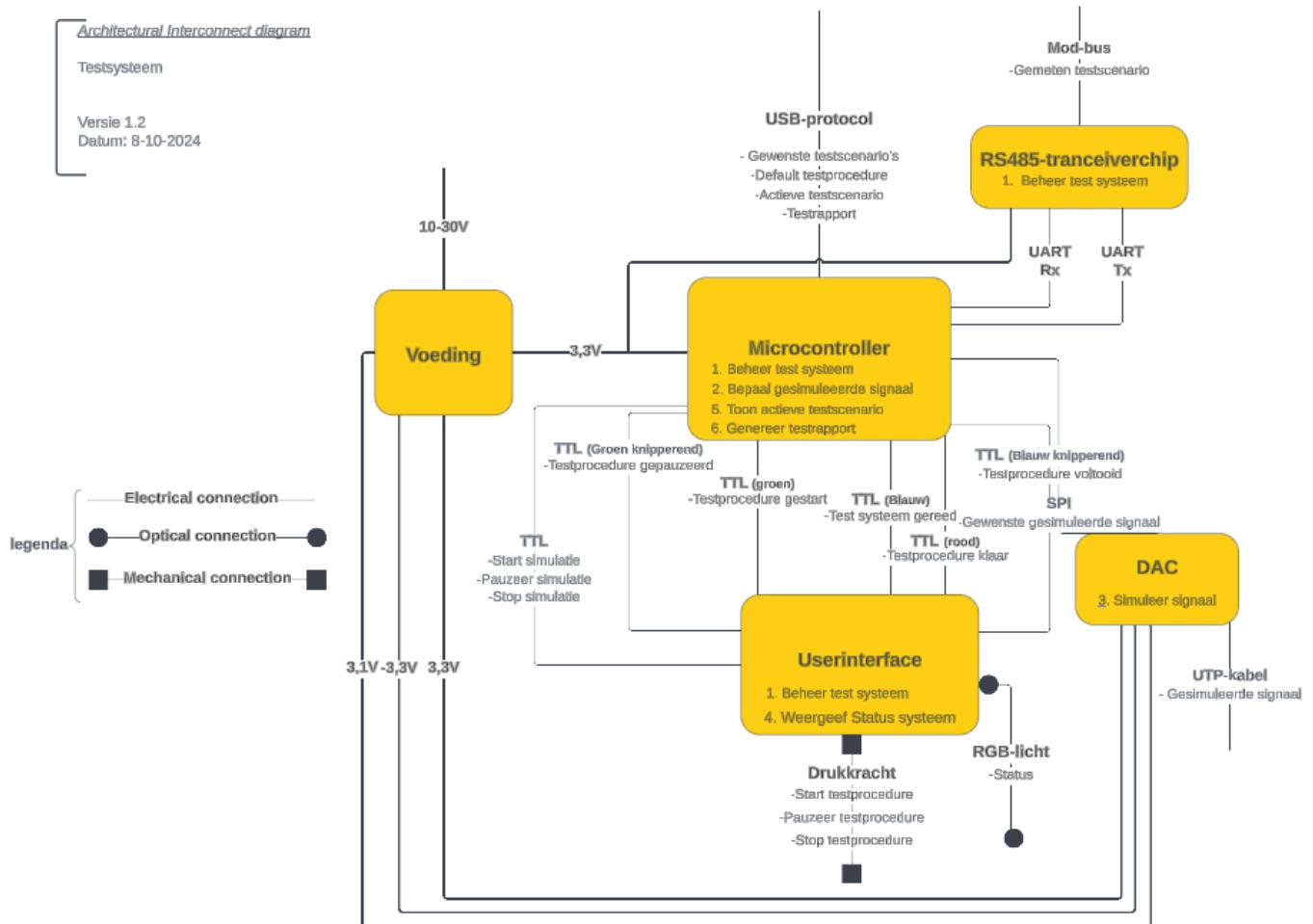
Om het actieve testscenario weer te geven, is ervoor gekozen om het display van de PC van de testengineer te gebruiken. Aangezien er al een gebruikersinterface op de PC aanwezig is voor het instellen van de gewenste testscenario's, zal ook het actieve testscenario in deze interface worden getoond. Hierdoor is er geen extra deelsysteem nodig dat alleen verantwoordelijk is voor het weergeven van het actieve testsenario, wat ruimte op de PCB bespaart en kosten vermindert.

Voor het weergeven van de systeemstatus wordt gebruikgemaakt van een RGB-LED. Hiermee kunnen drie verschillende statussen effectief aan de gebruiker worden getoond door middel van verschillende lichtsignalen. RGB-leds zijn doorgaans goedkoop en eenvoudig aan te sturen, wat de keuze verklaart.

Om de testprocedure te kunnen starten, pauzeren en stoppen wordt er een knop gebruikt op het bedieningspaneel. Dit is een eenvoudige en kosteneffectieve manier om de testprocedure te reguleren.

#### 4.2 Deelsystemen

De volgende Architectural Interconnect Diagram (AID) toont de verschillende deelsystemen van het architectuurontwerp, samen met hun interconnecties die beschrijven hoe ze met elkaar verbonden zijn.



Figuur 7, de AID van het testsysteem

#### 4.2.1 DAC

Het genereren van het gewenste simulatiesignaal wordt gedaan door het deelsysteem DAC. De DAC ontvangt een digitaal signaal via het SPI-dataprotoocol en zet dit om in het gewenste analoge signaal, dat vervolgens via een UTP-kabel naar het Smart Device wordt gestuurd. Het is hierbij belangrijk dat de DAC een hoge resolutie heeft om het Smart Device betrouwbaar te kunnen testen. Ook moet het deelsysteem toepasbaar zijn om meerdere signalen tegelijk te kunnen genereren. De onderbouwingen van de unitspecificaties zijn terug te vinden in de bijlage **{Bijlage D Architectuurontwerp}**.

##### Unitspecificaties

**SPEC 1.1:** De DAC heeft een resolutie van 24 bits of hoger.

**SPEC 1.2:** De DAC moet minimaal 3 verschillende signalen te gelijk kunnen genereren.

**SPEC 1.3:** De DAC is in staat om de drie verschillende signalen elk 8 keer te dupliveren.

**SPEC 1.4:** De DAC moet een samplefrequentie hebben van minimaal het dubbele van de maximale frequentiecomponent (1300 Hz).

**SPEC 1.5:** De DAC moet in staat zijn om zowel positieve als negatieve signalen te genereren.

#### 4.2.2 Microcontroller

De microcontroller vormt het brein van het systeem en is daarmee een kritiek onderdeel van het testsysteem. Deze communiceert met de verschillende deelsystemen, stuurt ze aan, vraagt data op van deze systemen, en beheert zodoende het testsysteem. Daarnaast communiceert de microcontroller met externe systemen, zoals het Smart Device en de PC. De microcontroller ontvangt de gewenste testscenario's via het USB-protocol en berekent vervolgens het benodigde simulatiesignaal op basis van deze scenario's. Het is essentieel dat de microcontroller voldoende rekencapaciteit en werkgeheugen heeft om het simulatiesignaal nauwkeurig te kunnen berekenen. Ook is het verantwoordelijk voor het opstellen en doorsturen van het testrapport, waarin de vooraf ingestelde testscenario's worden vergeleken met de uitgevoerde en gemeten testresultaten van het Smart Device.

##### Unitspecificaties

**SPEC 2.1:** De microcontroller kan data doorsturen via het USB-protocol.

**SPEC 2.2:** De microcontroller kan data doorsturen via het SPI-protocol.

**SPEC 2.3:** De microcontroller kan pinnen hoog (3.3V) of laag (0V) zetten ten behoeve van het aansturen van de RGB-led.

**SPEC 2.4:** De microcontroller kan een logisch hoog (3.3V) of laag (0V) signaal registreren.

**SPEC 2.5:** De microcontroller kan data sturen via de UART-protocol

#### 4.2.3 Userinterface

Het userinterface-deelsysteem bestaat uit een bedieningspaneel met een aantal knoppen en een RGB-led. Hiermee kan de testengineer de testprocedure starten, pauzeren en stoppen, en de status van het systeem bekijken. De userinterface zendt verschillende lichtsignalen uit voor de gereed-, start-, pauze- en stopstatus van de testprocedure, en laat ook zien wanneer de testprocedure voltooid is.

**SPEC 3.1:** Bij het indrukken van de startknop wordt er een startsignaal (laag signaal, 0V) doorgegeven om de testprocedure te starten.

**SPEC 3.2:** Bij het indrukken van de pauzeerknop wordt er een pauzeersignaal (laag signaal, 0V) doorgegeven om de testprocedure te pauzeren.

**SPEC 3.3:** Bij het indrukken van de stopknop wordt er een stopsignaal (laag signaal, 0V) doorgegeven om de testprocedure te stoppen.

**SPEC 3.4:** De drukknop levert geen denderend signaal bij het indrukken van de knop.

**SPEC 3.5:** De RGB-led kan een blauw licht uitzenden (gereed).

**SPEC 3.6:** De RGB-led kan een groen licht uitzenden (testprocedure gestart).

**SPEC 3.7:** De RGB-led kan een groen knipperend licht uitzenden (testprocedure gepauzeerd).

**SPEC 3.8:** De RGB-led kan een blauw knipperend licht uitzenden (testprocedure voltooid).

**SPEC 3.9:** De RGB-led kan een rood licht uitzenden (testprocedure gestopt).

#### 4.2.4 RS485- transceiverchip

De RS485-tranceiverchip dient als intermedium tussen het Smart Device en de microcontroller. De unit zorgt ervoor dat het Modbus-protocol (RTU) wordt omgezet naar de UART-protocol. Hierdoor kan de microcontroller communiceren met het Smart Device.

**SPEC 4.1:** De RS485-tranceiverchip zet het Modbus-protocol om in een UART-protocol.

#### 4.2.5 Voeding

Het deelsysteem voeding zorgt ervoor dat alle deelsystemen van het testsysteem de gewenste spanningen krijgen. De ingangsspanning van het deelsysteem voeding is 10-30 Volt. Deze ingangspanning moet worden omgezet naar 3.3 en -3.3V. De meeste deelsystemen werken op 3.3V echter heeft de DAC ook een negatieve spanning nodig om zowel positieve als negatieve signalen te kunnen genereren. Het is belangrijk dat de uitgangspanningen van de voeding stabiel en zuiver zijn en dat de voeding genoeg stroom kan leveren, zodat de andere deelsystemen goed kunnen functioneren.

**SPEC 5.1:** Het deelsysteem voeding moet kunnen werken met een ingangspanningsbereik van 10-30 Volt.

**SPEC 5.2:** De voeding levert een gewenste spanning van 3.3 en -3.3Volt met een maximale afwijking van 5%.

**SPEC 5.3:** De voeding moet minimaal de benodigde stroom kunnen leveren die het testsysteem verbruikt wanneer het actief is.

### 4.3 Interfaces

In deze paragraaf worden alle interfaces beschreven met de verschillende deelsystemen

#### 4.3.1 Voeding en alle deelsystemen

De voeding zorgt ervoor dat alle deelsystemen de gewenste spanning krijgen, zoals gespecificeerd in **SPEC 6.1**.

**ISPEC 1.1:** De voeding voorziet de microcontroller met een spanning van 3.3 Volt.

**ISPEC 1.2:** De voeding voorziet de DAC met een spanning van 3.3, -3.3Volt en 3.1Volt.

**ISPEC 1.3:** De voeding voorziet de RS485- tranceiverchip met een spanning van 3.3 Volt.

#### 4.3.2 Microcontroller en DAC (SPI)

De microcontroller communiceert met de DAC via het SPI-protocol. Het berekende gewenste signaal wordt digitaal doorgestuurd naar de DAC via het SPI-protocol en omgezet naar het gewenste analoge signaal.

**ISPEC 2.1:** Het berekende gewenste signaal wordt omgezet naar een analoog signaal.

#### 4.3.3 Microcontroller en Userinterface

De userinterface stuurt start-, pauzeer- en stopsignalen door naar de microcontroller via TTL-lijnen. Daarnaast ontvangt de userinterface hoge (3.3V) of lage (0V) signalen, zodat de RGB-led de juiste kleurenlicht kan weergeven voor elke status.

**ISPEC 3.1:** De userinterface stuurt een laag signaal van 0 volt naar de microcontroller als startsignaal.

**ISPEC 3.2:** De userinterface stuurt een laag signaal van 0 volt naar de microcontroller als stopsignaal.

**ISPEC 3.3:** De userinterface stuurt een laag signaal van 0 volt naar de microcontroller als pauzeersignaal.

**ISPEC 3.4:** De userinterface zendt blauw licht als de status van het testsysteem “gereed” is.

**ISPEC 3.5:** De userinterface zendt groen licht uit als de status van het testsysteem “testprocedure gestart” is.

**ISPEC 3.6:** De userinterface zendt groen knipperend licht uit als de status van het testsysteem “testprocedure gepauzeerd” is.

**SPEC 3.7:** De userinterface zendt blauw knipperend licht uit als de status van het testsysteem “testprocedure voltooid” is.

**ISPEC 3.8:** De userinterface zendt rood licht uit als de status van het testsysteem “testprocedure gestopt” is.

#### 4.3.4 Microcontroller en RS485- tranceiverchip

De interface tussen de microcontroller en de RS485-transceiverchip verloopt via het UART-protocol. Hiermee worden de UART\_TX- en RX-lijnen geconverteerd door de chip naar het Modbus-protocol, waarbij differentiële signaleering wordt toegepast.

**ISPEC 4.1:** De microcontroller kan data verzenden via het Modus-protocol.

**ISPEC 4.2:** De microcontroller kan data ontvangen via het Modbus-protocol.

#### 4.4 Traceability

In de traceability tabel hieronder wordt geverifieerd of de units alle functionele requirements van het systeem dekken. Met de specificaties die zijn opgesteld zouden alle functionele requirements behaald kunnen worden.

Eisen ↓	Units →	Microcontroller	DAC	Userinterface	RS485-tranceiverchip	Voeding
REQ-1.1						
REQ-1.2						
REQ-1.3						
REQ-1.4						
REQ-1.5						
REQ-1.6						
REQ-2.1						
REQ-2.2						
REQ-2.3						
REQ-2.4						
REQ-2.5						
REQ-3.1						
REQ-3.2						
REQ-3.3						
REQ-3.4						
REQ-3.5						
REQ-3.6						
REQ-3.7						
REQ-3.8						
REQ-4.1						
REQ-4.2						
REQ-4.3						
REQ-4.4						
REQ-4.5						
REQ-5.1						
REQ-6.1						
REQ-NF1						
REQ-NF2						
REQ-NF3						
REQ-NF4						
REQ-NF5						

Legenda	
Must-Have	Blue
Should-Have	Orange
Could-Have	Grey
Van toepassing	Dark Blue
Niet van toepassing	Yellow

Tabel 2, traceability tabel

## Detailontwerp fase (Detail Design Phase)

### 5 Detailontwerp

In de detailfase worden keuzes voor componenten en ontwerp, evenals de implementatie van hardware en software voor elk deelsysteem, uitgewerkt. Voor het vinden van geschikte elektronische componenten heeft de afstudeerde gebruikgemaakt van Octopart, een zoekmachine voor het vergelijken van componenten op basis van categorie, prijs, beschikbaarheid, en specificaties.

Voor uitgebreide details over het ontwerp en de componentkeuzes dient de bijlage te worden geraadpleegd **{Bijlage E: Detailontwerp fase}**.

#### 5.1 Herontwerp

In het eerste ontwerp lukte het de afstudeerde niet om een functionerend product op te leveren vanwege problemen met de DAC. Daarom is een herontwerp gemaakt met een nieuwe DAC-chip. De overige deelsystemen zijn alleen op enkele punten aangepast, zoals de USB-interface (microcontroller) en de RGB-LED (user interface). De rest functioneerde naar behoren en vereiste geen verdere aanpassingen. Op de DAC na zijn alle componenten gebaseerd op de oorspronkelijke specificaties van versie 1 van het testsysteem. De keuze om de overige componenten ongewijzigd te laten, was tijds efficiënt en bood zekerheid dat het systeem goed zou functioneren. In het hoofdstuk 'Aanbevelingen' wordt een nieuwe microcontroller voorgesteld voor toekomstige versies.

## 5.2 DAC

Een van de belangrijkste deelsystemen van het testsysteem is de DAC (Digital-to-Analog Converter). Dit deelsysteem is verantwoordelijk voor het genereren van het gewenste simulatiesignaal. Het is dus van essentieel belang dat de juiste DAC-chip wordt gekozen, die nauwkeurige signaalomzetting kan bieden en voldoet aan de gestelde eisen. Op basis van het architectuurontwerp zijn de volgende specificaties voor de DAC vastgelegd:

- De DAC heeft een resolutie van 24 bits of hoger (**SPEC 1.1**).
- De DAC moet minimaal 3 verschillende signalen te gelijk kunnen genereren (**SPEC 1.2**).
- De DAC is in staat om de drie verschillende signalen elk 8 keer te dupliveren (**SPEC 1.3**).
- De DAC moet een samplefrequentie hebben van minimaal het dubbele van de maximale frequentiecomponent (1300 Hz) (**SPEC 1.4**).
- De DAC moet in staat zijn om zowel positieve als negatieve signalen te genereren. (**SPEC 1.5**)

### 5.2.1 Probleem met de AD1934WBSTZ-RL

Aanvankelijk werd, de [AD1934WBSTZ-RL](#) DAC-chip gekozen voor de eerste versie van het testsysteem. Ondanks uitgebreide testen tijdens de realisatiefase lukte het echter niet om deze DAC correct werkend te krijgen. Er is contact opgenomen met de fabrikant en ontwerpbestanden zijn gedeeld, maar de oorzaak van het probleem bleef onduidelijk. De afstudeerde vermoedde dat het probleem lag in de communicatie tussen de STM32-microcontroller en de DAC via het I2S-protocol. De STM32 verstuurde 24 bits aan data in een 32-bits frame, terwijl de DAC slechts 24 bits verwacht. Dit verschil leidde waarschijnlijk tot problemen waarbij de DAC in standby bleef, omdat de data niet in het juiste formaat aankwam. Vanwege tijdsdruk en de noodzaak om een werkend product te leveren, is gekozen voor een andere DAC-chip. Zie **{1.7}** voor het detailontwerp van de AD1934WBSTZ-RL chip en **{1.2.1}** voor het resultaat van de unittest van de DAC.

### 5.2.2 Overstap naar een 16-bits DAC

Hoewel de oorspronkelijke specificaties een resolutie van 24 bits vereisten, toonde een nauwkeurigheidsanalyse aan dat een 16-bits DAC voldoende zou zijn, met een maximale afwijking van 5,39%, wat binnen de toegestane 6% viel. Door tijdsdruk en de noodzaak om een werkend systeem te leveren, werd besloten over te stappen op een 16-bits DAC. Deze hebben vaak een eenvoudiger SPI/I2C-interface in vergelijking met het I2S-protocol van 24-bits DAC's. Voor meer details, zie de bijlage **{1.2.2}**.

Er zijn drie verschillende 16-bits DAC's met elkaar vergeleken op basis van resolutie, aantal kanalen, nauwkeurigheid en prijs. Hieronder is de vergelijking te zien van deze resultaten:

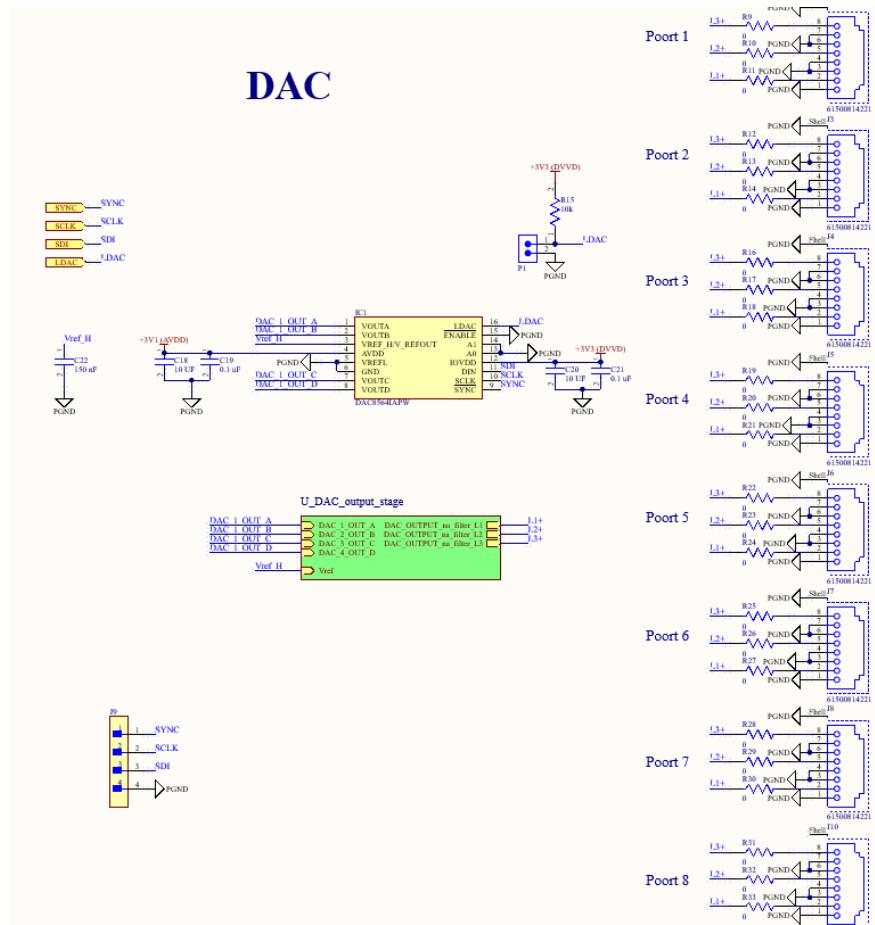
Part Number	Resolutie	Kanalen	Vref	DNL/INL (LSB)	Vsupply	Bemonsteringsnelheid	Interface type	Prijs (€)
1.DAC8564IAP W	16	4	2.5V	$\pm 0.5 / \pm 4$	2.7V to 5.5V	200 kS/s	3-Wire, DSP, Microwire, QSPI, SPI	€14,87
2.AD5664RBR MZ-5	16	4	2.5V	$\pm 1 / \pm 12$	2.7V to 5.5V	220 kS/s	3-Wire, DSP, Microwire, QSPI, SPI	€19,16
3.DAC7632VF T	16	2	2.5V	$\pm 2 / \pm 3$	5V	89 kS/s	Serial	€21,97

### 5.2.3 Componentkeuze

Na de vergelijking viel de keuze op **component nummer 1: DAC8564IAPW**. Vanwege de balans tussen aantal kanalen en signaalnauwkeurigheid, wat deze de meest geschikte optie maakte. Voor meer details zie de bijlage {1.2.3}.

### 5.2.4 Hardware ontwerp

Figuur 8 toont de aanbevolen schakeling van de DAC volgens de datasheet (Texas Instruments, 2011) [2]. Testpinnen zijn toegevoegd aan de SPI-datalijnen en de LDAC-lijn, zodat de gebruiker de DAC goed kan unitesten. Daarnaast is er een duplicatiestage met 8 poorten en een DAC-output stage aanwezig, die verder in deze paragraaf worden uitgewerkt.



Figuur 8, schema van DAC-deelsysteem

### 5.2.5 Output stage

Om zowel positieve als negatieve signalen te genereren (**SPEC 1.5**), is een bipolaire outputstage ontworpen, waarbij de OPA1652AID opamp is gekozen voor zijn lage ruisdichtheid en harmonische vervorming. Voor meer details raadpleeg bijlage {1.2.4.1}.

### 5.2.6 Duplicatie fase

Om te voldoen aan **SPEC-1.3**, werd een duplicatiestage ontworpen met de RS485-connector en dezelfde pinout als de MEM101, zodat de juiste signalen gemeten worden (Mikronika, 2022) [3]. 0-ohm weerstanden werden toegevoegd voor handmatige poortselectie en unit testing. Er zijn ook simulaties uitgevoerd, waarbij de ingangsimpedantie van de MEM101 is meegenomen (MCP3914, n.d.) [4]. Deze simulaties toonden geen verschil in het uitgangssignaal met of zonder belasting; voor schema's en details, zie de bijlage {1.2.4.2}.

### 5.3 Microcontroller

De microcontroller vormt het brein van het systeem en is daarmee een kritiek onderdeel van het testsysteem. Deze communiceert met de verschillende deelsystemen, stuurt ze aan, vraagt gegevens op van deze systemen, en beheert zodoende het testsysteem en communiceert met externe systemen. Er is gekozen om gebruik te maken van de microcontrollers uit de STM32F4-serie (zie ontwerpbesluiten).

#### Opmerking:

*In het eerste ontwerp was het noodzakelijk dat de microcontroller een I2S-interface had (SPEC 2.5) om de DAC aan te sturen.*

De microcontroller moet aan de volgende specificaties voldoen:

- **SPEC 2.1:** De microcontroller kan communiceren via het USB-protocol.
- **SPEC 2.2:** De microcontroller kan communiceren via het SPI-protocol.
- **SPEC 2.3:** De microcontroller kan pinnen hoog (3.3V) of laag (0V) zetten ten behoeve van het aansturen van de RGB-led.
- **SPEC 2.4:** De microcontroller kan een logisch hoog (3.3V) of laag (0V) signaal registreren.
- **SPEC 2.5:** De microcontroller kan een digitaal signaal doorsturen via het I2S-protocol<sup>1</sup>.
- **SPEC 2.6:** De microcontroller kan communiceren via het UART-protocol.

Hieronder zijn een aantal microcontrollers van de STM32F4 serie met elkaar vergeleken.

Microcontroller	Kloksnelheid (Hz)	Flash	Ram	Aantal I2S interfaces	Aantal USART /UART-interfaces	Aantal I/O pinnen	USB-interface	Prijs (€)
1. STM32F405RGT7TR	168 MHz	1MB	192 KB	2	4/2	50	USB 2.0	11,75
2. STM32F446RET6	180 Mhz	512 KB	128 KB	3	4/2	50	USB 2.0	9,35
3. STM32F401RCT6TR	84 MHz	256KB	64 KB	2	3/0	50	USB 2.0	5,11

#### 5.3.1 Componentkeuze

Er is gekozen voor de 144 pin package van component nummer 2, De STM32F446ZET7. Deze keuze is gemaakt vanwege de benodigde drie I2S-interfaces en het voldoende beschikbare geheugen voor DSP-bewerkingen. Voor verdere details, zie de bijlage {1.3.1}.

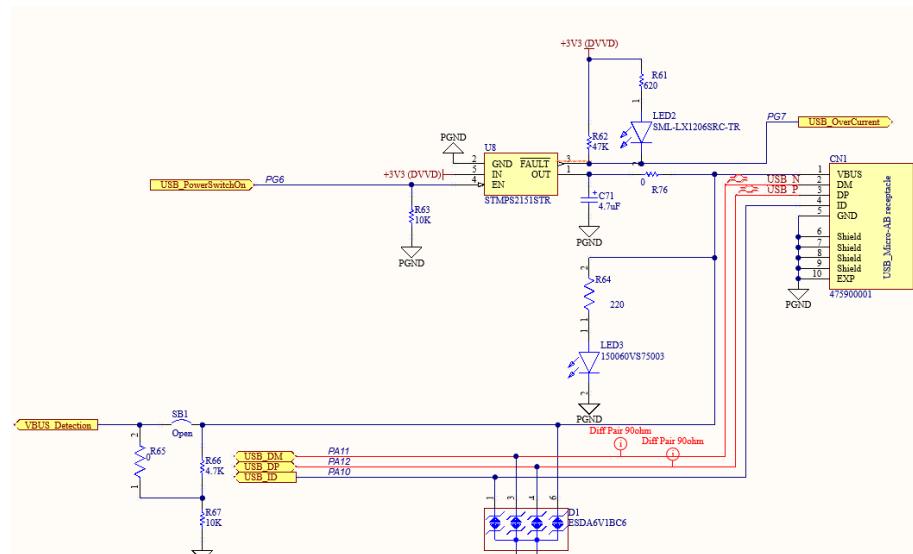
#### 5.3.2 USB-interface

De microcontroller beschikt over een interne USB 2.0 OTG\_FS-interface (STMicroelectronics, 2024) [5]. Echter vereist het testsysteem enkele externe componenten (zoals een connector en ESD-bescherming) om de USB-interface volledig operationeel te maken. Voor de connector is er gekozen voor de micro USB B-connector 475900001. Om het testsysteem tegen ESD te beschermen is er gekozen voor de ESD-beschermingschip ESDA6V1BC6. “ESD protection of STM32 MCUs and MPUs” (STMicroelectronics, 2022) [6]. Een spanningsdeler en de STMPS2141STR-chip worden gebruikt voor Vbus-sensing en overstroombeveiliging. Status-LED's geven hierbij de verbinding en eventuele overstroom aan. In figuur 9 is de USB-interface schema te zien. Voor meer details over het ontwerp en de componentkeuzes, zie de bijlage {1.3.2}.

<sup>1</sup> Hierbij is het belangrijk dat de microcontroller minimaal twee I2S interfaces heeft om 3 verschillende signalen te kunnen genereren.

### 5.3.3 Hardware ontwerp

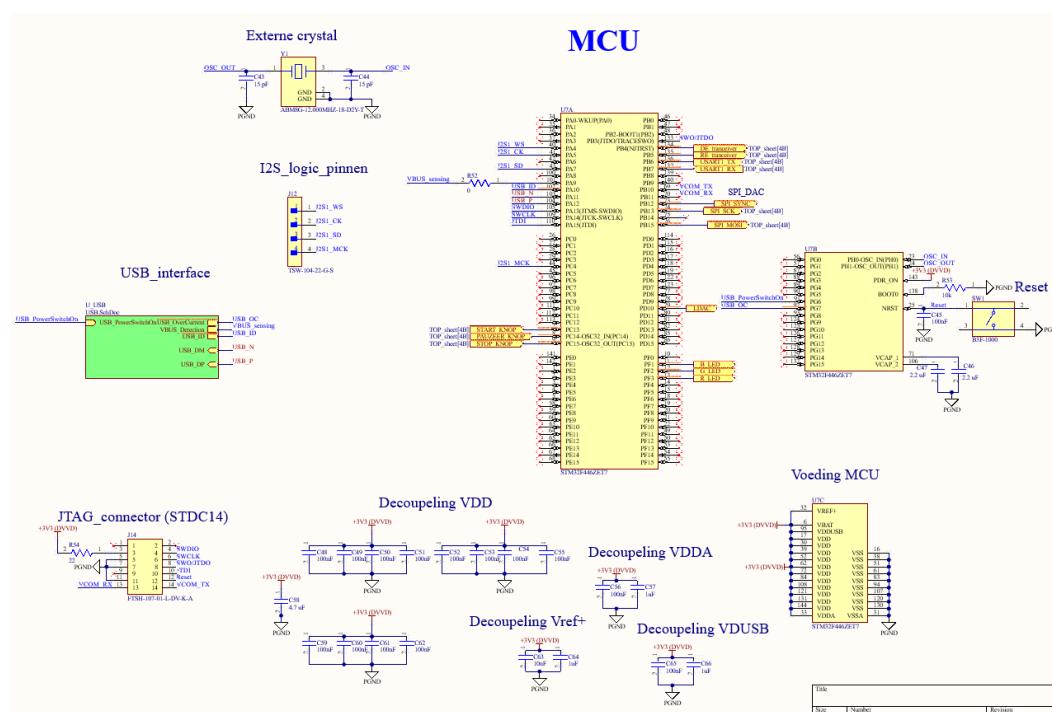
In deze paragraaf wordt de schakeling van het deelsysteem van de microcontroller verder in detail besproken.



Figuur 9, Schakeling van de USB- interface.

### 5.3.4 Schakeling microcontroller

In figuur 10 wordt de volledige schakeling van het microcontroller-deelsysteem getoond. Er is een extern 12 MHz kristal (**ABM8G-12.000MHZ-18-D2Y-T**) toegevoegd voor een stabiele klok, en de **FTSH-107-01-L-DV-K-A** connector, wat eenvoudige debugging mogelijk maakt met de STLink V3Set (STMicroelectronics, 2023) [7]. Daarnaast zijn ontkoppelcondensatoren geplaatst volgens de aanbevelingen uit de datasheet, en is een resetknop geïntegreerd (STMicroelectronics, 2021) [8]. Voor meer details zie bijlage {1.3.3}.



Figuur 10, Schakeling van het deelsysteem microcontroller.

## 5.4 Voeding

Het deelsysteem voeding moet ervoor zorgen dat alle deelsystemen van het testsysteem de gewenste spanningen krijgen en moet van voldoende stroom kunnen voorzien. Voor de voeding zijn de volgende specificaties opgesteld.

**SPEC 5.1:** Het deelsysteem voeding moet kunnen werken met een ingangsspanningsbereik van 10-30 Volt.

**SPEC 5.2:** De voeding levert een gewenste spanning van 3.3 en -3.3 Volt met een maximale afwijking van 5%.

**SPEC 5.3:** De voeding moet minimaal de benodigde stroom kunnen leveren die het testsysteem verbruikt wanneer het actief is.

**Opmerking:**

Deze specificatie is toegevoegd op basis van de sterke aanbeveling in de datasheet van de DAC-chip [12].

**SPEC 5.4:** Het analoge gedeelte van de DAC moet gevoed worden met een aparte lineaire spanningsregelaar.

Binnen de PCB zijn er drie voedingssecties: het analoge gedeelte, het digitale gedeelte, en de negatieve voeding. Om componentkeuzes te kunnen maken, is er een schatting gemaakt van de minimale benodigde stroom die elk van deze secties moet kunnen leveren **SPEC 5.3**. Deze schattingen zijn gebaseerd op de typische/maximum voedingsstromen die in de datasheets van de IC's staan beschreven, evenals op simulaties die zijn uitgevoerd met LTspice voor de filtering stage van de DAC. In tabel 3 staat hoeveel stroom elke sectie minimaal moet kunnen leveren.

Voedingssectie	Benodigde Stroom
Analoge sectie (voedingspinnen voor de DAC en de positieve voeding voor de opamps)	100 mA (Datasheet en simulatie)
Digitale sectie (alles behalve de analoge sectie)	405 mA (Datasheet)
Negatieve voeding (negatieve voeding voor de opamps)	24mA (simulatie)
<b>Totaal</b>	529 mA

Tabel 3, Stroom analyse

### 5.4.1 3.3Volt en -3.3Volt

Voor de omzetting van 10-30 Volt naar 3.3 Volt en -3.3 Volt is gekozen voor schakelende spanningsregelaars. Een step-down regelaar wordt gebruikt voor de 3.3 Volt en een charge pump voor de -3.3 Volt. Voor de volledige ontwerpkeuze en details, zie de bijlage {1.4.1}.

#### 5.4.1.1 3.3Volt

Voor de omzetting van 30 Volt naar 3.3 Volt wordt gebruik gemaakt van een step-down spanningsregelaar. Hieronder worden drie mogelijke chips met elkaar vergeleken:

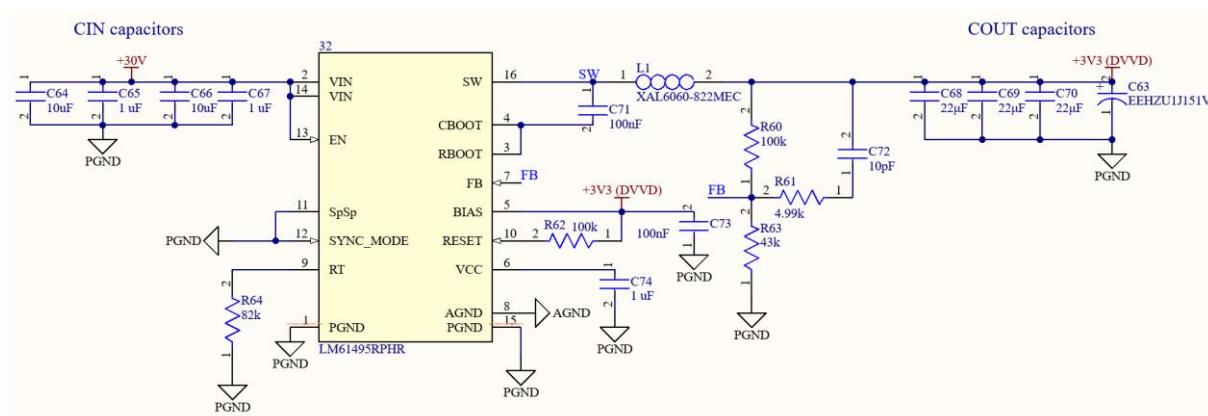
Part Number	Vin min/Vma V.	Vout max	I out max	Efficiency up to (%)	Output tollerantie (%)	Switching frequency (min/max)	Prijs (€)
1. LM61495RP HR	3/36	1/34.2V	6A	93%	+ - 0.8%	200/ 2200 kHz	4,33
2. LMR51430X DDCR	8/40	95%*Vi n	3A	89,2%	±1.5%	500/ 1.1 MHz	1,39
3. LM60440DR PKR	3.8/36	1/24	4A	89%	±1.5%	1 MHz	2.50

#### Componentkeuze

Er is gekozen voor **component nummer 1, de LM61495RPHR**, vanwege het hoogste rendement, lage output tolerantie, en een lage switching frequentie van 200 kHz, wat EMI minimaliseert. Voor verdere details, zie de bijlage {1.4.1.1}.

#### Schakeling

De schakeling van de LM61495 voedingschip wordt getoond in figuur 11. De externe componenten en hun plaatsing zijn gebaseerd op de aanbevelingen van de datasheet (Texas Instruments Incorporated, 2020) [11]. Er zijn ook simulaties uitgevoerd, waarbij de schakeling voldoet aan de maximale afwijking gespecificeerd in **SPEC 5.2**, zie bijlage {1.4.1.1}.



Figuur 11, schakeling van de LM61495 voedingschip

## 5.4.1.2 -3.3Volt

Na de omzetting van 30 Volt naar 3.3 Volt is er nu alleen nog een charge pump spanningsregelaar nodig om de spanning van 3.3 Volt om te zetten naar -3.3 Volt. Hieronder worden twee mogelijke chips met elkaar vergeleken.

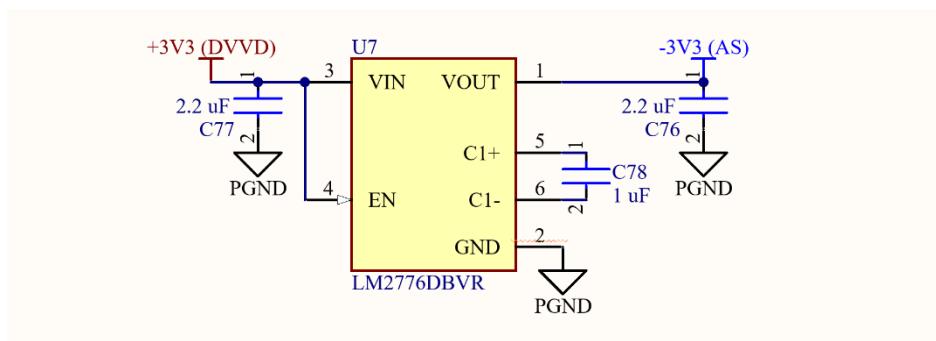
Part Number	Vin min/Vma V.	Vout max	I out max	Efficency up to (%)	Switching frequency (min/max)	Prijs (€)
1. LM2776DBVR	2.7/5.5	-VIN	200 mA	91%	2MHz	1,39
2. ADM8828AR TZ-REEL7	1.5/5.5	-VIN	25 mA	90%	120 kHz	3.35

## Componentkeuze

Er is gekozen voor **component nummer 1, de LM2776DBVR**, vanwege de hogere uitgangsstroom van 200mA, wat voldoende is voor het voeden van de opamps; voor meer details, zie de bijlage {1.4.1.2}.

## Schakeling

In figuur 12 is de schakeling te zien van de chip volgens de aanbevelingen van de datasheet (Texas Instruments Incorporated, 2015) [9].



Figuur 12, schakeling van de de LM2776DBVR chip

#### 5.4.2 LDO

Om aan **SPEC 6.4** te voldoen is er een aparte lineaire spanningsregelaar nodig om de 3.3V output voeding van de switching voltage regulator te reguleren naar de gewenste voeding voor de DAC. De DAC heeft een minimale power supply nodig van 3V [12]. Om de spanning van 3.3V naar 3V om te zetten zal gebruik gemaakt worden van een LDO die heel goed werkt bij kleine spanningsverschillen.

Hieronder zijn een aantal LDO- chips met elkaar vergeleken.

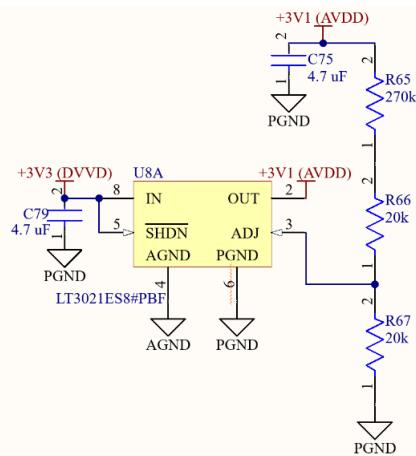
Part Number	Vin min/Vmax V.	Dropout voltage min/max	I out max	Load regulation	PSRR	Prijs (€)
1. LT3021ES8#PBF	1/10	155mV	500 mA	0,2%	70	6,08
2. MAX604CSA	2.7/11.5	240mV	500 mA	0,9%	60	5.70
3. MAX1793EU E25+T	2.5/5.5	270mV	1A	0,7 %	55	4.13

##### 5.4.2.1 Componentkeuze

Er is gekozen voor **component nummer 1, de LT3021ES8#PBF** vanwege de lage dropout voltage van 155mV en de hoge PSRR van 70 dB, wat zorgt voor een stabiele 3V output; voor verdere details, zie de bijlage {1.4.2.1}.

##### 5.4.2.2 Schakeling

De schakeling van de LDO is in figuur 13 te zien. Met behulp van weerstanden R65, R66 en R67 is een verstelbare uitgangsspanning van 3.1 Volt gecreëerd, berekend volgens de verstelbare uitgangsformule in de datasheet (Analog Devices, 2021) [10].



Figuur 13, schakeling van de LDO

#### 5.4.3 Connector

De afstudeerde heeft ervoor gekozen om de banaanplugconnector 2269-2 te gebruiken vanwege het gebruik van banaankabels in Stedin en het feit dat de labvoeding banaanpluggen gebruikt.

## 5.5 RS485- tranceiverchip

De RS485-transceiverchip dient als intermedium tussen het Smart Device en de microcontroller en zet het Modbus-protocol om in een UART-protocol zodat het testsysteem kan communiceren met het Smart Device. Het deelsysteem moet voldoen aan de volgende specificatie:

**SPEC 4.1:** De RS485-tranceiverchip zet de Modbus-protocol om in een UART-protocol.

Hieronder zijn een aantal RS485-tranceiverchips met elkaar vergeleken

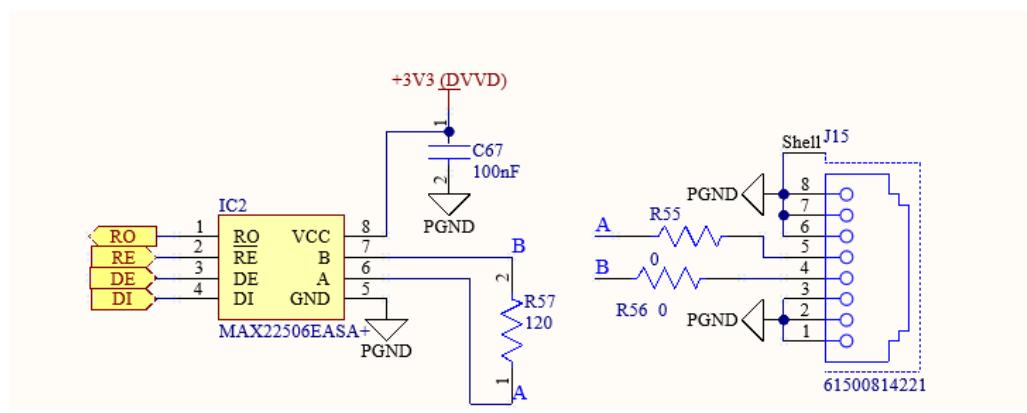
Part Number	Vin min/Vmax V.	Temperatuurbereik	ESD-bescherming	Datasnelheid	Duplex	Prijs (€)
1. MAX3485EP A+	3.3	-40/ 85	-	10 Mb/s	Half duplex	7,96
2. SN65HVD72 DR	3/3.6	-40/125	+- 15 kV	250 kb/s	Half duplex	2.73
3. MAX22506E ASA+	3/5.5	-40/125	+- 15 kV	50 Mb/s	Half duplex	3,89

### 5.5.1 Componentkeuze

Component nummer 2, de SN65HVD72DR, is uitgesloten vanwege de beperkte datasnelheid van 250 kb/s. Industriële toepassingen vereisen vaak een hogere datasnelheid tot 50 Mb/s. Daarom is gekozen voor **component nummer 3, de MAX22506EASA+**. Deze chip biedt de hoogste datasnelheid van 50 Mb/s en heeft ook een hoog temperatuurbereik van -40°C tot 125°C, wat extra flexibiliteit biedt voor toekomstig gebruik in industriële omgevingen.

### 5.5.2 Schakeling

In Figuur 14 is de schakeling van de RS485-transceiverchip te zien. De afstudeerde heeft gekozen voor de 61500814221 RS485-connector, die ook al eerder is gebruikt voor de DAC-poorten. Daarnaast zijn er 0-ohm weerstanden toegevoegd als testpunten voor de realisatiefase.



Figuur 14, schakeling van de RS485-transceiverchip

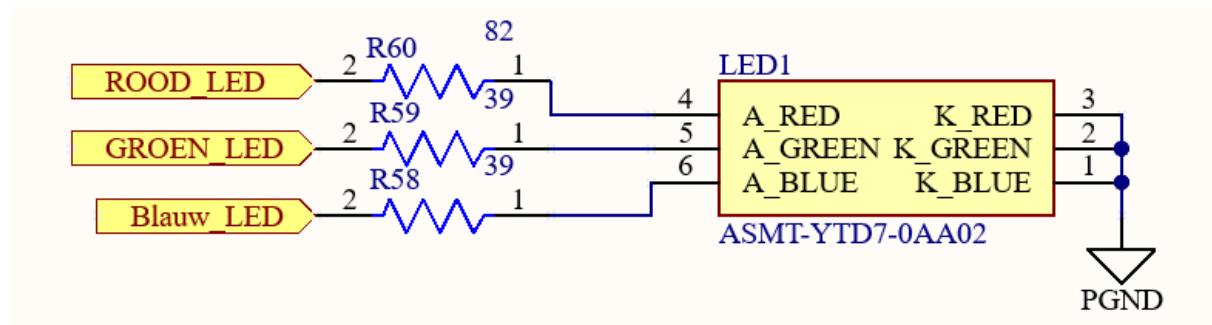
## 5.6 Userinterface

Het userinterface-deelsysteem bestaat uit een bedieningspaneel met een aantal knoppen en een RGB-led. Het zorgt ervoor dat de testengineer de testprocedure kan reguleren en de status van het testsysteem kan bekijken.

De userinterface moet voldoen aan de specificaties beschreven in het architectuurontwerp, paragraaf, {4.2.3}.

### 5.6.1 RGB LED

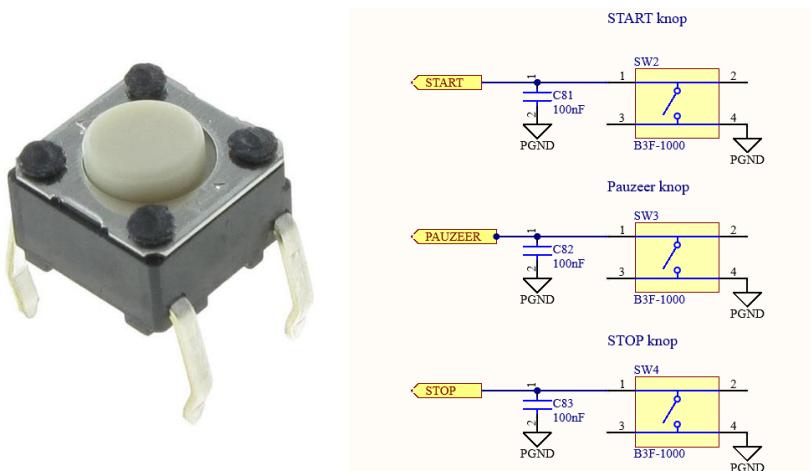
Er is gekozen om de RGB LED direct aan te sturen met de microcontroller, waarbij de ASMT-YTD7-0AA02 is geselecteerd. In de onderstaande figuur is de schakeling van de RGB LED te zien. Voor verdere details over de componentkeuze en het ontwerp, zie de bijlage {1.6.1}



Figuur 15, schakeling van de RGB-LED

### 5.6.2 Bedieningspaneel

Voor het bedieningspaneel zijn drie drukknoppen nodig, waarvoor is gekozen voor de B3F-1000. Deze drukknop is kostenefficiënt en wordt ook binnen Stedin op voorraad gehouden. Om te voldoen aan **SPEC 3.4**, waarbij geen denderend signaal mag ontstaan bij het indrukken, is een 100nF-condensator toegevoegd. In figuur 16 is de schakeling weergeven van het bedieningspaneel.



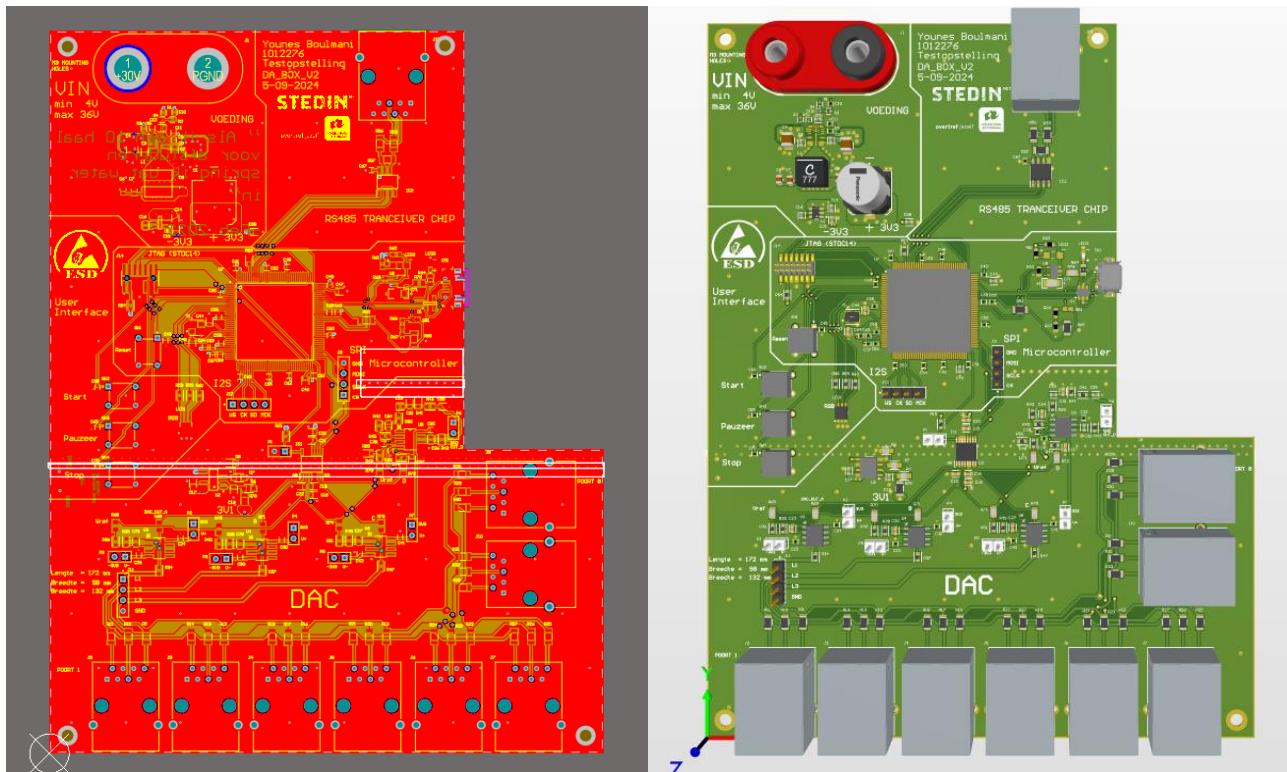
Figuur 16, schakeling van de B3F-1000 drukknop

## 5.7 PCB Design

Design keuze	Onderbouwing
1. GND-plane onder de toplag en signaallayer (waar de analoge signalen lopen) en de dielektrische laag zo dun mogelijk maken	Door een GND-plane direct onder de toplag en signaallayer te plaatsen en de dielektrische laag dun te maken, verlaag je de parasitaire inductie en capacitive koppeling tussen lagen. Dit zorgt voor een betere afscherming van gevoelige analoge signalen tegen externe ruis en verbetert de signaalintegriteit.
2. Het fysiek scheiden van het analoge en digitale deel van de PCB, en het plaatsen van via's bij de scheiding	Het fysiek scheiden van de analoge en digitale delen van de PCB vermindert de kans op ruisoverspraak tussen beide. Door via's te plaatsen bij de scheiding, creëer je een solide verbinding naar de GND-plane, wat helpt om storingen verder te beperken en de signaalintegriteit te waarborgen.
3. Grottere clearance voor 30V net.	Door een grotere clearance in te stellen voor het 30V net volgens de IPC-2221A norm, voorkom je ongewenste effecten zoals kortsluiting. Dit zorgt voor een veiligere en betrouwbaardere PCB.
4. Breedte van tracks volgens IPC-2152 norm	Door de breedte van de sporen te berekenen volgens de IPC-2152 norm, zorg je ervoor dat de sporen de vereiste stroom kunnen verdragen zonder door te smelten of andere ongewenste effecten te veroorzaken.
5. USB-data lijnen traceren met een impedantieprofiel van 90 Ohm	Het volgen van een impedantieprofiel van 90 Ohm voor USB-data lijnen is cruciaal om te voldoen aan de USB-specificaties. Dit voorkomt signaalreflecties en waarborgt een hoge signaalintegriteit, wat essentieel is voor foutloze communicatie.
5. Kort houden van hoogfrequente lijnen zoals USB-data lijnen.	Hoogfrequente lijnen kort houden minimaliseert antennewerking, wat de invloed van EMI van andere hoge-frequentiesignalen vermindert. Dit verbetert de signaalintegriteit.
6. Continuiteit in trace breedte.	Een constante breedte van de traces voorkomt impedantie mismatches, wat cruciaal is voor het behouden van de signaalintegriteit, vooral bij hoge frequenties.
7. Omringing van de switch node pin van de voltage regulator met GND vias.	Het plaatsen van GND vias rondom de switch node pin vermindert EMI, wat zorgt voor een stabielere werking van de voltage regulator.
8. Gebruik van ground polygon op Top en Bottom laag	Het gebruik van ground polygons verlaagt de voedingsimpedantie, wat bijdraagt aan een stabielere stroomtoevoer en verminderen van ruis.

<b>9.</b> Plaatsing van vias voor GND plane dicht bij GND pinnen	Door GND vias zo dicht mogelijk bij de GND pinnen te plaatsen, zorg je ervoor dat de GND-stroom de kortste weg kan nemen. Dit vermindert inductie en verbetert de signaalintegriteit.
<b>11.</b> Volgen van datasheet PCB layout guidelines voor alle IC's	Door de PCB layout guidelines in de datasheets van de IC's te volgen, zorg je ervoor dat de componenten optimaal functioneren en voorkom je ongewenste effecten of storingen.
<b>12.</b> De datum, naam bedrijf en designer geplaatst in de Top overlay (Silkscreen).	Het toevoegen van deze informatie maakt het voor gebruikers en fabrikanten gemakkelijk om de oorsprong en productiegegevens van de PCB te traceren.
<b>13.</b> Plaatsing van mounting holes	Voor als de gebruiker de PCB ergens aan wil vastmaken

In figuur 17 is de 2D view en 3D view van de PCB te zien.



Figuur 17, 2D en en 3D view van het testsysteem

## 5.8 Schema's

Indien de lezer alle schema's van de deelsystemen in een betere weergave wil zien, kan dit door de PDF te bekijken via de volgende link: [[Schema's.pdf](#)].

## 5.9 BOM

Als de lezer interesse heeft in de Bill of Materials, kan deze worden gedownload als Excel-bestand via de volgende link: [[BOM.xlsx](#)].

## 5.10 Softwaredesign

In dit hoofdstuk wordt het softwareontwerp van het testsysteem besproken. Het ontwerp kan worden opgesplitst in twee delen:

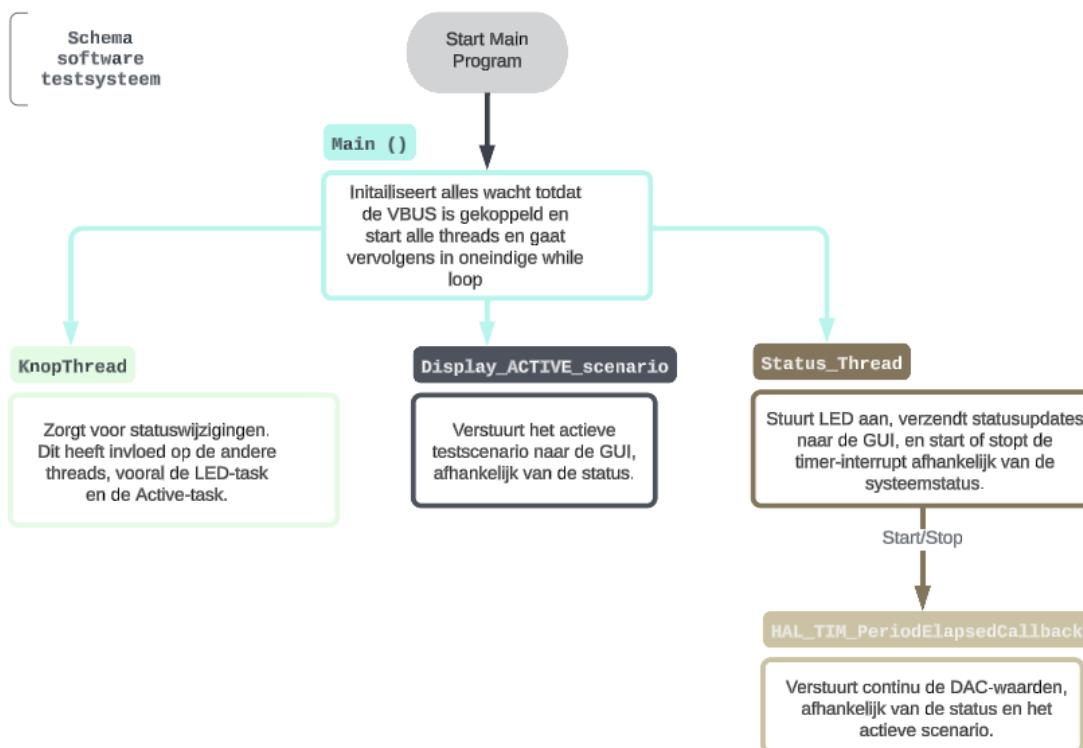
- **Embedded software** (STM32CubeIDE project): Deze code draait op de STM32 microcontroller en beheert de hardwarecomponenten zoals de DAC en de Userinterface [[LINK REPOSITORY](#)].
- **GUI software** (GUI\_Code.py): Dit Python-script draait op de PC en biedt een grafische gebruikersinterface (GUI). Hiermee kan de gebruiker verschillende testparameters instellen en de teststatus in real-time bekijken [[LINK REPOSITORY](#)].

De communicatie tussen de PC en de microcontroller verloopt via het USB-protocol.

### 5.10.1 Embedded Software

De embedded software bestaat uit meerdere threads: main (), KnopThread, Display\_active\_scenario, Status\_thread en een timer interrupt service handler. Elke thread is verantwoordelijk voor specifieke taken, zoals het aansturen van LED's, het controleren van knoppen en het verzenden van testscenario-informatie naar de GUI. De software maakt daarbij gebruik van hardware peripherals zoals timers, SPI en USB voor communicatie en dataoverdracht.

Onderstaand schema toont het softwareontwerp. Alle flowcharts van de threads en de uitleg van de belangrijkste functies die in de code worden gebruikt, zijn te vinden in de bijlage {1.11.1}



Figuur 18, Schema van het softwareontwerp

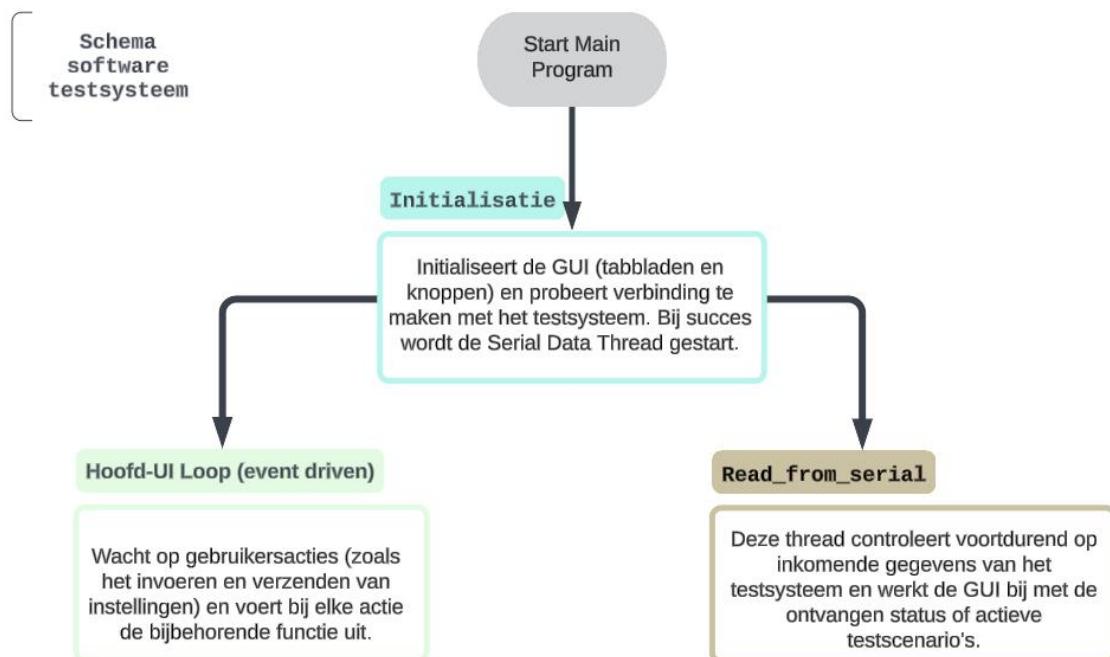
### 5.10.2 GUI software

In dit hoofdstuk wordt het ontwerp van de GUI-software voor het testsysteem besproken. Deze software is ontwikkeld in Python en biedt een grafische gebruikersinterface waarmee de gebruiker testparameters kan instellen, de voortgang van de testprocedure en de status van het testsysteem real-time kan bekijken.

De GUI-software kan worden onderverdeeld in drie hoofdcomponenten:

1. **Initialisatie:** Verantwoordelijk voor het opzetten van de GUI en het tot stand brengen van een seriële verbinding.
2. **Hoofd-UI-loop (Event-driven):** Beheert gebruikersacties en zorgt voor de juiste respons, zoals het verzenden van instellingen of het initiëren van de standaardtestprocedure.
3. **Seriële data-thread:** Voortdurende monitoring van inkomende gegevens van het testsysteem, waarmee de GUI wordt bijgewerkt met de status en het actieve testscenario.

Onderstaand schema toont het softwareontwerp van de GUI en de structuur van de hoofdcomponenten. De flowcharts van het softwareontwerp en de uitleg van de belangrijkste functies die in de code worden gebruikt zijn te vinden in de bijlage {1.11.2}



Figuur 19, Schema GUI software

## Testfase

### 6 Realisatiefase

In dit hoofdstuk worden de unittestfase en de integratietestfase samengevat. Ook wordt het resultaat van de acceptatietest beschreven en is het testrapport in dit hoofdstuk opgenomen.

#### 6.1 Samenvatting unittesten en integratietesten

Tijdens het unittesten van het eerste ontwerp van het testsysteem kwam een fout naar boven door een probleem met de BOM (Bill of Materials), waardoor veel SMD-weerstanden en condensatoren de verkeerde waarden hadden. Dit leidde ertoe dat het testsysteem niet functioneerde. Deze fout is toen gecorrigeerd. Het is echter niet gelukt om de DAC werkend te krijgen, ondanks troubleshooten. Daarnaast ontdekte de afstudeerde een ontwerpfout bij de RGB-LED, waarbij de kathode- en anode kant verkeerd waren aangesloten. Ook bleek er een ontwerpfout te zitten in de spanningsdeler bij de USB-interface, waardoor de microcontroller in het eerste ontwerp defect raakte.

In het nieuwe ontwerp heeft de afstudeerde de ontwerpfouten van de USB-interface en de RGB-LED aangepast, en er is een nieuwe DAC-chip gekozen. Hierdoor zijn de eerdere problemen opgelost, en zijn alle kritieke unit- en integratietesten geslaagd, met uitzondering van de unit- en integratietest met de RS485-transceiver. Vanwege tijdsrestricties en de focus op het behalen van de belangrijkste eisen zijn deze tests niet uitgevoerd. Voor de testcases en resultaten van de unittesten en integratietesten, zie de bijlage **{Bijlage F: Unittestfase}** **{Bijlage G: Integratie testfase}**.

#### 6.2 Testresultaten

In deze paragraaf wordt de acceptatietest resultaat weergeven van de testcase beschreven in **{3.4}**. De overige testresultaten en conclusies bevinden zich in de bijlage **{Bijlage H: Acceptatie testfase}**. Daarnaast wordt ook het acceptatietestrapport weergeven.

##### 6.2.1 Testresultaat en conclusie

In deze paragraaf worden alle testresultaten van de testcase weergegeven, en wordt een conclusie getrokken over de bijbehorende requirements **REQ-3.1[MH]**, **REQ-3.2[SH]**, waarin wordt bepaald of deze zijn behaald.

##### ➤ Testinvoer

Hoofdpagina THD Scenario 1 THD Scenario 2 THD Scenario 3

Test Scenario's

Stroom testscenario 1 (rms,Ampère):

Stroom testscenario 2 (rms,Ampère):

Stroom testscenario 3 (rms,Ampère):

Stroom L1, L2, L3: 20.0 A; THD% = (3e: 15%, 5e: 20%, 7e: 10%, 9e: 8%, 11e: 6%, 13e: 5%)

Stroom L1, L2, L3: 20.0 A; THD% = (3e: 15%, 5e: 5%, 7e: 0%, 9e: 0%, 11e: 0%, 13e: 0%)

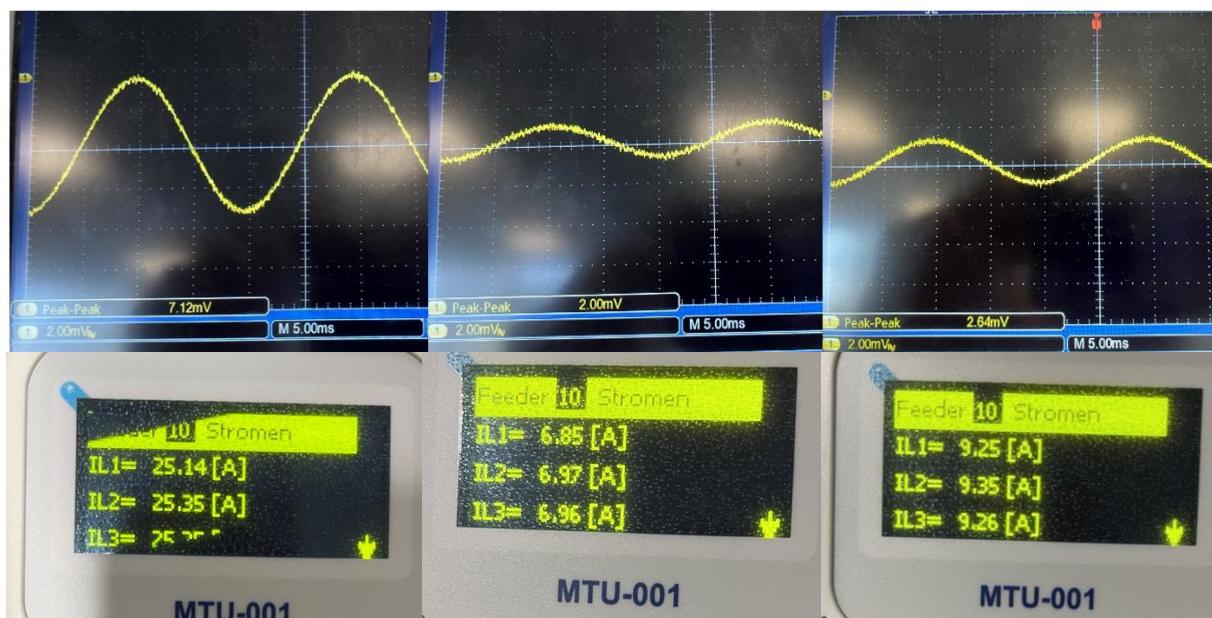
Stroom L1, L2, L3: 20.0 A; THD% = (3e: 30%, 5e: 5%, 7e: 10%, 9e: 0%, 11e: 0%, 13e: 0%)

[Standaard Testprocedure](#)

Figuur 20, Testinvoer van testcase 4

➤ **Testuitvoer**

In figuur 21 zijn het meetresultaat, gemeten met de oscilloscoop, en het meetresultaat van de MEM101 te zien. In tabel 4 en 5 zijn de meetresultaten weergeven.



Figuur 21, Meetresultaten van de stroomtestscenario's, gemeten met de oscilloscoop en de MEM101.

Stroomtestscenario's (A)	Gewenste simulatie signaal (Vpp)	Maximale afwijking 6%. (mV)	<u>Gemeten signaal (mV)</u>	<u>Nauwkeurigheid (%)</u>
25	7,07	± 4,24	7,12	99,3%
6,8	1,92	± 1,15	2	95,8%
9,186	2,60	± 1,56	2,64	98,5%

Tabel 4, meetresultaten gemeten door de oscilloscoop

Stroomtestscenario (A)	Gewenste meetresultaat Smart Device (A)	Maximale afwijking 6% + 0,5% (A)	<u>Gemeten meetresultaat (A)</u>	<u>Nauwkeurigheid (%)</u>
25	25,00	± 1,62	25,35	98,6%
6,8	6,80	± 0,44	6,96	97,6%
9,186	9,19	± 0,60	9,35	98,2%

Tabel 5, meetresultaten gemeten door de MEM101

**Conclusie**

De gemeten stroomtestscenario's vallen binnen de gespecificeerde afwijking van 6%. Dit betekent dat het testsysteem in staat is om de stroomtestscenario's van de standaardtestprocedure correct te simuleren. De testresultaten voldoen daarmee aan de gestelde criteria, waardoor de eisen succesvol zijn behaald. (REQ-3.1[MH], REQ-3.2[SH]).

## 6.2.2 Testrapport

In tabel 6 is het acceptatietestrapport te zien. Hierin wordt weergegeven welke eisen volledig, gedeeltelijk of niet zijn behaald.

Requirements	Behaald?
<b>REQ-1.1[MH]:</b> De testengineer kan na het instellen van alle gewenste testscenario's de testprocedure laten starten.	Behaald
<b>REQ-1.2[MH]:</b> De testengineer kan de testprocedure laten stoppen.	Behaald
<b>REQ-1.3[MH]:</b> De testengineer kan de testprocedure laten pauzeren.	Behaald
<b>REQ-1.4[SH]:</b> De standaard default testprocedure mag niet langer duren dan een kwartier.	Behaald
<b>REQ-1.5[MH]:</b> Het testsysteem communiceert met de PC volgens het USB-protocol.	Behaald
<b>REQ-1.6[CH]:</b> Het testsysteem communiceert met het Smart Device via het Modbus-protocol.	Niet Behaald
<b>REQ-2.1[MH]:</b> Het testsysteem biedt de mogelijkheid om 6 testscenario's uit te voeren voor de testprocedure, zoals weergegeven in tabel 1.	Behaald
<b>REQ-2.2[CH]:</b> De testengineer kan de gewenste stroomtestscenario's instellen binnen een bereik van 5 tot 500 Ampère RMS, met stapgroottes van één duizendste.	Behaald
<b>REQ-2.3[SH]:</b> De testengineer kan de 3e, 5e en 7e harmonischen van de THD% testscenario's instellen binnen een bereik van 5 tot 50% van de amplitude van de grondharmonische 50 Hz, met een stapgrootte van 1%.	Behaald
<b>REQ-2.4 [CH]:</b> De testengineer is in staat om alle oneven harmonischen tot en met de 13e in te stellen binnen een bereik van 5 tot 50%, met een stapgrootte van 1%.	Behaald
<b>REQ-2.5 [CH]:</b> De testengineer kan een standaardtestprocedure initiëren die alle gewenste testscenario's, weergegeven in tabel 1, achtereenvolgens uitvoert.	Behaald
<b>REQ-3.1[MH]:</b> Het testsysteem is in staat om stroomtestscenario 1 (zie tabel 1) te simuleren met de maximale afwijking van 6% ten opzichte van het gewenste simulatie signaal.	Behaald
<b>REQ-3.2[SH]:</b> Het testsysteem is in staat om alle testscenario's weergeven in tabel 1 te simuleren met de maximale afwijking van 6% ten opzichte van het gewenste simulatie signaal.	Behaald
<b>REQ-3.3[CH]:</b> Het testsysteem is in staat om alle stroomtestscenario's te simuleren volgens REQ-2.2 met de maximale afwijking van 6%	Behaald
<b>REQ-3.4[CH]:</b> Het testsysteem is in staat om het gewenste stroom testscenario te simuleren met een maximale afwijking van 3% ten opzichte van het gewenste simulatie signaal.	Behaald
<b>REQ-3.5[SH]:</b> Het testsysteem is in staat om het gewenste THD% testscenario's te simuleren met een maximale afwijking van 6% ten opzichte van het ingestelde THD% door de testengineer.	Gedeeltelijk behaald
<b>REQ-3.6[CH]:</b> Het testsysteem is in staat om het gewenste THD% testscenario's te simuleren met een maximale afwijking van 3% ten opzichte van het ingestelde THD% door de testengineer.	Gedeeltelijk behaald
<b>REQ-3.7[MH]:</b> Het testsysteem is in staat om op 1 poort van de MEM101 de testscenario's te simuleren.	Behaald
<b>REQ-3.8[CH]:</b> Het testsysteem is in staat om op 8 poorten van de MEM101 tegelijkertijd de testscenario's te simuleren.	Behaald
<b>REQ-4.1[CH]:</b> Het testsysteem geeft een visuele indicatie wanneer het testsysteem gereed is voor gebruik.	Behaald
<b>REQ-4.2[CH]:</b> Het testsysteem geeft een visuele indicatie wanneer het gestart is met de testprocedure.	Behaald
<b>REQ-4.3[CH]:</b> Het testsysteem geeft een visuele indicatie wanneer de testprocedure voltooid is.	Behaald
<b>REQ-4.4[CH]:</b> Het testsysteem geeft een visuele indicatie wanneer de testprocedure gepauzeerd is.	Behaald
<b>REQ-4.5[CH]:</b> Het testsysteem geeft een visuele indicatie wanneer het gestopt is met de testprocedure.	Behaald
<b>REQ-5.1[MH]:</b> Het testsysteem geeft het actieve testscenario weer aan de gebruiker.	Behaald

<b>REQ-6.1[CH]:</b> Het testsysteem genereert een testrapport na afloop van elk testprocedure en stuurt deze door naar de PC.	Niet Behaald
<b>REQ-NF1[MH]:</b> Het testsysteem functioneert met een voeding die een ingangsspanningsbereik van 10 tot 30 VDC heeft.	Behaald
<b>REQ-NF2[MH]:</b> Het testsysteem kan verbonden worden met het Smart Device doormiddel van een UTP-kabel.	Behaald
<b>REQ-NF3[SH]:</b> Het testsysteem verbruikt tijdens de testprocedure niet meer dan 15 watt aan vermogen.	Behaald
<b>REQ-NF4[CH]:</b> Het testsysteem weegt maximaal 5 kg.	Behaald
<b>REQ-NF5[CH]:</b> De afmetingen van het testsysteem zijn maximaal 200x175x50 mm.	Behaald

Tabel 6, acceptatietestrapport

## 7 Conclusie

Het doel van het project was om een eenvoudiger, gebruiksvriendelijker en sneller testsysteem te ontwikkelen, waarmee meerdere poorten van de MEM101, een onderdeel van het Smart Device, gelijktijdig getest kunnen worden door het simuleren van Rogowski-spoelsignalen. Dit maakt het gebruik van het huidige testapparaat, de Omicron, een duur apparaat (80 tot 90 duizend euro) dat vaak gehuurd moet worden van andere afdelingen binnen Stedin en niet altijd beschikbaar is, overbodig.

Uit de resultaten is gebleken dat alle belangrijke functionele eisen zijn gerealiseerd. Het testsysteem kan verschillende testscenario's nauwkeurig simuleren en is eenvoudig in te stellen en te bedienen door de testengineer. Hoewel het automatisch uitlezen van de meetresultaten van het Smart Device en het genereren van een testrapport nog niet gerealiseerd zijn, kan dit proces nog steeds handmatig worden uitgevoerd, zoals ook het geval is met de Omicron. Echter verloopt de testprocedure met het nieuwe testsysteem veel sneller, doordat de scenario's automatisch en opeenvolgend worden uitgevoerd, en ook op meerdere poorten van de MEM101 gelijktijdig getest kunnen worden.

Hoewel de THD-testscenario's niet de volledig gewenste resultaten opleveren, kan de meetfunctionaliteit van het Smart Device wel succesvol worden getest voor de stroomtestscenario's. Deze scenario's worden door Stedin momenteel als belangrijker beschouwd dan de THD-metingen. Hierdoor is het testsysteem een succesvol product geworden, waar het Smart Device-team binnen Stedin zeer tevreden mee is. Het team wil het testsysteem dan ook zo snel mogelijk in gebruik nemen, zodat de Omicron niet meer gehuurd of aangeschaft hoeft te worden. Bovendien biedt het testsysteem veel potentieel voor het automatisch testen en de verdere ontwikkeling van Smart Devices.

## 8 Aanbevelingen

In dit hoofdstuk worden alle aanbevelingen gegeven door de afstudeerde.

- **Ompoolbeveiliging**

Het huidige testsysteem bevat geen ompoolbeveiliging, wat betekent dat het risico bestaat dat het systeem beschadigd raakt als de voedingskabels van de labvoeding per ongeluk verkeerd worden aangesloten. Om dit te voorkomen, wordt aanbevolen om in de volgende versie van het testsysteem een diode- of MOSFET-gebaseerde ompoolbeveiliging te implementeren. Het implementeren van deze beveiliging voorkomt schade door omgekeerde spanning.

- **Aanbeveling microcontroller**

De huidige microcontroller gebruikt een LQFP144-pin package. Deze package werd oorspronkelijk gekozen vanwege de beschikbaarheid van 3 I2S-interfaces voor de aansturing van de DAC. In het nieuwe ontwerp wordt echter slechts één SPI-interface gebruikt. Daarnaast is 60% van het huidige RAM-geheugen al in gebruik door de firmware. Als in de toekomst meer testscenario's of meerdere verschillende sinusvormige signalen gegenereerd moeten worden, zal het RAM-geheugen van de huidige microcontroller een beperking vormen. Daarom wordt aanbevolen om de STM32F469VET6 te gebruiken, die drie keer meer RAM-geheugen. Deze microcontroller komt uit dezelfde F4-reeks, waardoor er weinig aanpassingen nodig zijn aan de hardware en software van het testsysteem.

- **Mobiele functionaliteit met batterijvoeding**

Het huidige testsysteem is afhankelijk van een labvoeding, wat de mobiliteit beperkt. Voor verplaatsing naar locaties zoals middenspanningsstations is het meenemen van de labvoeding een obstakel. Daarom wordt geadviseerd om het systeem compatibel te maken met batterijvoeding, bijvoorbeeld met een lithium-ion of lithium-polymeer (LiPo) batterijsysteem. Dit maakt het systeem draagbaar en veelzijdiger in verschillende omgevingen.

- **Verbetering van de frequentie voor nauwkeurige THD-metingen**

De huidige testresultaten laten zien dat de MEM101 niet nauwkeurig genoeg is voor de meting van Total Harmonic Distortion (THD), ondanks dat de oscilloscoopmetingen wel binnen de criteria vallen. Het vermoeden bestaat dat de onnauwkeurige frequentie van de gegenereerde sinussignalen hiervoor verantwoordelijk is. Er wordt geadviseerd een Direct Digital Synthesis (DDS)-systeem te integreren voor een hogere frequentienauwkeurigheid. Daarnaast dient dit besproken te worden met Mikrona om een beter beeld te krijgen van hoe de MEM101 de THD-scenario's meet, zodat de precieze oorzaak kan worden achterhaald en opgelost.

- **Bediening zonder PC**

Momenteel wordt het testsysteem bediend via een GUI op een PC, die via een USB-kabel is aangesloten. Dit beperkt de mobiliteit, omdat de PC telkens moet worden meegegenomen. Het wordt aanbevolen om een ingebouwd display toe te voegen, zodat het systeem ook zonder PC bediend kan worden. Dit verbetert de gebruiksvriendelijkheid en mobiliteit.

- **Behuizing met EMI-shielding**

Het testsysteem is momenteel kwetsbaar voor elektromagnetische interferentie (EMI) en elektrostatische ontlading (ESD). Er wordt geadviseerd om een metalen behuizing met EMI-shielding te ontwikkelen, met geïntegreerde aarding, zodat het systeem beter beschermd is. Deze behuizing moet voldoen aan relevante EMI/EMC-standaarden (bijvoorbeeld IEC 61000). Dit vermindert de invloed van externe storingen op de prestaties, vooral in industriële omgevingen zoals middenspanningstations. Ook wordt het systeem minder kwetsbaar voor ESD, waardoor het testsysteem minder snel beschadigd raakt.

- **Flexibiliteit in testprocedures**

Het huidige systeem voert standaard zes testscenario's uit, met een vaste duur van 30 seconden per scenario. Het wordt aanbevolen om de testsoftware aan te passen, zodat de testengineer zelf het aantal scenario's en de tijd per scenario kan instellen. Dit biedt meer flexibiliteit en maakt de testprocedure beter aanpasbaar aan specifieke eisen, wat tijd kan besparen.

- **Automatisch uitlezen van Smart Devices**

Momenteel worden de resultaten van de Smart Devices handmatig uitgelezen via een DALI-display, wat inefficiënt en tijdrovend is, vooral bij grote hoeveelheden apparaten. Er wordt geadviseerd om Modbus-communicatie te implementeren, zodat de resultaten automatisch uitgelezen kunnen worden. Dit maakt het mogelijk om na elke testprocedure automatisch een testrapport te genereren, wat het evaluatieproces aanzienlijk versnelt.

- **Verwijderen van testpunten en 0-ohm weerstanden**

In het huidige testsysteem worden veel testpunten en 0-ohm weerstanden gebruikt voor unittesten van de deelsystemen. Indien er behoefte ontstaat om het ontwerp verder te verkleinen voor een compacte, draagbare versie of voor de ontwikkeling van een productversie in plaats van een prototype, wordt aanbevolen om deze componenten te verwijderen. Dit bespaart ruimte op de PCB, maakt het ontwerp compacter en verlaagt de productiekosten.

- **Uitlijning van connectoren**

De connectoren op poorten 7 en 8 van het huidige systeem zijn niet goed uitgelijnd met de uitsparingen in de PCB, wat het lastig maakt om UTP-kabels los te koppelen. Ik adviseer om de connectoren beter uit te lijnen met de uitsparingen, zodat de kabels gemakkelijker gekoppeld en losgekoppeld kunnen worden.

- **Betere samenwerking met Mikrona en uitbreiding van het elektrotechnische team**

Tot slot wordt geadviseerd om het elektrotechnische team uit te breiden en de samenwerking met Mikrona te intensiveren. Een nauwere samenwerking kan ertoe leiden dat de engineers binnen Stedin een beter begrip krijgen van de Smart Devices, wat zou leiden tot een snellere ontwikkeling van testapparatuur en verbeterde functionaliteit.

## 9 Bibliografie

- 1 Marselis, N. (n.d.). *Wat is het V-model?* <https://blog.postendekker.nl/wat-is-het-v-model>
- 2 Texas Instruments. (2011). 16-Bit, Quad Channel, Ultra-Low glitch, voltage output DIGITAL-TO-ANALOG CONVERTER with 2.5V, 2ppm/°C internal reference (Versie SBAS403D, REVISED) [Technical report; DAC8564].  
[https://www.ti.com/lit/ds/symlink/dac8564.pdf?ts=1729502317541&ref\\_url=https%253A%252F%252Fwww.google.com%252F](https://www.ti.com/lit/ds/symlink/dac8564.pdf?ts=1729502317541&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.google.com%252F)
- 3 Mikronika. (2022). MEM-101 MULTI ENERGY MEASUREMENT UNIT [Dataset]. In USER MANUAL (Versie V3). <https://www.mikronika.pl/en/offer/products/devices/control-measuring-automation/>
- 4 MCP3914. (n.d.). Microchip Technology. <https://www.microchip.com/en-us/product/mcp3914>
- 5 STMicroelectronics. (2024). Introduction to USB hardware and PCB guidelines using STM32 MCUs [Application note]. In AN4879 (Rev 7, Rev 7, pp. 1–29).  
[https://www.st.com/resource/en/application\\_note/an4879-introduction-to-usb-hardware-and-PCb-guidelines-using-stm32-mcus-stmicroelectronics.pdf](https://www.st.com/resource/en/application_note/an4879-introduction-to-usb-hardware-and-PCb-guidelines-using-stm32-mcus-stmicroelectronics.pdf)
- 6 STMicroelectronics. (2022). ESD protection of STM32 MCUs and MPUs [Dataset]. In AN5612 (Rev 1, pp. 2–34). [https://www.st.com/resource/en/application\\_note/an5612-esd-protection-of-stm32-mcus-and-mpus-stmicroelectronics.pdf](https://www.st.com/resource/en/application_note/an5612-esd-protection-of-stm32-mcus-and-mpus-stmicroelectronics.pdf)
- 7 STMicroelectronics. (2023). STLINK-V3SET debugger/Programmer for STM8 and STM32 [Manual]. In UM2448 User manual (Rev 8). [https://www.st.com/resource/en/user\\_manual/um2448-stlinkv3set-debuggerprogrammer-for-stm8-and-stm32-stmicroelectronics.pdf](https://www.st.com/resource/en/user_manual/um2448-stlinkv3set-debuggerprogrammer-for-stm8-and-stm32-stmicroelectronics.pdf)
- 8 STMicroelectronics. (2021). STM32F446XC/E Datasheet (Rev 10) [Datasheet].  
<https://nl.mouser.com/datasheet/2/389/stm32f446mc-1760997.pdf>
- 9 Texas Instruments Incorporated. (2015). LM2776 Switched Capacitor Inverter (B) [Technical documentation]. Texas Instruments. [https://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm2776.pdf?HQS=dis-dk-null-digikeymode-dsf-pf-null-wwe&ts=1717010776379&ref\\_url=https%253A%252F%252Fwww.ti.com%252Fgeneral%252Fdocs%252Fsuppproductinfo.tsp%253FdistId%253D10%2526gotoUrl%253Dhttps%253A%252F%252Fwww.ti.com%252Flit%252Fgpn%252Flm2776](https://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm2776.pdf?HQS=dis-dk-null-digikeymode-dsf-pf-null-wwe&ts=1717010776379&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.ti.com%252Fgeneral%252Fdocs%252Fsuppproductinfo.tsp%253FdistId%253D10%2526gotoUrl%253Dhttps%253A%252F%252Fwww.ti.com%252Flit%252Fgpn%252Flm2776)
- 10 Analog Devices. (2021). LT3021/LT3021-1.2/LT3021-1.5/LT3021-1.8 [Dataset]. In 500mA, Low Voltage, Very Low Dropout Linear Regulator (Rev D, Rev.D).  
[https://nl.mouser.com/datasheet/2/609/LT3021\\_3021\\_1\\_2\\_3021\\_1\\_5\\_3021\\_1\\_8-1504118.pdf](https://nl.mouser.com/datasheet/2/609/LT3021_3021_1_2_3021_1_5_3021_1_8-1504118.pdf)
- 11 Texas Instruments Incorporated. (2020). LM62460, LM61480, and LM61495 Pin-Compatible 6-A/8-A/10-A Buck converter optimized for power density and low EMI (Rev A) [Dataset]. Texas Instruments.  
[https://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm61480.pdf?ts=1717079629990&ref\\_url=https%253A%252F%252Fwww.ti.com%252Fnl.mouser.com%252F](https://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm61480.pdf?ts=1717079629990&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.ti.com%252Fnl.mouser.com%252F)
- 12 AD1934 Datasheet and Product Info | Analog Devices. (z.d.).  
<https://www.analog.com/en/products/ad1934.html>

## Bijlage A: plan van aanpak

# Stedin

## Plan van aanpak



<b>Auteur:</b>	Younes Boulmani
<b>Stagedocent:</b>	De heer Fogarty
<b>Bedrijfsbegeleiders:</b>	Mark Burghout en Koen Peelen
<b>Titel:</b>	Plan van Aanpak (testopstelling)
<b>Datum van uitgifte:</b>	16-09-2024

## Inhoud

1	Inleiding.....	54
2	Achtergronden.....	54
3	Aanleiding.....	54
4	Projectresultaat .....	55
4.1	Probleemstelling.....	55
4.2	Doelstelling .....	55
4.3	Context Opdracht .....	55
	schema .....	55
	Huidige situatie/probleemstelling .....	55
	Doelstelling.....	56
	Optioneel.....	56
5	Projectactiviteiten .....	57
5.1	Projectmethodiek .....	57
5.2	Projectactiviteiten.....	57
6	Projectgrenzen.....	58
7	Tussenresultaten .....	59
8	Kwaliteit.....	59
8.1	Documentatie .....	59
8.2	Hardware .....	59
8.3	Software .....	60
8.4	Overig .....	60
9	Projectorganisatie.....	61
10	Kosten en baten.....	61
10.1	Kosten.....	61
10.2	Baten .....	61
11	Risico's .....	61
11.1	Risicoanalyse versie 1 .....	62
11.2	Risicoanalyse Versie 2 .....	63
12	Planning.....	68
12.1.1	Planning V1.....	69
12.1.2	Planning V1.1.....	71
12.1.3	Planning V2.....	73
12.1.4	Planning herkansing.....	75
12.1.5	Planning herkansing versie 2.....	77
12.1.6	Planning herkansing versie 3.....	79

13 Bronvermelding .....81

## Versie Historiek

Revisie	Datum	Auteur	Omschrijving
1.0	12-02-2024	Younes Boulmani	Opzetten plan van aanpak
1.1	13-02-2024	Younes Boulmani	Alle hoofdstukken aangevuld behalve planning
1.2	14-02-2024	Younes Boulmani	Alle stukken nagelezen en aangevuld
1.3	16-02-2024	Younes Boulmani	Planning, bronvermelding en bijlagen toegevoegd
1.4	21-02-2024	Younes Boulmani	Feedback verwerkt van begeleider.
1.5	27-03-2024	Younes Boulmani	Risico evaluatie bijgewerkt
1.6	11-09-2024	Younes Boulmani	Nieuwe risicoanalyse en planning toegevoegd voor de herkansing. Ook is de risico evaluatie bijgewerkt.
1.7	16-09-2024	Younes Boulmani	Feedback verwerkt van docentbegeleider.
1.8	7-11-2024	Younes Boulmani	Nieuwe planningen toegevoegd.

## 1 Inleiding

Van 12 februari 2024 tot 12 juli 2024 zal de afstudeerdeerder, Younes Boulmani, werken aan een interessant project: het significant verbeteren van de testopstelling van de DA3-C en DA3-D box, hierna aangeduid als "Smart Device". Deze worden gebruikt om in middenspanningsruimtes (MSR's) de kwaliteit van het stroomnet te meten. De afstudeerdeerder zal dus een product/testopstelling ontwikkelen die zal worden gebruikt voor de doorontwikkeling van de C-Box, voor ingangscontroles en voor het ontwikkeltraject van de D-Box voor het bedrijf Stedin. Stedin is een netbeheerder in het grootste deel van Zuid-Holland, en de provincies Utrecht en Zeeland, een overwegend stedelijke en industriële regio. Het bedrijf zorgt ervoor dat ruim 2,3 miljoen huishoudens en zakelijke klanten over energie beschikken om te wonen, werken en ondernemen. De afstudeerdeerder volgt de voltijd Hbo-opleiding elektrotechniek aan de Hogeschool Rotterdam. De afstudeerstage is het laatste onderdeel van zijn Hbo-opleiding.

## 2 Achtergronden

Tijdens de afstudeerstage zal er gewerkt worden aan het ontwerpen en realiseren van een testopstelling voor het Smart Device dat deel uitmaakt van het DA3-project van Stedin. Voor deze opdracht zal voornamelijk gewerkt worden in het vestigingspand van Stedin in Delft, waar de afdeling voor Smart Devices zich bevindt. Het doel van deze stage is om de kennis die de afgelopen jaren is vergaard toe te passen binnen een onderneming en een waardevolle bijdrage te leveren aan Stedin door de opdracht uit te voeren. Het is hierbij belangrijk dat de afstudeerdeerder kan aantonen dat hij alle 8 engineering competenties op Hbo-eindniveau goed beheert.

## 3 Aanleiding

Stedin moet, net als alle distributie-netbeheerders flink aan de bak. Door de snelle elektrificering van huishoudens en bedrijven ontstaan er continue nieuwe congestie punten waar deze nooit voorspeld waren. Daarom is het opeens belangrijk om veel uitgebreider te meten. Hiermee kan Stedin het net beter benutten en weet ze waar er moet worden bijgebouwd. Een van de projecten die zich hier mee bezig houdt is het DA3 project. De DA3 is een meet systeem wat in alle MSR (Middelspanningstationsruimtes) geplaatst moet worden, en daar de stroom door alle velden zal bemeten.

Binnen het DA3-project wordt een Smart Device ontwikkeld voor het meten en distribueren van stromen in MSR's. Het Smart Device bestaat uit een RTU (main control unit) waar maximaal 4 MEMs (multi energy measurement units) aan kunnen worden gekoppeld, met de mogelijkheid om maximaal 8 Rogowski-spoelen aan te sluiten op de 8 poorten van de MEM. Per Rogowski-spoel kunnen er 3 fasen worden gemeten. Hierdoor kunnen er per Smart Device dus 3-fasenmetingen worden verricht voor in totaal 32 velden.

Voor het testen van dit Smart Device wordt momenteel gebruik gemaakt van een Omicron, een apparaat dat 3-fasestromen kan genereren. Deze Omicron is echter kostbaar (80 tot 90 duizend euro) en beperkt tot het testen van één poort tegelijk. Stedin streeft naar een efficiëntere testopstelling die het inductiespoelsignaal simuleert om het Smart Device effectiever te testen. Deze aanpak is niet alleen essentieel voor bestaande devices, maar ook voor de doorontwikkeling van DA3 en toekomstige projecten.

## 4 Projectresultaat

In dit hoofdstuk worden de probleem- en doelstelling besproken. Ook wordt de context van de opdracht beschreven en wordt een schema toegevoegd dat de doelstelling en probleemstelling extra duidelijk maakt.

### 4.1 Probleemstelling

Het huidige testapparaat, de Omicron, kan slechts één poort van het Smart Device tegelijkertijd testen. Bovendien is het apparaat groot en zwaar (afmetingen: 450x145x390mm; gewicht: 16,8 kg). Daarnaast is de Omicron vrij complex om te bedienen, niet iedereen is even handig met dit soort systemen. Dit maakt het dus vrij lastig om deze Smart Devices en de hardware revisies ervan te testen. Een eenvoudigere en gebruikersvriendelijker oplossing die meer poorten kan testen, is dus gewenst.

### 4.2 Doelstelling

Het doel is om een eenvoudigere en snellere testopstelling te ontwikkelen die meerdere poorten gelijktijdig van de MEM101 kan testen door de signalen van de Rogowski-spoel te simuleren per scenario. Waarbij de testengineer de gewenste scenario's eenvoudig kan instellen door een gebruiksvriendelijke User Interface en de gehele testprocedure veel sneller en eenvoudiger zal zijn dan de vorige methode. Waardoor de Omicron overbodig wordt. Tevens streeft Stedin ernaar de mogelijkheid om diverse scenario's te testen.

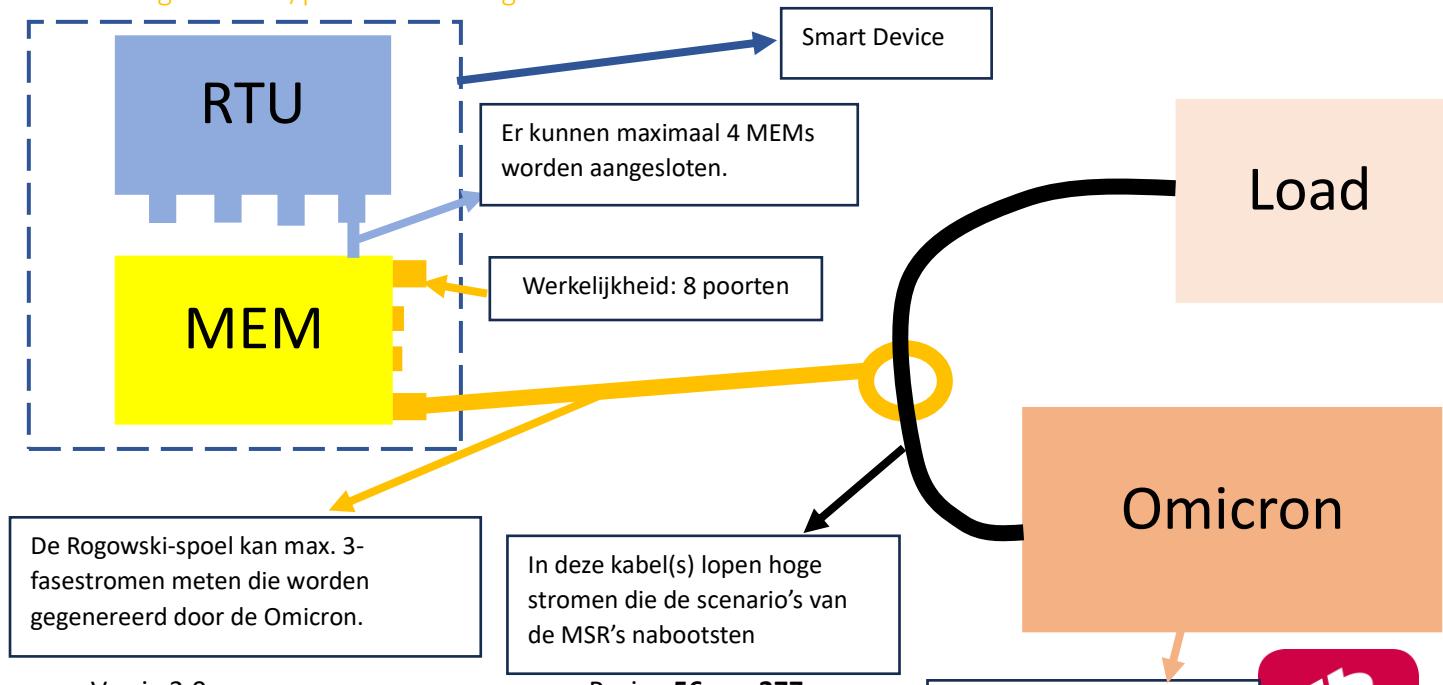
### 4.3 Context Opdracht

De opdracht omvat het ontwikkelen van een testopstelling met een programma waarmee verschillende scenario's voor het Smart Device kunnen worden getest. De scenario's testen onder andere of het systeem de amplitude, frequentie van de stroom, en de hogere harmonische componenten in de stroom kan meten. Een testengineer kan via een computer/machine de gewenste scenario's aan de testopstelling doorgeven. Optioneel kan de testopstelling automatisch de berekende stroomwaarde van het Smart Device controleren t.o.v. de input en deze als feedback aan de gebruiker teruggeven.

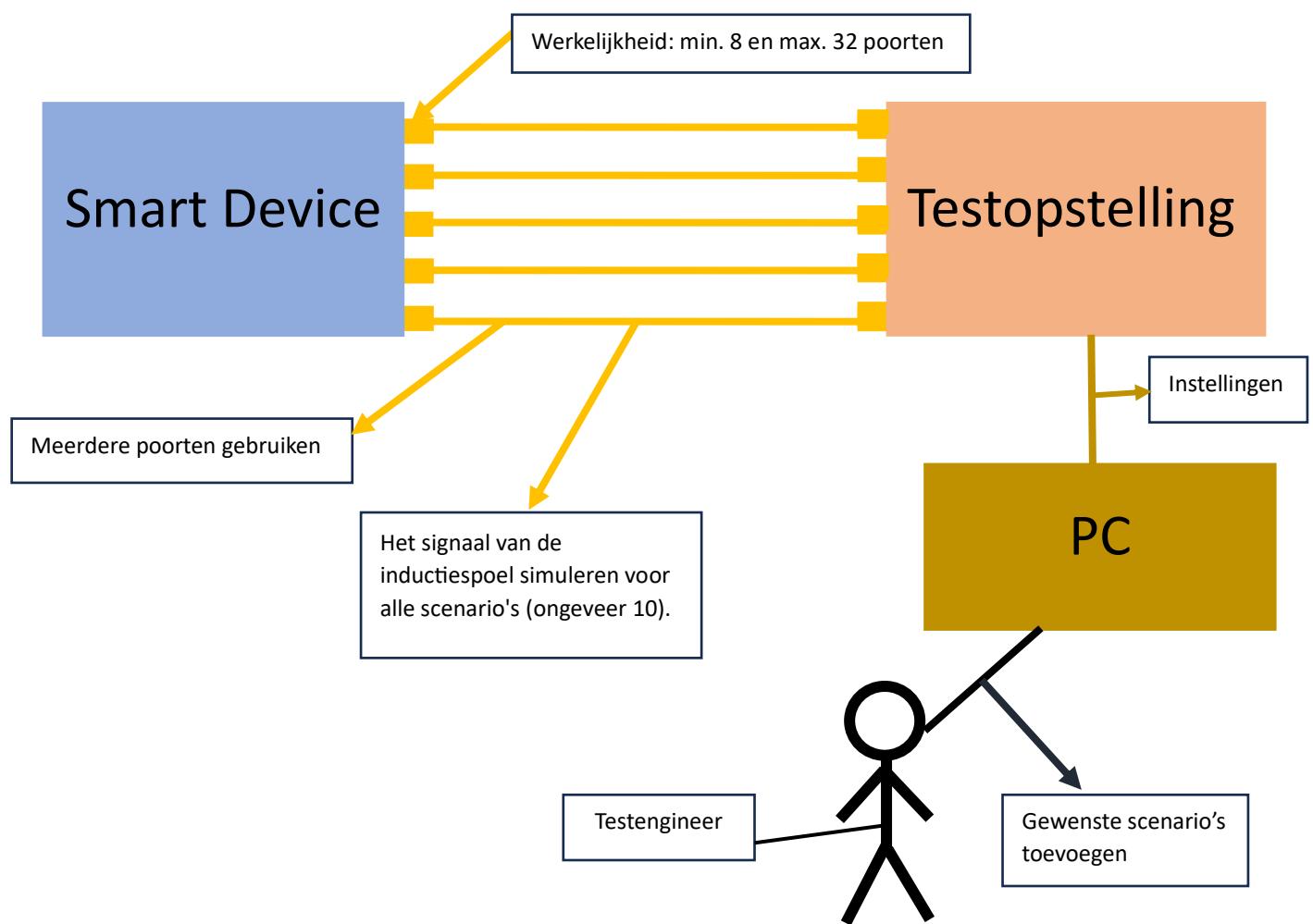
#### schema

In deze paragraaf wordt het schema weergegeven van de huidige situatie/probleemstelling, de doelstelling en eventuele optionele toevoegingen aan de opdracht.

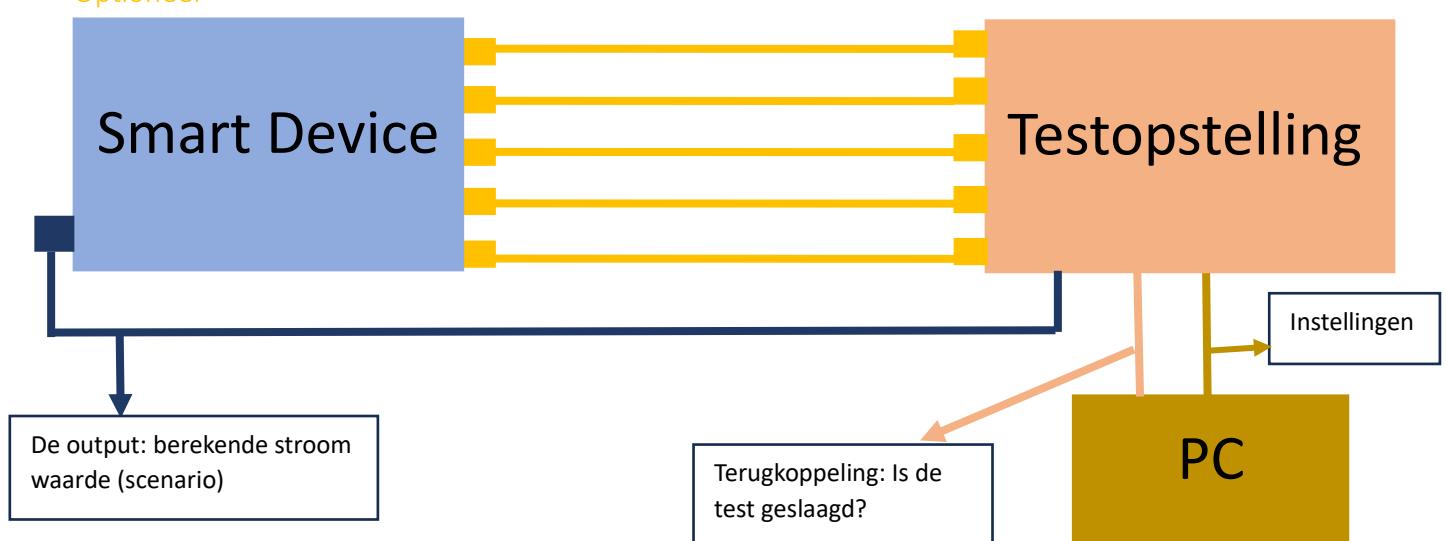
#### Huidige situatie/probleemstelling



## Doelstelling



## Optioneel

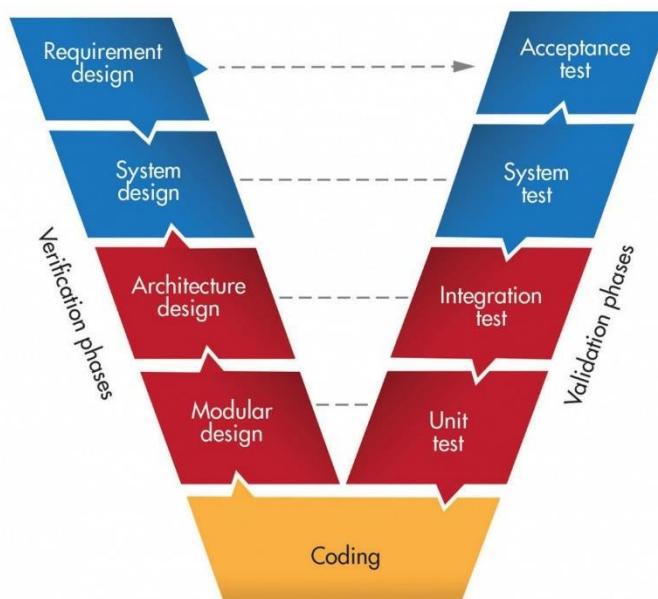


## 5 Projectactiviteiten

In dit hoofdstuk wordt besproken welke projectmethodiek wordt toegepast en welke projectactiviteiten worden uitgevoerd tijdens het afstudeertraject.

### 5.1 Projectmethodiek

De projectactiviteiten zijn belangrijk om het project goed te laten verlopen en zo aan het eind een goed product te kunnen leveren. Het project wordt uitgevoerd volgens het V-model. Het V-model is een gestructureerde projectaanpak waarbij de aandacht evenredig wordt verdeeld tussen projectdefinitie (en vertaling naar technisch ontwerp) en validatie/verificatie van gedefinieerde projecteisen en behoeften (Marselis, z.d.).



Figuur 1, schema van het V-model

### 5.2 Projectactiviteiten

In deze paragraaf zullen de projectactiviteiten opgesomd worden die tijdens de afstudeerstage uitgevoerd zal worden.

Enkele activiteiten die de stageopdracht omvat:

- Het opstellen van een plan van aanpak
- Door middel van een analyse de wensen van de opdrachtgever aantoonbaar helder vertalen naar eisen waarop een ontwerp te baseren is.
- Onderzoeken welke signalen gegenereerd moeten worden om de scenario's te kunnen nabootsen
- Het ontwerpen van de hardware/ firmware van het systeem op basis van klanteisen
- Het implementeren van het elektronisch systeem o PCB-ontwerp o PCB solderen o Software ontwerpen o Debuggen
- Het testen van het elektronisch systeem door middel van unit-integratie en acceptatie testen.
- Een acceptatietest rapport opleveren en kunnen aantonen welke eisen er zijn behaald
- Eindproduct leveren
- Handleiding maken
- Vergaderen met belanghebbenden en de ontvangen feedback verwerken in het project.

- Planning maken en managen
- Het beheren van de documentatie, hardware- en softwareontwerp.

## 6 projectgrenzen

In dit hoofdstuk wordt duidelijk afgebakend welke activiteiten de afstudeerde wel zal uitvoeren en welke niet. Het is belangrijk om de projectgrenzen van tevoren vast te stellen, zodat de projectuitvoerder niet buiten de scope van het project zal vallen.

### ***Activiteiten die binnen het project worden gedaan:***

Een testopstelling ontwerpen en realiseren die het Smart Device kan testen voor alle gewenste scenario's van de opdrachtgever. Hierbij is de afstudeerde verantwoordelijk voor het ontwerpen van het elektronische systeem, zowel hardware als software, en het testen van dit systeem om te controleren of het naar behoren functioneert. In paragraaf **{5.2}** worden de projectactiviteiten beschreven die de afstudeerde zal uitvoeren tijdens het project.

### ***Activiteiten die niet binnen het project worden gedaan:***

- Ik zal geen rekening houden met de wettelijke regels omtrent het produceren van een elektronisch product, aangezien ik het product niet op de markt zal brengen.
- Het ontwerpen van de behuizing voor het product.
- Oplossingen bedenken voor het geval de test niet geslaagd is en analyseren waar het probleem kan liggen.
- Onderzoeken hoe het Smart Device de stroom berekent en kijken of er betere methoden beschikbaar zijn.
- Het uitvoeren van het project door middel van de SCRUM-methode.

### ***Activiteiten die optioneel binnen het project worden gedaan:***

- Het communiceren met het Smart Device doormiddel van de Modbus- protocol.
- Een testopstelling maken die automatisch de berekende stroomwaarde van het Smart Device controleert t.o.v de input en deze als feedback aan de gebruiker teruggeeft.
- Een automatisch testrapport genereren na elke test.

## 7 Tussenresultaten

Bij een groot project zoals dit, is het van belang dat het project wordt verdeeld in verschillende onderdelen. De voortgang van het project wordt weergegeven door middel van tussenresultaten. Deze tussenresultaten zijn als volgt:

1. Plan van aanpak (PvA)
2. Systeemanalyse
3. Programma van eisen (PvE)
4. Onderzoeksrapport
5. Architectuur ontwerp
6. Unit-, integratie- en acceptatie testen
6. Conceptverslag
8. Acceptatietest rapport
9. Eindverslag
10. Assessment

## 8 Kwaliteit

Het waarborgen van een goed functionerend eindproduct is van cruciaal belang. Zowel de kwaliteit van het product als de documentatie moeten in orde zijn. Daarom is het essentieel om gestructureerd te werk te gaan. In dit hoofdstuk wordt de aspecten besproken van hoe deze kwaliteit gewaarborgd kan worden.

### 8.1 Documentatie

- ⊕ De documentatie moet een professionele indeling hebben. Denk hierbij aan paginanummers, verwijzingen en een goede lay-out.
- ⊕ De inhoud van de documentatie mag nauwelijks spelling of grammaticale fouten bevatten.
- ⊕ De informatie in het document moet van betrouwbare bronnen afkomen.
- ⊕ De conclusies en berekeningen die in het document zijn verwerkt moeten goed onderbouwd zijn.
- ⊕ De eisen van de klant moeten goed verwerkt zijn in het document en de klant moet doormiddel van de acceptatietest rapport zien of de eisen zijn behaald.
- ⊕ Het is belangrijk dat de versiehistorie goed wordt bijgehouden, zodat belanghebbenden kunnen zien wat er gedaan is en wanneer.
- ⊕ Er wordt gebruik gemaakt van het V-model om een gestructureerde ontwerpmethodiek aan te houden.
- ⊕ Alle documenten worden opgeslagen in de cloud.

### 8.2 Hardware

- ⊕ De componenten die gekozen worden zijn afkomstig van betrouwbare leveranciers (Mouser, Farnell).

- ⊕ Het product wordt getest met betrouwbaar testmateriaal, zoals goed werkende oscilloscopen en multimeters, om te controleren of alles goed functioneert. Dit kan worden uitgevoerd door middel van unittests en integratietests.
- ⊕ De schakelingen worden indien nodig vooraf gesimuleerd, waarbij wordt gecontroleerd of de componenten in de schakeling naar behoren functioneren onder verschillende scenario's.
- ⊕ Er zal vooraf grondig onderzoek worden gedaan naar verschillende soorten componenten en hun werking.

### 8.3 Software

- ⊕ Er zal gebruik gemaakt worden van het versie beheersysteem git. Om de software goed bij te houden.
- ⊕ Regelmatisch reviews aanvragen van geschreven code. Dit kan helpen bij het identificeren van fouten en het handhaven van best practices.
- ⊕ Het Implementeren van uitgebreide teststrategieën, inclusief unit tests, integratie tests en systeemtests, om consistentie en betrouwbaarheid te waarborgen.
- ⊕ De documentatie bishouden van de softwarearchitectuur, ontwerpbeslissingen en gebruiks- en onderhoudsinstructies.

### 8.4 Overig

- ⊕ Het maken van een overzichtelijke en haalbare planning om ervoor te zorgen dat het product rond de einddatum gepresenteerd kan worden.
- ⊕ Wekelijks vergaderen met de bedrijfsbegeleider om de voortgang van het project te bespreken. Op deze manier wordt ervoor gezorgd dat het product niet afwijkt van de eisen van de opdrachtgever (bedrijfsbegeleider).

Alle hierboven genoemde aspecten spelen een essentiële rol om ervoor te zorgen dat het eindproduct van goede kwaliteit is.

## 9 Projectorganisatie

Binnen dit project zijn er een aantal betrokken personen/belanghebbenden. Hieronder zijn alle contactgegevens van deze personen te vinden.

Betrokken partijen	Functie	Telefoonnummer	Email
Younes Boulmani	Afstudeerdeerder	06-39816785	<a href="mailto:1012276@hr.nl">1012276@hr.nl</a> <a href="mailto:yboulmani@hotmail.com">yboulmani@hotmail.com</a>
Mark Burghout	Bedrijfsbegeleider	06-24900938	<a href="mailto:mark.burghout@stedin.net">mark.burghout@stedin.net</a>
Koen Peelen	Bedrijfsbegeleider	06-18396533	<a href="mailto:koen.peelen@stedin.net">koen.peelen@stedin.net</a>
Paul Fogarty	Docent begeleider	-	<a href="mailto:p.fogarty@hr.nl">p.fogarty@hr.nl</a>
Stefan Groot Nibbelink	Stage coördinator	-	<a href="mailto:s.groot.nibbelink@hr.nl">s.groot.nibbelink@hr.nl</a>

## 10 Kosten en baten

In dit hoofdstuk zullen de kosten en baten van het project worden besproken.

### 10.1 Kosten

Voor dit project is er geen vast budget. Als de afstudeerdeerder een aankoop wil doen, moet het overlegd worden met de stagebegeleider. Als de stagebegeleider overeenstemt, kan de aankoop doorgaan. De verwachte kosten van het product zullen niet boven de 1000 euro zijn. Ook zijn er andere kosten waar het bedrijf rekening mee moet houden, zoals maandelijkse stagevergoeding, laptop, werkplek, etc. Tevens moet er ook tijd worden vrijgemaakt voor de afstudeerdeerder om hem te begeleiden, wat ook tijd en geld kost.

### 10.2 Baten

Als het project succesvol verloopt en het product aan alle eisen voldoet, zal Stedin aanzienlijke kosten besparen, wat een positieve impact zal hebben op het bedrijf. Daarnaast zullen er sneller en eenvoudiger meer relevante scenario's getest kunnen worden dan met de huidige oplossing.

Bovendien zal de afstudeerdeerder veel voldoening krijgen als het product daadwerkelijk wordt gebruikt. Tijdens de stageperiode zal de afstudeerdeerder ook veel nieuwe kennis opdoen die een bijdrage kan leveren aan zijn studie en toekomstige loopbaan.

## 11 Risico's

In dit hoofdstuk worden de risico's die kunnen ontstaan tijdens het project behandeld. Daarbij wordt ook gekeken naar hoe de risico's kunnen worden voorkomen en wat de oplossingen zijn voor de risico's. Er zal ook worden gekeken naar de kans hierop en wat de impact van dit risico is op het project. Deze factoren worden geïndexeerd met een cijfer van 1 (heel laag) tot 10 (heel hoog). De indexcijfers van deze factoren worden met elkaar vermenigvuldigd om de prioriteit van het risico te bepalen. De prioriteit wordt geïndexeerd met een cijfer van 1 (heel laag) tot 100 (heel hoog). In tabel 1 is de risico-analyse weergeven van het project.

### 11.1 Risicoanalyse versie 1

Risicoanalyse					
Risico	Kans	Impact	Maatregel	Oplossing	Prioriteit
Essentiële componenten van het product zijn niet op voorraad.	7	10	Er dient in de planning rekening gehouden te worden met het risico dat kan optreden.	Alternatieve componenten gebruiken die dezelfde functie hebben.	70
Het kapot maken van kwetsbare componenten.	6	10	Nauwkeurig en geordend werken.	Extra componenten bestellen.	60
Fouten gemaakt bij het ontwerp van de PCB.	7	8	PCb-review doen.	Nieuwe PCB ontwerpen.	56
Het onderzoek naar huidige gegenereerde meetwaarden is complexer dan verwacht.	6	9	Zorg voor voldoende tijd en middelen in de projectplanning voor het onderzoek naar de meetwaarden.	Gebruik slimme apparatuur om meetwaarden automatisch te analyseren en belangrijke informatie snel te extraheren.	54
Lange levertijd van componenten.	7	7	Je kunt dit niet voorkomen, maar je kunt er wel rekening mee houden in de planning door vroegtijdig te bestellen.	Werken aan andere project taken.	49
Het duurt lang voordat de interne aankoopprocedure is afgerond en de bestelling daadwerkelijk wordt geplaatst binnen het bedrijf.	6	7	Je kunt dit niet voorkomen, maar je kunt er wel rekening mee houden in de planning.	Werken aan andere project taken.	42
Het product is niet klaar voor de deadline.	4	10	Gedisciplineerd te werk gaan en een goede planning volgen.	Studievertraging oplopen om de opdracht af te maken.	40
De opdracht is niet mogelijk en haalbaar binnen 20 weken.	3	10	De opdracht van tevoren controleren door de docenten.	Met de opdrachtgever en stagedocent een oplossing bedenken.	30
Onvoorzien technische complicaties.	7	4	Regelmatige voortgangsrapportages, Technische ondersteuning.	Aanpassing van planning, Expert advies.	28

Onvoldoende kennis van benodigde tools.	4	7	Vooraf trainingen of cursussen volgen om voldoende kennis te verkrijgen over het gebruik van de benodigde tools.	Aanvullende documentatie en bronnen raadplegen, of een expert om hulp vragen.	28
Het kapot maken van niet kwetsbare componenten.	8	3	Nauwkeurig en geordend werken.	Extra componenten bestellen.	24
Afstudeerde raakt langdurig ziek.	2	10	Goed slapen en een gezond leefstijl hanteren. Bij lichaamswaarschuwingen de huisarts raadplegen voordat de situatie ernstig wordt.	Informeer zowel de bedrijfs- als de stagebegeleider over mogelijke oplossingen voor het uitvoeren van het project op een later tijdstip.	20
Afstudeerde raakt kortdurend ziek.	4	5	Goed slapen en een gezond leefstijl hanteren.	Uitzieken.	20

Tabel 7, risicoanalyse versie 1

## 11.2 Risicoanalyse Versie 2

De afstudeerde heeft voor de herkansingsperiode een nieuwe risicoanalyse opgesteld. Zie de risicoanalyse hieronder.

Risicoanalyse					
Risico	Kans	Impact	Maatregel	Oplossing	Prioriteit
Essentiële componenten van het product zijn niet op voorraad.	7	10	Er dient in de planning rekening gehouden te worden met het risico dat kan optreden.	Alternatieve componenten gebruiken die dezelfde functie hebben.	70
Het per ongeluk beschadigen van kwetsbare componenten tijdens het project	6	10	Nauwkeurig en geordend werken.	Extra componenten bestellen.	60
De belangrijkste functies van het product werken niet zoals bedoeld of zijn geheel niet werkend.	6	10	Plan tijd voor troubleshooting en herontwerp, en voer iteratieve tests en ontwerpen uit om problemen vroegtijdig op te sporen.	Schakel externe experts in indien nodig en voer herontwerpen door op basis van testresultaten.	60

Ontwerpfouten in de PCB leiden tot functionele problemen of het beschadigen van componenten.	7	8	Grondige ontwerpreview door meerdere stakeholders en uitvoer van simulaties.	Herontwerp de PCB op basis van feedback van simulaties en externe audits.	56
Lange levertijd van kritieke componenten en de PCB waardoor de projectplanning vertraging opleert.	7	8	Vroegtijdig contact opnemen met leveranciers en vroegtijdige bestelling van componenten. Rekening mee houden in de planning.	De planning aanpassen en in de tussentijd andere projectactiviteiten uitvoeren.	56
Het onderzoek naar huidige gegenereerde meetwaarden is complexer dan verwacht.	6	9	Zorg voor voldoende tijd en middelen in de projectplanning voor het onderzoek naar de meetwaarden.	Gebruik slimme apparatuur om meetwaarden automatisch te analyseren en belangrijke informatie snel te extraheren.	54
Gebrek aan ervaring met het ontwerpen van complexe PCB's.	7	7	Vergroot kennis door cursussen te volgen, relevante tutorials en artikelen te bestuderen, en vraag begeleiding van ervaren ontwerpers waar nodig.	Schakel externe expertise in indien nodig.	49
Elektromagnetische interferentie (EMI) verstoort de prestaties van het PCB.	6	8	Zorg voor een goed PCB-lay-out ontwerp met afscherming en correcte aarding. Gebruik ook filters om storingen te minimaliseren.	Test het ontwerp op EMI en voeg afscherming of filters toe waar nodig.	48
Tijdsgebrek of onjuiste planning.	6	8	Maak een gedetailleerde planning met een buffer voor onvoorziene omstandigheden.	Herzie de planning regelmatig en pas aan waar nodig.	48
De gegenereerde signalen kunnen niet nauwkeurig worden gemeten door afwijkingen of beperkingen van meetapparatuur.	5	9	Gebruik gekalibreerde meetapparatuur en controleer de meetopstellingen op afwijkingen.	Schakel over op nauwkeurigere apparatuur indien nodig of voer meerdere metingen uit met verschillende systemen om resultaten te valideren.	45
Fouten in de BOM- of PCB-productiebestanden leiden ertoe dat de PCB niet functioneert, door verkeerde componenten of onjuiste assemblage.	5	9	Voer grondige controles en reviews uit op de BOM en PCB-productiebestanden vóór productie, en betrek meerdere personen bij de verificatie.	Corrigeer de fouten in de bestanden en herstart de productie met de juiste gegevens.	45

Het duurt lang voordat de interne aankoopprocedure is afgerond en de bestelling daadwerkelijk wordt geplaatst binnen het bedrijf.	6	7	Je kunt dit niet voorkomen, maar je kunt er wel rekening mee houden in de planning.	Werken aan andere project taken.	42
Het product is niet klaar voor de deadline.	4	10	Gedisciplineerd te werk gaan en een goede planning volgen.	Studievertraging oplopen om de opdracht af te maken.	40
Onvoldoende toegang tot benodigde middelen (apparatuur of software)	5	8	Zorg ervoor dat alle benodigde middelen en softwarelicenties vroegtijdig beschikbaar zijn.	Werk samen met andere afdelingen of externe partijen om toegang tot middelen te waarborgen.	40
Het project maakt gebruik van technologie en expertise waar het stagebedrijf onvoldoende ervaring mee heeft, wat kan leiden tot een gebrek aan passende begeleiding voor de afstudeerde.	4	8	Identificeer welke kennis ontbreekt bij het bedrijf en zoek zelf naar externe experts, cursussen of tutorials om de nodige begeleiding en informatie te krijgen.	Vraag externe begeleiding van professionals of volg online cursussen en tutorials om ontbrekende kennis aan te vullen.	32
De opdracht is niet mogelijk en haalbaar binnen 20 weken.	3	10	De opdracht van tevoren controleren door de docenten.	Met de opdrachtgever en stagedocent een oplossing bedenken. Eventueel vragen om uitstel.	30
Gebrek aan documentatie tijdens het project.	3	9	Houd een logboek bij en documenteer elke stap van het proces met standaard templates.	Plan tijd voor documentatie en zorg dat alle belangrijke beslissingen en wijzigingen worden vastgelegd	27
Het per ongeluk beschadigen van niet-kwetsbare componenten tijdens het project.	8	3	Werk nauwkeurig en geordend en gebruik beschermingsmethoden zoals ESD-bescherming.	Zorg voor voldoende reservecomponenten en vervang beschadigde onderdelen indien nodig.	24

Afstudeerde raakt langdurig ziek.	2	10	Goed slapen en een gezond leefstijl hanteren. Bij lichaamswaarschuwingen de huisarts raadplegen voordat de situatie ernstig wordt.	Informeer zowel de bedrijfs- als de stagebegeleider over mogelijke oplossingen voor het uitvoeren van het project op een later tijdstip.	20
Afstudeerde raakt kortdurend ziek.	4	5	Goed slapen en een gezond leefstijl hanteren.	Uitzieken.	20
Uitval of afwezigheid van belangrijke begeleiders en stakeholder wat leidt tot vertraging in het project.	3	6	Zorg voor alternatieve contactpersonen en documenteer de voortgang duidelijk.	Neem contact op met een vervangende begeleider of stel beslissingen uit tot zij beschikbaar zijn.	18

Tabel 8, risicoanalyse versie 2

De risicoanalyses zijn tijdens het project geëvalueerd, waarbij is gekeken naar welke risico's zijn opgetreden, hoe deze zijn ontstaan (oorzaak), wat de impact van deze risico's op het project is geweest en hoe de afstudeerde deze risico's heeft opgelost. De opgetreden risico's zijn terug te vinden in de onderstaande tabel.

Risicoanalyse evaluatie			
Welke risico is er opgetreden?	Oorzaak?	Impact?	Oplossing?
De belangrijkste functies van het product werken niet zoals bedoeld of zijn geheel niet werkend.	De DAC-chip, die verantwoordelijk is voor de kernfunctionaliteit van het product, werkte niet. De exacte oorzaak is onduidelijk.	Grote impact, waardoor een functionerend product niet op tijd voor de deadline kon worden geleverd. Impactscore: <b>10</b>	Naar alternatieve DAC-chips gezocht, inclusief een betaalbaar development board, waarbij ik de functionaliteit vooraf heb getest voordat ik het herontwerp heb gemaakt en besteld.
Het product is niet klaar voor de deadline.	De kernfunctionaliteit van het product werkte niet.	Grote impact. De afstudeerde haalde de deadline niet en kon zijn scriptie niet indienen, wat ook een mentale impact had. Impactscore: <b>10</b>	In overleg met de stagedocent en begeleiders heeft de afstudeerde uitstel gevraagd. Er is een nieuwe planning opgesteld en extra maatregelen getroffen om de tweede deadline wel te halen.
Fouten in de BOM- of PCB-productiebestanden leiden ertoe dat de PCB niet	Vanwege tijdgebrek, oververmoeidheid, en de druk om de PCB	De impact was aanzienlijk, omdat de PCB niet werkte. De	Tijdens het weekend overgewerkt om de juiste componenten

functioneert, door verkeerde componenten of onjuiste assemblage.	snel te bestellen, is het de afstudeerde ontgaan dat de BOM niet correct was geladen bij de fabrikant. Dit resulteerde in componenten met verkeerde waarden en een onjuist geassembleerde PCB.	afstudeerde moest tijd besteden aan het achterhalen van de fout in de BOM, wat leidde tot vertragingen door het opnieuw bestellen en solderen van de juiste componenten. Impactscore: 9	te bestellen en deze later handmatig op de PCB gesoldeerd.
Gebrek aan ervaring met het ontwerpen van complexe PCB's.	Bij het ontwerpen moest de afstudeerde rekening houden met complexe PCB-richtlijnen, met name voor het mixen van analoge en digitale signalen om EMI te minimaliseren.	Het kostte veel tijd om de PCB-layoutrichtlijnen en -routes goed te begrijpen en te implementeren, wat leidde tot vertraging in het PCB-ontwerp en de bestelling ervan. Impactscore: 7	Rekening gehouden met de planning door wijzigingen aan te brengen. Hulp gevraagd aan een begeleider en vooral tutorials bekijken en voorbeelden bestudeerd om het PCB-ontwerp te versnellen.
Ontwerpfouten in de PCB leiden tot functionele problemen of het beschadigen van componenten.	Een ontwerpfout in de PCB werd over het hoofd gezien door de afstudeerde, wat ertoe leidde dat de microcontroller beschadigd raakte tijdens het testen van de USB-communicatie.	De microcontroller, het belangrijkste stuurcomponent, werkte niet meer, waardoor de PCB onbruikbaar werd. De impact was echter beperkt, aangezien de afstudeerde al van plan was een herontwerp te maken en een nieuwe PCB te bestellen. Impactscore: 6	Een nieuw PCB-ontwerp gemaakt waarbij de ontwerpfout werd gecorrigeerd, en vervolgens een nieuwe PCB besteld.
Afstudeerde raakt kortdurend ziek.	De afstudeerde werd ziek door zijn allergie, hooikoorts.	Milde vertraging in de werkzaamheden Impactscore: 3	Rust genomen en één dag ziekgemeld om te herstellen.
Geen beschikking tot het benodigde meetapparatuur en componenten	De afdeling beschikte niet over essentiële meetapparatuur zoals een oscilloscoop en labvoeding voor het testen en meten van de resultaten.	Lichte vertraging doordat tijd nodig was om de benodigde apparatuur te bestellen Impactscore: 2	Vroegtijdig besteld, zodat alle apparatuur beschikbaar was op het moment dat ze nodig waren voor de tests.

Tabel 9, Risicoanalyse evaluatie

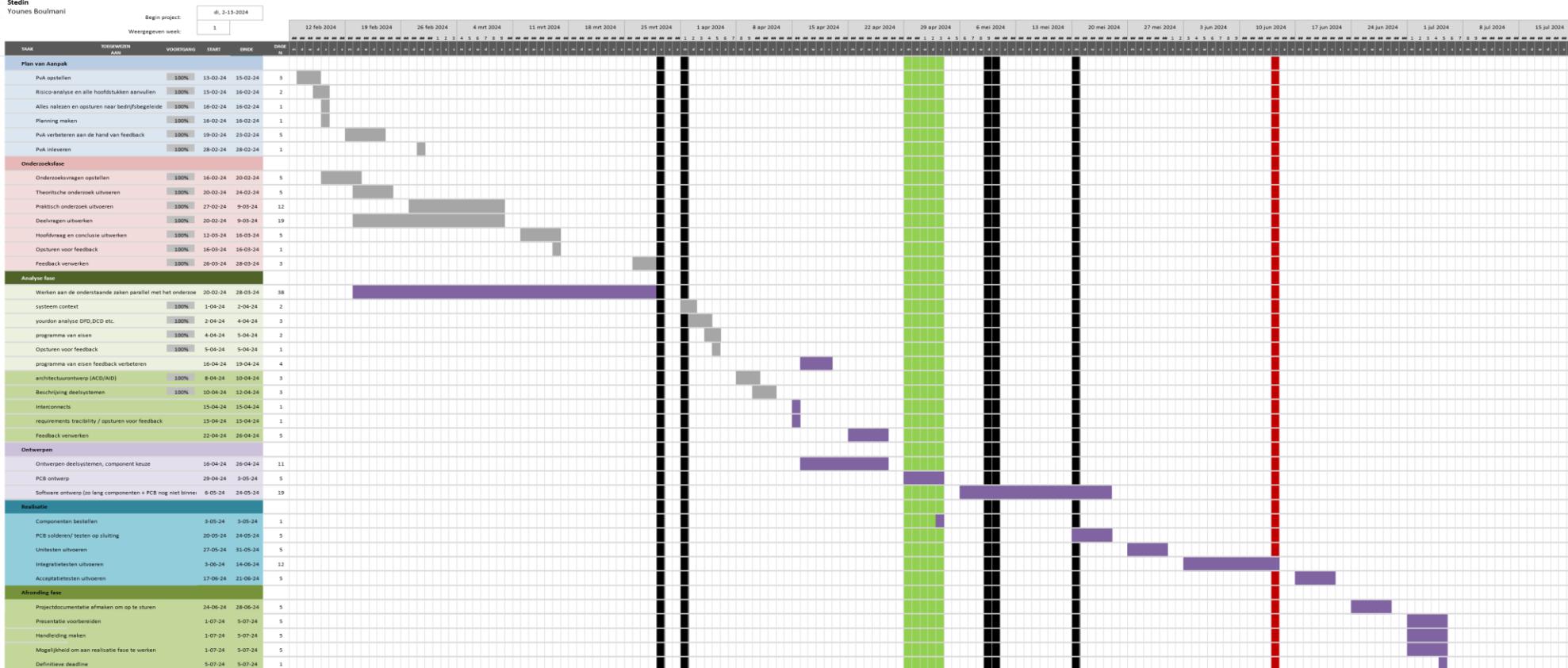
## 12 Planning

Dit hoofdstuk toont de verschillende versies van de projectplanning. De afstudeerde heeft de planning meerdere keren aangepast vanwege opkomende risico's of andere redenen tijdens het project. Deze aanpassingen zijn duidelijk weergegeven in een tabel. Voor een beter overzicht van de planning wordt aanbevolen het Excel-bestand te raadplegen.

## 12.1.1 Planning V1

### Afstudeerstage

Stedin  
Younes Boumani



### Note:

- Zwarte dagen = verplichte vrijdagen
- Groene dagen = vakantie
- Rode dag= Deadline

Planning Versie:	Rede voor nieuwe versie?	Hoe heb je dit gemanaged?
Versie 1	n.v.t	n.v.t

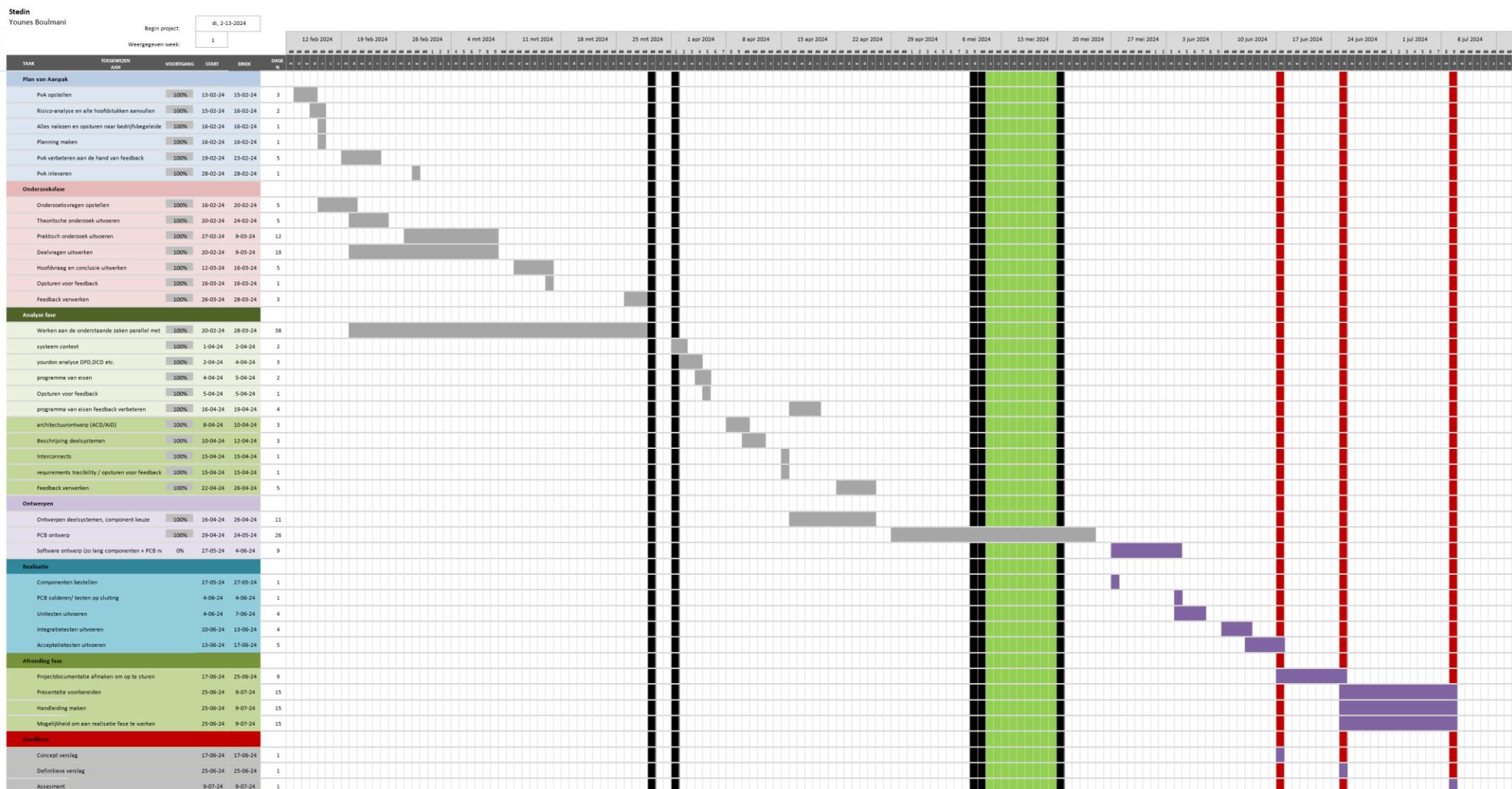
## 12.1.2 Planning V1.1

Afstudeerstage

Stedin  
Younes Boumani

Planning Versie:	Rede voor nieuwe versie?	Hoe heb je dit gemanaged?
Versie 1.1 Datum: 26-03-204	De planning is bijgewerkt; er is vertraging opgetreden in de onderzoeksfase, waardoor ik later ben begonnen met de architectuurfase.	Ik heb mijn planning aangepast door sneller door het programma van eisen en de architectuurfase heen te gaan, met focus op de belangrijkste zaken.

### 12.1.3 Planning V2

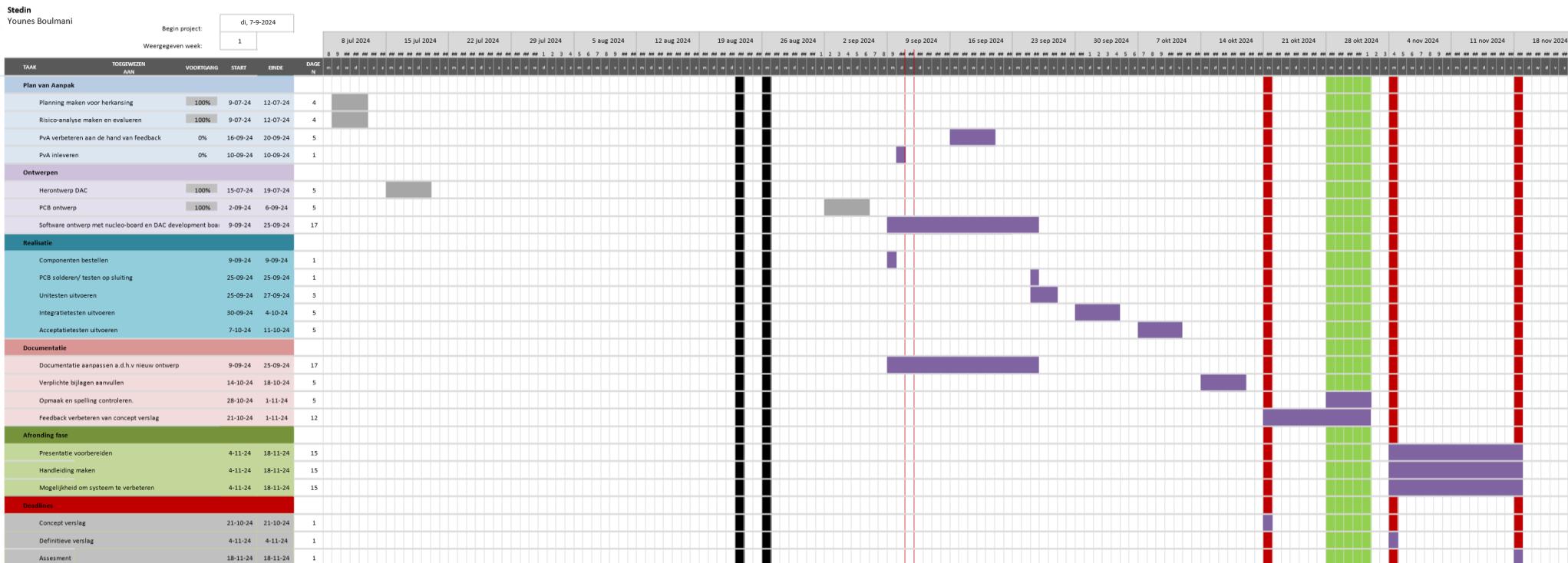


Planning Versie:	Rede voor nieuwe versie?	Hoe heb je dit gemanaged?
Versie 1.1 Datum: 26-03-204	De planning is bijgewerkt; er is vertraging opgetreden in de onderzoeksfase, waardoor ik later ben begonnen met de architectuurfase.	Ik heb mijn planning aangepast door sneller door het programma van eisen en de architectuurfase heen te gaan, door me te concentreren op de hoofdzaken.
Planning Versie 2 Datum: 27-5-2024	De afstudeerde heeft heel lang bij het ontwerp gezeten doordat het ontwerp complexer is dan verwacht. Ook het PCb-ontwerp heeft veel tijd gekost en het bestel procedure	Ik heb een nieuwe planning gemaakt Versie 2 om de deadlines te kunnen halen. Hierdoor is er veel minder tijd aan realiseren. De afstudeerde zal hierdoor erg moeten focussen op de hoofdzaken en de Must have eisen.

## 12.1.4 Planning herkansing

De afstudeerde heeft voor de herkansingsperiode een nieuwe planning gemaakt. Zie de planning hieronder.

### Afstudeerstage



### Note:

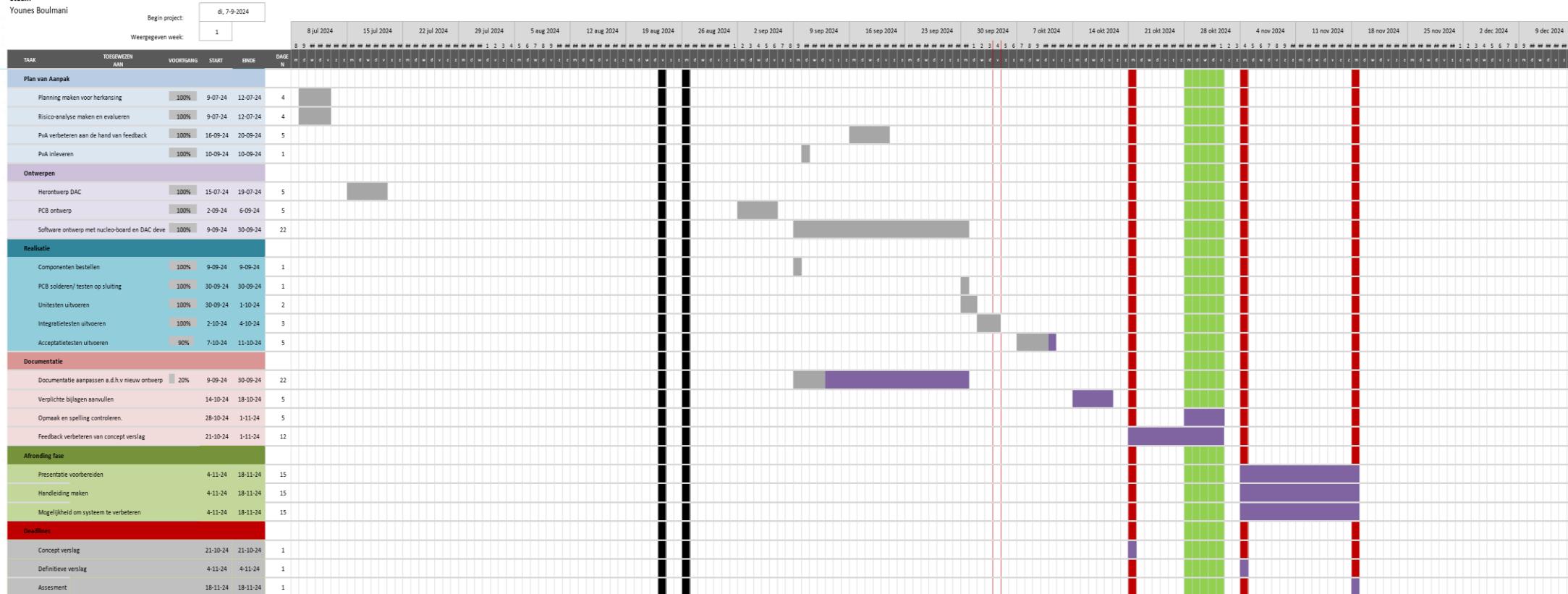
Zwarte dagen = verplichte vrijdagen

Groene dagen = vakantie

Rode dag= Deadline

Planning Versie:	Rede voor nieuwe versie?	Hoe heb je dit gemanaged?
Versie 1	n.v.t	n.v.t

## 12.1.5 Planning herkansing versie 2

Stedin  
Younes Boulmani

Planning Versie:	Rede voor nieuwe versie?	Hoe heb je dit gemanaged?
Versie 1	n.v.t	n.v.t
Versie 2: Datum: 12-9-2024	Het bestelproces liep vertraging op omdat de fabrikanten een aantal feedbackpunten hadden die ik moest aanpassen.	Door de planning aan te passen aan de nieuwe verzenddatum, heb ik één dag minder voor unit tests en integratietests. Om dit goed te managen, ga ik tijdens de extra vertraging, terwijl ik op mijn PCB wacht, zoveel mogelijk tests uitvoeren met de beschikbare development boards.

## 12.1.6 Planning herkansing versie 3



Planning Versie:	Rede voor nieuwe versie?	Hoe heb je dit gemanaged?
Versie 1	n.v.t	n.v.t
Versie 2: Datum: 12-9-2024	Het bestelproces liep vertraging op omdat de fabrikanten een aantal feedbackpunten hadden die ik moest aanpassen.	Door de planning aan te passen aan de nieuwe verzenddatum, heb ik één dag minder voor unit tests en integratietests. Om dit goed te managen, ga ik tijdens de extra vertraging, terwijl ik op mijn PCB wacht, zoveel mogelijk tests uitvoeren met de beschikbare development boards.
Versie 3 Datum: 23-10-2024	De definitieve deadline is bekendgemaakt. Deze is een paar weken later dan de deadline in de eerdere planningsversies.	n.v.t

## 13 Bronvermelding

1. Marselis, N. (z.d.). Wat is het V-model? <https://blog.postendekker.nl/wat-is-het-v-model>

---

# Bijlage B: onderzoeksartikel

## DA3-project Stedin

*“Hoe kun je het opgewekte Rogowski-spoelsignaal simuleren om het Omicron device te vervangen?”*

---

<b>Auteur:</b>	Younes Boulmani
<b>Stagedocent:</b>	De heer Fogarty
<b>Bedrijfsbegeleiders:</b>	Mark Burghout en Koen Peelen
<b>Titel:</b>	Plan van Aanpak (testopstelling)
<b>Datum van uitgifte:</b>	14-2-2024

## Inhoud

Onderzoeksplan.....	86
1    Probleemschets .....	86
2    Doelstelling.....	86
3    Onderzoeks vragen .....	86
4    Afbakening.....	87
4.1    Inclusief .....	87
4.2    Uitsluiting van het Onderzoek .....	88
5    Data .....	88
6    Methode.....	88
7    Resultaten .....	89
Onderzoeks artikel .....	90
Samenvatting.....	90
Inleiding.....	91
Hoe werkt de huidige testmethode? .....	92
Wat zijn de stappen die worden uitgevoerd tijdens de huidige testmethode? .....	92
Hoe werkt de Rogowski-spoel? .....	93
De werking van een Rogowski-spoel .....	93
Waarom wordt de Rogowski-spoel gebruikt? .....	94
Specificaties van de huidige Rogowski-spoel .....	95
Welke metingen of parameters worden onderzocht om de integriteit of functionaliteit van het Smart Device te beoordelen? .....	95
Wat zijn de nadelen of beperkingen van de huidige testmethode die moeten worden opgelost bij het ontwikkelen van een nieuwe methode? .....	96
Wat voor signaal moet er gesimuleerd worden om het Smart Device te kunnen testen?.....	97
Wat zijn de specificaties van het Rogowski-inductiesignaal dat wordt opgewekt door het Omicron device voor elk scenario? .....	97
Testomgeving.....	97
Hardware.....	97
Firmware .....	98
Stroom test scenario 1.....	99
Stroom test scenario 2.....	100
Stroom test scenario 3.....	101
THD% Test Scenario 1 .....	102
THD% Test Scenario 2 .....	103
THD% Test Scenario 3 .....	103

Welke eigenschappen van het Rogowski-spoelsignaal zijn cruciaal voor een nauwkeurige simulatie?	104
Hoe nauwkeurig moet het gesimuleerde signaal zijn om het Smart Device betrouwbaar te kunnen testen? .....	105
Wat is de beste methode om de Rogowski-spoelsignaal te simuleren? .....	106
Welke methoden/technologieën zijn beschikbaar om het signaal te simuleren? .....	106
Wat zijn de voor- en nadelen van deze methoden/technologieën? .....	107
Welke methode is het meest geschikt voor de huidige toepassing? .....	108
Conclusie .....	110
8     Bibliografie .....	111

## Versie Historiek

Revisie Datum	Auteur	Omschrijving
1.0	20-02-2024	Younes Boulmani
1.1	21-02-2024	Younes Boulmani
1.2	22-02-2024	Younes Boulmani
1.3	1-03-2024	Younes Boulmani
1.4	6-03-2024	Younes Boulmani
1.5	12-03-2024	Younes Boulmani
1.6	14-03-2024	Younes Boulmani
1.7	15-03-2024	Younes Boulmani
1.8	26-03-2024	Younes Boulmani
2.0	3-04-2024	Younes Boulmani

## Onderzoeksplan

In dit hoofdstuk wordt de probleemstelling en de doelstelling van het onderzoek aangegeven. Vervolgens worden een aantal onderzoeks vragen opgesteld en wordt er gekeken naar welke gegevens en methoden gebruikt moeten worden om deze vragen te beantwoorden. Daarnaast wordt een duidelijke afbakening gemaakt van waar er wel onderzoek wordt gedaan en waar niet, en wordt er gekeken naar welke resultaten worden verwacht.

### Probleemschets

Door de toenemende vraag naar elektriciteit, veroorzaakt door een snellere elektrificatie van zowel huishoudens als bedrijven, wordt het steeds belangrijker om het elektriciteitsnetwerk uitgebreider te monitoren (Stedin [K Peelen], z.d.) [1]. Netbeheerder Stedin is daarom bezig met het DA3-project. Hierbij worden Smart Devices geïnstalleerd in middenspanningsstations om parameters zoals stroom, THD en andere eigenschappen te meten. Voorafgaand aan de implementatie moeten deze Smart Devices worden getest, wat momenteel wordt uitgevoerd door een Omicron device. Dit testapparaat kan echter slechts één poort van het Smart Device tegelijkertijd testen. Bovendien is het apparaat groot en zwaar (afmetingen: 450x145x390mm; gewicht: 16,8 kg (OMICRON electronics, z.d.)[2]) en is vrij complex bedienbaar [1]. Wat het moeilijk maakt om deze Smart Devices en de hardware revisies ervan te testen. Een eenvoudigere oplossing is dus gewenst.

### Doelstelling

Het doel van het onderzoek is om te onderzoeken hoe de huidige testmethode vervangen kan worden door het vinden van een methode om het inductiesignaal van de Rogowski-spoel, dat normaal gesproken door de Omicron wordt opgewekt, te simuleren. Het uiteindelijke doel is om een snellere en eenvoudigere testopstelling te ontwikkelen die het Smart Device kan testen, waardoor de Omicron overbodig wordt.

Het vinden van deze snellere en eenvoudigere testmethode kan Stedin aanzienlijke kosten- en tijdsbesparingen opleveren, wat van economisch belang is. Bovendien heeft het ook maatschappelijk belang, omdat een efficiëntere testopstelling de ontwikkeling van het Smart Device bevordert. Dit leidt tot een betere monitoring van het net, waardoor het huidige probleem van de toename van de elektriciteitsvraag beter kan worden aangepakt.

### Onderzoeks vragen

In dit hoofdstuk zijn de onderzoeks vragen geformuleerd die relevant zijn voor het bereiken van de doelstelling van het onderzoek.

#### Hoofdvraag

Hoe kun je het opgewekte Rogowski-spoelsignaal simuleren om het Omicron device te vervangen?

## Deelvragen

### *Hoe werkt de huidige testmethode?*

- Wat zijn de stappen die worden uitgevoerd tijdens de huidige testmethode?
- Hoe werkt de Rogowski-spoel?
- Welke metingen of parameters worden onderzocht om de werking of betrouwbaarheid van het Smart Device te beoordelen?
- Wat zijn de nadelen of beperkingen van de huidige testmethode die moeten worden opgelost bij het ontwikkelen van een nieuwe methode?

### *Wat voor signaal moet er gesimuleerd worden om het Smart Device te kunnen testen?*

- Wat zijn de specificaties van het Rogowski-inductiesignaal dat wordt opgewekt door het Omicron device voor elk scenario?
- Welke eigenschappen van het Rogowski-spoelsignaal zijn cruciaal voor een nauwkeurige simulatie?
- Hoe nauwkeurig moet het gesimuleerde signaal zijn om het Smart Device betrouwbaar te kunnen testen?

### *Wat is de beste methode om de Rogowski-spoelsignaal te simuleren?*

- Welke methoden/technologieën zijn beschikbaar om het signaal te simuleren?
- Wat zijn de voor- en nadelen van deze methoden/technologieën?
- Welke methode is het meest geschikt voor de huidige toepassing?

## Afbakening

In dit hoofdstuk wordt aangegeven waar het onderzoek wel en niet betrekking op heeft en wordt een duidelijke afbakening gemaakt.

## Inclusief

### **Het onderzoek richt zich specifiek op:**

- Het ontwikkelen van een snellere en eenvoudigere testopstelling voor het efficiënt testen van Smart Devices, geïnstalleerd in middenspanningsruimtes.
- Het simuleren van het opgewekte signaal van de Rogowski-spoel (CR-200), waarbij de resultaten en conclusies ook relevant zullen zijn voor andere current sensors met vergelijkbare eigenschappen.
- Beperking van de signaalsimulatie tot de gewenste testscenario's.
- Het simuleren van signalen voor de diverse gewenste testscenario's.
- Het bepalen van de benodigde nauwkeurigheid van het gesimuleerde signaal voor het testen van het MEM-101-systeem (, een deelsysteem van het Smart Device dat de stroomkwaliteit meet).
- Evaluatie van de effectiviteit van de methoden met inachtneming van de klanteisen van Stedin.
- Het onderzoek beperkt zich tot het simuleren van het Rogowski-spoelsignaal en zal niet ingaan op andere mogelijke testmethoden.

## Uitsluiting van het Onderzoek

### **Het onderzoek omvat niet:**

- De werking van andere current sensors dan de Rogowski-spoel (CR-200).
- Tests ter verificatie van de effectiviteit en kwaliteit van de methoden.
- Onderzoek naar of de gewenste testscenario's ook leiden tot een betere monitoring van het elektriciteitsnetwerk en het aanpakken van de toename van de elektriciteitsvraag.
- Andere aspecten van de werking van het Smart Device binnen het elektriciteitsnetwerk.
- Andere mogelijke toepassingen van de ontwikkelde testmethode buiten het specifieke gebruik bij Stedin.
- Technische evaluatie van apparaten of methoden die niet direct relevant zijn voor het simuleren van het Rogowski-spoelsignaal.

## Data

Om een antwoord te kunnen geven op de onderzoeksvergadering, zijn verschillende gegevens (data) vereist. Hieronder worden de benodigde data en de bronnen waaruit ze verkregen kunnen worden, uiteengezet:

- ⊕ Informatie over de werking van een Rogowski-spoel uit literatuur en datasheets.
- ⊕ Meetresultaten van praktisch onderzoek voor het bepalen van het minimale benodigde gesimuleerde signaal.
- ⊕ Literatuurbronnen over simulatiemethoden en -technologieën.
- ⊕ Kennis van de Electrical Engineers binnen Stedin over aspecten die betrekking hebben op het onderwerp.

Alle bronnen die tijdens het onderzoek worden geraadpleegd, zijn te vinden onder het kopje "Bibliografie".

## Methode

In dit hoofdstuk wordt de methode van het onderzoek besproken. Het onderzoek zal worden uitgevoerd aan de hand van de volgende aanpak:

### ***1. Vooronderzoek:***

- Analyse van de huidige testmethode, inclusief de stappen die worden uitgevoerd en de werking van de Rogowski-spoel.
- Onderzoek naar de metingen of parameters die worden gebruikt om de integriteit en functionaliteit van het Smart Device te beoordelen.
- Identificatie van nadelen of beperkingen van de huidige testmethode die moeten worden aangepakt bij de ontwikkeling van een nieuwe methode.

## 2. Dataverzameling:

- Raadplegen van literatuur en datasheets om inzicht te krijgen in de werking van de Rogowski-spoel.
- Uitvoeren van praktisch onderzoek om meetresultaten te verkrijgen en het minimale benodigde gesimuleerde signaal te bepalen.
- Bestuderen van literatuur over simulatiemethoden en -technologieën om geschikte benaderingen te identificeren.

## 3. Expertconsultatie:

- Overleg met Electrical Engineers binnen Stedin om inzicht te krijgen in de haalbaarheid van voorgestelde simulatiemethoden en voor praktisch advies.

De benodigde gegevens worden verzameld via literatuuronderzoek, praktisch onderzoek en expertconsultatie, met alle bronnen vermeld in de "Bibliografie". Literatuurbronnen komen uit betrouwbare databanken zoals Google Scholar, JSTOR, etc., waarbij de betrouwbaarheid kritisch wordt beoordeeld op basis van de auteur, citaties, publicatiedatum en opdrachtgever. Volgens Van Ravenstein (2023) [1] is dit een goede methode om de betrouwbaarheid van bronnen te controleren. Deze aanpak leidt tot een diepgaand inzicht om de onderzoeksraag te beantwoorden en een effectieve simulatie van het Rogowski-spoelsignaal te ontwikkelen.

## Resultaten

- Begrip van Rogowski-spoelen en de vereisten voor het simuleren van het opgewekte signaal.
- Identificatie van de huidige testmethoden, hun stappen, beperkingen en de parameters die de integriteit en functionaliteit van het Smart Device beoordelen.
- Specificaties van het benodigde gesimuleerde signaal voor het testen van het Smart Device, inclusief eigenschappen en nauwkeurigheidstoleranties.
- Evaluatie van verschillende methoden en technologieën voor het simuleren van het Rogowski-spoelsignaal, inclusief hun voor- en nadelen.
- Aanbevelingen voor de ontwikkeling van een effectieve simulatiemethode om het Omicron-device te vervangen voor testdoeleinden.

# Onderzoeksartikel

## Samenvatting

Dit onderzoek, uitgevoerd in het kader van Stedin's DA3-project, richt zich op het ontwikkelen van een efficiëntere testopstelling voor Smart Devices (bestaande uit een MEM101 een multi measurement unit die de stroomeigenschappen meet) in middenspanningsstations. De aanleiding voor deze studie ligt in de toenemende elektriciteitsvraag, versneld door de elektrificatie van huishoudens en bedrijven, wat het belang van uitgebreide netwerkmonitoring benadrukt. De huidige testmethode, gebruikmakend van het Omicron Device en Rogowski-spoelen, kent een hoge complexiteit en is tijdrovend, wat een snellere en eenvoudigere oplossing wenselijk maakt.

Centraal staat de onderzoeksraag: "Hoe kun je het opgewekte Rogowski-spoelsignaal simuleren om het Omicron device te vervangen?" Om deze vraag te beantwoorden, richt het onderzoek zich op de werking en beperkingen van de huidige testmethode en Rogowski-spoel, evenals op de specificaties van het te simuleren Rogowski-inductiesignaal. Verschillende simulatiemethoden, waaronder Directe Digitale Synthese (DDS), het gebruik van een DAC-chip, Function Generator IC's, Programmeerbare Microcontrollers, Analoge Circuitontwerpen, FPGA en softwareprogramma's zoals MATLAB, worden verkend om de meest geschikte methode voor de huidige toepassing te identificeren.

De onderzoeksraag omvat een combinatie van literatuuronderzoek, praktische experimenten voor het bepalen van het minimale benodigde gesimuleerde signaal, en consultatie met Electrical Engineers binnen Stedin. Dit multidisciplinaire aanpak stelt het onderzoek in staat om een diepgaand inzicht te verkrijgen in de vereisten voor een effectieve simulatie van het Rogowski-spoelsignaal.

Uit het onderzoek is gebleken dat het opgewekte Rogowski-spoelsignaal, specifiek voor de Current Sensor CR-200, beschreven kan worden met de formule  $V_{out}(t) = I(t) \times \frac{1}{10000}$ . Deze bevinding benadrukt het belang van nauwkeurige simulatie van het Rogowski-spoelsignaal. Afwijkingen in het gesimuleerde signaal kunnen leiden tot significante verschillen in meetresultaten bij de MEM101, vooral gezien de precisie waarmee de MEM101 unit kleine veranderingen detecteert.

Diverse simulatiemethoden, waaronder het gebruik van een door een microcontroller aangestuurde DAC-chip, zijn onderzocht. Hierbij zijn de voor- en nadelen van elke methode geanalyseerd en vergeleken op basis van criteria zoals flexibiliteit, nauwkeurigheid, kostenefficiëntie, de leercurve, en het vermogen om meerdere signalen tegelijkertijd te genereren. Uit dit onderzoek is gebleken dat de methode van het gebruik van een DAC-chip het best presteert op deze criteria en zich onderscheidt door zijn hoge nauwkeurigheid/resolutie en flexibiliteit. Deze eigenschappen zijn essentieel voor het genereren van complexe signalen, die een nauwkeurige simulatie van het Rogowski-spoelsignaal mogelijk maken. Deze methode maakt ook de generatie van meerdere signalen mogelijk, waardoor het haalbaar wordt om gelijktijdige tests op meerdere poorten van het Smart Device uit te voeren, resulterend in aanzienlijke tijdsbesparingen.

De studie concludeert dat het gebruik van een DAC-chip de meest geschikte methode is voor het simuleren van het Rogowski-spoelsignaal, gebaseerd op de vereisten en de klantwensen van Stedin, dankzij de hoge precisie en flexibiliteit. Dit legt de basis voor de ontwikkeling van efficiëntere testopstellingen voor Smart Devices en biedt perspectieven voor toekomstig onderzoek naar signaalsimulatie voor geavanceerde Smart Devices, wat bijdraagt aan een verbeterde monitoring van het elektriciteitsnetwerk.

## Inleiding

In een tijdperk waarin de elektrificatie van huishoudens en bedrijven een ongekende stijging in de elektriciteitsvraag veroorzaakt, benadrukt het DA3-project van Stedin de noodzaak voor geavanceerde netwerkmonitoring. In dit project worden Smart Devices geïnstalleerd in ruimtes van middenspanningsstations om de eigenschappen van elektrische velden te meten, waarbij de Smart Devices gebruikmaken van Rogowski-spoelen. Voordat deze Smart Devices in gebruik worden genomen, moeten ze eerst getest worden op hun functionaliteit. De huidige testmethode maakt gebruik van een Omicron-testapparaat dat een elektrisch veld van een middenspanningsstation simuleert en meerdere scenario's nabootst. Dit apparaat is erg duur, vrij complex te bedienen en kost veel tijd om de Smart Devices te testen. Naar aanleiding van dit probleem richt dit onderzoek zich op de ontwikkeling van een efficiëntere testopstelling voor Smart Devices in middenspanningsstations, specifiek door het simuleren van het Rogowski-spoelsignaal, dat essentieel is voor het testen van deze apparaten. Het hoofddoel is het vervangen van de huidige, complexe en tijdrovende testmethode met het Omicron Device, wat de ontwikkeling en implementatie van Smart Devices aanzienlijk zou versnellen.

voor dit onderzoek is tweevoudig: ten eerste het economische belang van kosten- en tijdsbesparing voor Stedin, en ten tweede het maatschappelijke belang van het verbeteren van de netwerkmonitoring om te kunnen voldoen aan de groeiende vraag naar elektriciteit. Het theoretisch kader wordt gevormd door bestaande kennis over Rogowski-spoelen en hun toepassing in het meten van elektrische stromen, aangevuld met onderzoek naar verschillende simulatiemethoden, waaronder Directe Digitale Synthese (DDS).

Het onderzoek richt zich op het simuleren van het Rogowski-spoelsignaal en sluit de evaluatie van andere current sensors en testmethoden uit. De onderzoeksraag "Hoe kun je het opgewekte Rogowski-spoelsignaal simuleren om het Omicron device te vervangen?" wordt ondersteund door diverse deelvragen die betrekking hebben op de huidige testmethode, de specificaties van het Rogowski-spoelsignaal, en de evaluatie van verschillende simulatiemethoden.

De rechtvaardiging voor dit onderzoek ligt in het potentieel om een significante bijdrage te leveren aan de efficiëntie en effectiviteit van het testen van Smart Devices, wat cruciaal is voor de toekomst van netwerkmonitoring en -beheer.

## Hoe werkt de huidige testmethode?

In dit hoofdstuk wordt gekeken naar de stappen die worden uitgevoerd tijdens de huidige testmethode, hoe deze werkt, en wat de beperkingen ervan zijn.

### Wat zijn de stappen die worden uitgevoerd tijdens de huidige testmethode?

Voor het uitwerken van deze deelvraag zijn er bronnen binnen Stedin geraadpleegd. Zo heeft de afstudeerde collega's geraadpleegd, maar ook interne documenten binnen Stedin die de testprocedure toelichten (Stedin, z.d.) [8].

1. **Voorbereiding van de Omicron device:** De testengineer start de Omicron op en alle testsoftwareprogramma's en stelt een van de gewenste scenario's in via de PC.
2. **Aansluiten van de Kabels:** Vier kabels (L1, L2, L3, en N) worden aangesloten op de belasting (load).
3. **Positionering van de Rogowski-spoel:** De Rogowski-spoel, verbonden met het Smart Device, wordt loodrecht ten opzichte van de primaire stroomkabel gepositioneerd om de nauwkeurigheid van de meting te optimaliseren. Een variatie van 3% wordt als acceptabel beschouwd voor de testdoeleinden.
4. **Meting en Signaalverwerking:** De Rogowski-spoel meet de waarden van het ingestelde scenario en stuurt deze naar het slimme apparaat. Het MEM10x-component zet dit analoge signaal om in een digitaal signaal met een ADC-converter en berekent vervolgens de kenmerken van het signaal (THD, amplitude van de harmonischen, voltage, etc.). Deze gegevens worden doorgestuurd naar de RTU (hoofdcontrole-eenheid).
5. **Verificatie door de Testengineer:** De testengineer controleert de berekende waarden via de RTU met behulp van een handheld display.
6. **Conclusie van de Test:** Als de berekende waarden overeenkomen met het ingestelde testscenario, is de test geslaagd en voldoet het Smart Device aan de verwachtingen.

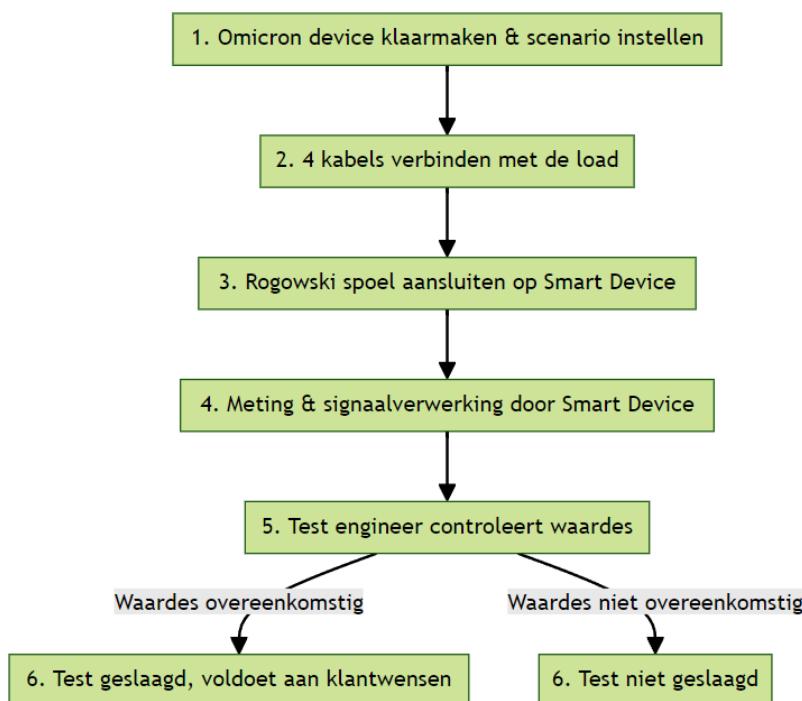
### Tijdsduur:

- Het opstartproces duurt 10 minuten.
- Het aansluiten van de kabels neemt circa 5 minuten in beslag.
- De verificatie van de gegevens en de bevestiging van de testresultaten duren samen 10 minuten.

Voor het testen van één van de maximaal 32 poorten van het Smart Device wordt bovenstaande procedure gevuld. Bij het testen van meerdere poorten worden stap 3 en 5 herhaald, wat ongeveer 10 minuten extra tijd in beslag neemt per poort. Het volledig testen van alle poorten duurt daarom circa 335 minuten, wat neerkomt op ongeveer 5,5 uur. (zie vergelijking {1}).

$$1) \text{Testprocedure tijd} = 25 + 31 \times 10 = 335 \text{ minuten}$$

Op de volgende pagina is een flowchart te zien van de huidige testmethode (Figuur 1).



Figuur 1, Flowchart van de huidige testmethode.

## Hoe werkt de Rogowski-spoel?

Deze paragraaf legt de werking uit van de Rogowski-spoel, waarom deze wordt gebruikt, en somt enkele specificaties op van de Rogowski-spoel die momenteel wordt gebruikt.

### De werking van een Rogowski-spoel

De Rogowski-spoel is een elektrisch meetinstrument dat wordt gebruikt om wisselstroom (AC) te meten. Het is een specifiek type stroomtransformator die zich onderscheidt door zijn flexibiliteit, nauwkeurigheid, en het vermogen om grote stromen te meten zonder direct contact te maken met de hoogspanningsleiding (Parsa-Sirat et al., 2023)[4]. De werking van de Rogowski-spoel en de reden voor het gebruik ervan zijn wetenschappelijk onderbouwd en worden hieronder uiteengezet.

Het principe van de Rogowski-spoel is het meten van de grootte van de geïnduceerde magnetische flux die de stroom in de geleider veroorzaakt. De opgewekte spoelspanning is direct evenredig met de veranderingssnelheid van de stroom. Dit maakt de spoel bijzonder nuttig als meetinstrument voor zowel wisselstroom als snelle transiënte stromen, zonder de verzadiging of kernverliezen die normaal geassocieerd worden met ijzerkern transformatoren. (Samimi et al., 2015) [5].

De basisformule voor de spanning  $V(t)$  geïnduceerd in een Rogowski-spoel kan worden uitgedrukt als [4]:

$$2) V(t) = M \frac{di(t)}{dt}$$

- $V(t)$  is de geïnduceerde spanning in de spoel
- $M$  is de wederzijdse inductie tussen de spoel en de geleider. Dit is een constante die varieert bij elke Rogowski-spoel afhankelijk van het doorsnedegebied van de wikkeling, het aantal windingen en de lengte van de spoel.

- $di(t)/dt$  is de snelheid van verandering van de stroom in de geleider.

Omdat de uitgang van de Rogowski-spoel evenredig is met de afgeleide van de stroom, is een integrator nodig om een signaal te produceren dat direct evenredig is met de stroom zelf. De integrator zet het differentiële signaal om in een niveau dat overeenkomt met de werkelijke stroom door de geleider, zie vergelijking {3} (Draxler, 2011)[6].

$$3) I = \int V_{out} dt$$

Hieronder wordt kort nog het principe van een Rogowski-spoel uitgelegd:

- **Opbouw:**

De Rogowski-spoel is een flexibele, ringvormige spoel die rond een stroomvoerende geleider wordt geplaatst. Het is nauwkeurig gewikkeld om consistent metingen te verrichten [5].

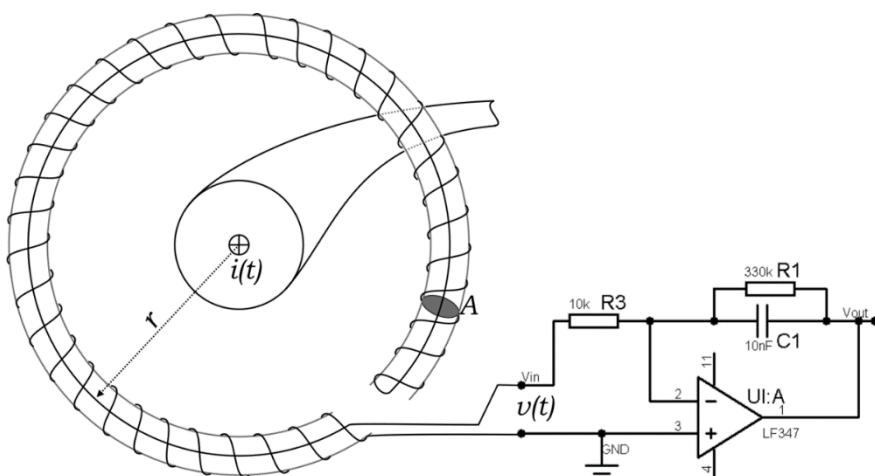
- **Meetprincipe:**

Veranderende stromen binnen de geleider creëren een veranderend magnetisch veld, dat een spanning in de Rogowski-spoel induceert. Deze spanning is proportioneel met de snelheid van stroomveranderingen over tijd [5].

- **Integratie:**

Een integratorschakeling converteert het geïnduceerde signaal naar een waarde die evenredig is met de stroom zelf, waardoor directe metingen mogelijk zijn [6].

Hieronder is een schema te vinden dat de opbouw van een Rogowski-spoel weergeeft:



Figuur 2, Schema van de opbouw van een Rogowski-spoel

### Waarom wordt de Rogowski-spoel gebruikt?

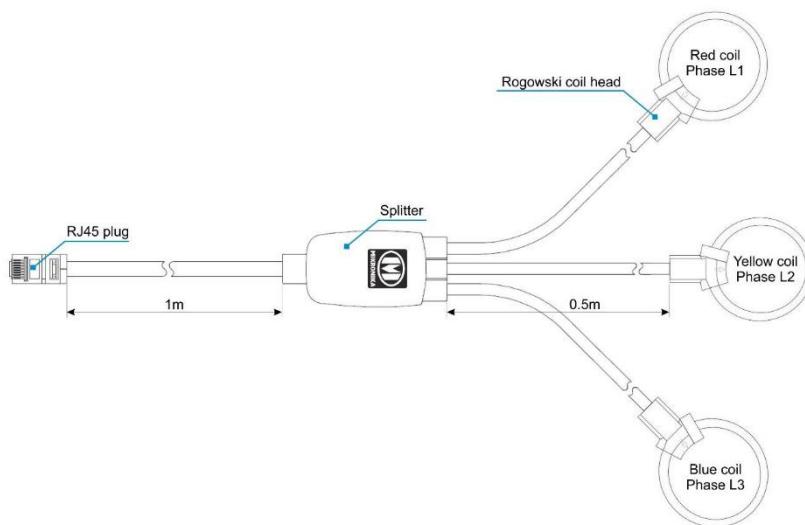
Hieronder zijn bepaalde redenen opgesomd waarom een Rogowski-spoel wordt gebruikt [4]:

- ❖ Niet-invasief en Veilig: Maakt geen direct contact met hoogspanningsleidingen, wat het een veilige meetmethode maakt.
- ❖ Flexibiliteit en Gemak: Flexibel ontwerp voor eenvoudige installatie rond geleiders van diverse vormen en maten.

- ❖ Breed Meetbereik: Kan een brede reeks stromen meten zonder verzadiging, in tegenstelling tot veel traditionele stroomtransformatoren.
- ❖ Hoge Nauwkeurigheid en Lineariteit: Behoudt nauwkeurigheid en lineariteit over een breed frequentiebereik, geschikt voor zowel sinusvormige als niet-sinusvormige stromen.

### Specificaties van de huidige Rogowski-spoel

Bij de huidige testmethode wordt gebruik gemaakt van de Rogowski-spoel CR-200 stroomsensor van Mikronika. In de afbeelding hieronder is een schematische weergave te zien van de Rogowski-spoel. In de splitter worden de signalen van de Rogowski-spoel geïntegreerd. Deze spanningen L1+, L1-, ..., L3- en nog een paar GND lijnen voor shielding worden via een RJ45-connector aangesloten op het Smart Device (Mikronika, 2019) [7].



Hieronder zijn een aantal belangrijke elektrische eigenschappen van de meetspoel weergeven:

Parameter	Value
Current Range	3x 250A <sup>2</sup>
Ratio V <sub>RMS</sub> at 1000ARMS / 50Hz	100mV
Bandwidth	1Hz to 100kHz(-3dB)

Tabel 10, elektrische eigenschappen van de meetspoel

Uit deze eigenschappen kan geconcludeerd worden dat bij deze Rogowski-spoel de verhouding tussen de uitgangsspanning en een stroom van 1 ampère 0,1 mVrms is. Hierbij is M bij deze Rogowski-spoel  $\frac{1}{10000}$ , zie vergelijking {2}.

### Welke metingen of parameters worden onderzocht om de integriteit of functionaliteit van het Smart Device te beoordelen?

Het Smart Device bevat een MEM101-apparaat, dat is ontworpen om de kwaliteit van elektrische stroom te evalueren. Het kan verschillende parameters meten, waaronder het percentage totale harmonische vervorming (THD%), de amplitude van de harmonische spanningen van de 2e tot de 50e

harmonische, en de stromen van de drie fasen in RMS-waarden, samen met andere relevante parameters. (Mikronika, 2022)[9].

Stedin past momenteel een testmethode toe waarbij de drie fasestromen met variërende waarden worden gegenereerd door de Omicron. Daarnaast worden ook signalen gestuurd met een bepaald THD-percentage, waarbij de oneven harmonischen tot en met de 13e harmonische kunnen worden ingesteld qua percentage. De MEM101 meet de signalen die per scenario worden gegenereerd en geeft deze output door naar de RTU, die vervolgens door een testengineer wordt gecontroleerd op overeenstemming met de vooraf ingestelde waarden van de testscenario's voor verificatie [8].

De test scenarios zijn te verdelen verdeeld in twee categorieën: "Stroom Test Scenario's" en "Total Harmonic Distortion (THD%)", zie hieronder een tabel voor een helder overzicht.

Categorie	Testscenario	Parameters
<u>Stroom Test Scenario's</u>	1	L1, L2, L3: 25 Ampère
	2	L1, L2, L3: 6,8 Ampère
	3	L1, L2, L3: 9,186 Ampère
<u>THD% Test Scenario's</u>	1	Stroom L1, L2, L3: 20 A; THD% = 29,15%. Ordes: 3e = 15%, 5e = 20%, 7e = 10%, 9e = 8%, 11e = 6%, 13e = 5%
	2	Stroom L1, L2, L3: 20 A; THD% = 15,8%. Ordes: 3e = 15%, 5e = 5%
	3	Stroom L1, L2, L3: 20 A; THD% = 31,6%. Ordes: 3e = 30%, 5e = 5%, 7e = 10%

Tabel 11, Test scenario's

### Wat zijn de nadelen of beperkingen van de huidige testmethode die moeten worden opgelost bij het ontwikkelen van een nieuwe methode?

Hieronder zijn enkele beperkingen van de huidige testmethode opgesomd die belangrijk zijn om mee te nemen in de ontwikkeling van de nieuwe testopstelling [8].

#### 1. Beperkte Ervaring met Omicron:

- Het gebruik van de Omicron voor het instellen van testscenario's is beperkt geweest tot enkele keren, wat resulteert in onvoldoende ervaring en kennis bij de huidige werknemers om de scenario's aan te passen of te wijzigen.
- De Omicron-software is slechts beschikbaar op één laptop, die verbonden moet zijn via een netwerkverbinding, waardoor testen alleen op deze specifieke laptop uitgevoerd kunnen worden.

#### 2. Complexiteit van de Handleiding:

- De handleiding van de Omicron is ingewikkeld, wat het moeilijk maakt voor werknemers om het apparaat efficiënt te gebruiken of aanpassingen aan de testscenario's te maken zonder uitgebreide training.

**3. Beschikbaarheid van het Omicron device:**

- Het Omicron device wordt gehuurd van een andere afdeling binnen Stedin, wat leidt tot potentiële beschikbaarheidsproblemen als het apparaat teruggevraagd wordt. De aanschaf van een nieuw Omicron device is bovendien zeer kostbaar en tijdrovend.

**4. Tijdrovend Verificatieproces:**

- Het verificatieproces van de meetwaarden is langdurig en inefficiënt. Voor elke fase wordt een waarde gegenereerd op een enkele MEM-poort, wat betekent dat voor het testen van drie fasen de processtappen meerdere keren herhaald moeten worden. Dit omvat het controleren van waarden bij de RTU, het verplaatsen tussen het Smart Device en de laptop waarop de Omicron-applicatie draait voor elke poort die getest wordt.

## Wat voor signaal moet er gesimuleerd worden om het Smart Device te kunnen testen?

In dit hoofdstuk wordt onderzoek gedaan naar de specificaties en eigenschappen van het Rogowski-spoelsignaal dat wordt gegenereerd, en wordt bepaald welke van deze eigenschappen belangrijk zijn voor een nauwkeurige simulatie.

## Wat zijn de specificaties van het Rogowski-inductiesignaal dat wordt opgewekt door het Omicron device voor elk scenario?

Om te bekijken wat de specificaties zijn van het signaal dat gegenereerd wordt door een Rogowski-spoel voor elk tests scenario, is er een praktisch onderzoek uitgevoerd.

Hieronder volgt kort de testprocedure van het praktisch onderzoek die is uitgevoerd.

- De testengineer verzamelt de benodigde spullen en installeert alle software die terug te vinden is onder de kopjes "Hardware" en "Firmware".
- De testengineer stelt één van de 6 gewenste tests scenario's in die terug te vinden zijn in Tabel 2.
- De testengineer bekijkt op de picoscoop het outputsignaal van de Rogowski-spoel.
- De testengineer analyseert de meetresultaten en trekt een conclusie.

Stappen 2 en 3 herhalen zich totdat alle tests scenario's zijn getest.

Hieronder wordt de testomgeving, de hardware en firmware die nodig waren voor het praktisch onderzoek toegelicht.

### Testomgeving

De afstudeerde heeft de test scenarios uitgevoerd in het LAB van Stedin in Delft. In deze ruimte bevindt zich het Smart Device.

### Hardware

De afstudeerde heeft de volgende hardware gebruikt om het praktisch onderzoek uit te voeren

- 2 kanaals Voedingsbron (U min. 10V en I min.100mA).
- Omicron CMC 353 device
- De CR-200 current sensor (Mikronika)
- Kabels en bananen splitters.
- Laptop waarop de Omicron applicatie is geïnstalleerd.
- Een opengeknipte UTP-kabel.
- Picoscope 2204A

- Inverterende versterker met een gain van 186.

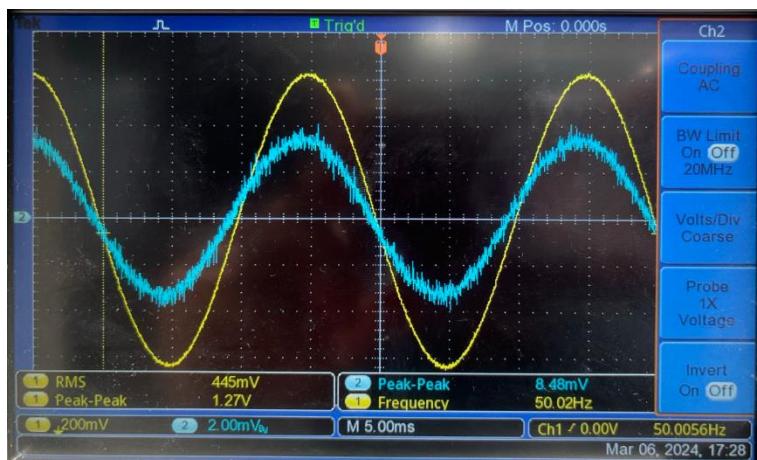
### Firmware

De afstudeerde heeft de volgende software gebruikt om het praktisch onderzoek uit te voeren.

- Omicron Test Universe-applicatie (de code waarin de tests scenario's zijn geschreven).
- Software voor de Picoscoop 2204A

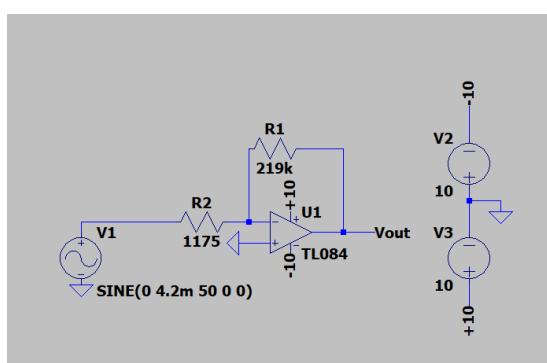
#### 1. Note:

*Doordat het verwachte resultaat voor stroomtestscenario 1 een sinussignaal zal zijn met een piek van 3,5mV en de kleinste gevoeligheid van de beschikbare picoscoop binnen Stedin 50mV/div is, zal het resultaat niet goed weergegeven worden op de scope. Om dit probleem op te lossen, heeft de afstudeerde een inverterende versterker gemaakt met een gain van 186, zie Figuur 4. De afstudeerde heeft de schakeling getest op school met als testinput een sinussignaal van 50Hz en 4,2mVpiek. Zie hieronder het resultaat:*

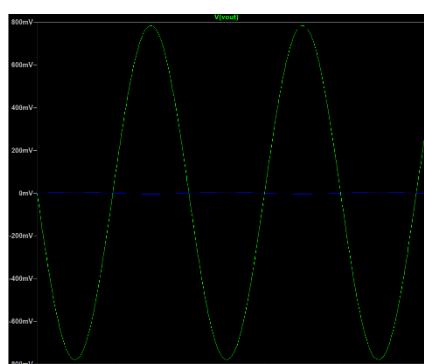


De werkelijke gain van de opamp kan dus berekend worden als volgt:

$$4) \text{Gain} = \frac{V_{\text{out}} \text{ p-p}}{V_{\text{in}} \text{ p-p}} = \frac{1,27}{0,00848} \approx 150$$

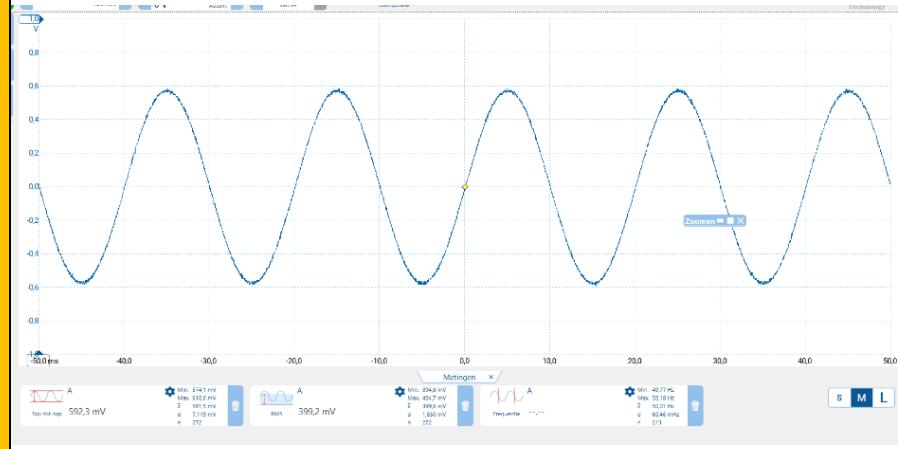


Figuur 4, Inverterende versterking schakeling met een gain van 186



Figuur 3,  $V_{\text{out}} = 788\text{mV}$  piek, dit komt dus overeen met een gain van 186

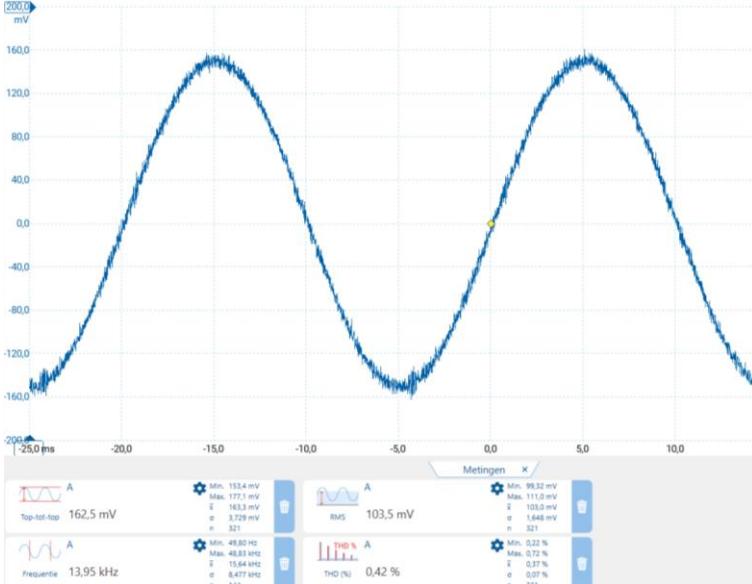
## Stroom test scenario 1

<b><u>Stroom test scenario</u></b> <b>1</b>	L1, L2 en L3: 25 Ampère rms Fase L1,L2 en L3 : 0, -120 en 120°. <b>2. Note :</b> <i>Door het gebrek aan meetapparatuur is alleen het signaal van L1 gemeten.</i>
Verwachte uitkomst	<p>Volgens de formules van een Rogowski-spoel (zie {2} en {3}) en de gegevens in de datasheet van de CR-200 [7] ( zie Tabel 1) verwacht ik een sinus signaal van 2,5 mVrms, zie hieronder de berekening:</p> $5) V_{out}(t) = I(t) \times \frac{1}{10000}$ $V_{out}(t) = 25\sqrt{2} \times \sin(2\pi \times 50 t) \times \frac{1}{10000} = \frac{35,3}{10000} \times \sin(2\pi \times 50t) \text{ Volt}$ <p>Doordat ik gebruik heb gemaakt van een inverterende versterker met een werkelijke gain van 150 (zie note 1). Verwacht ik dus een signaal van <math>2,5 \times 150 = 375</math> mVrms.</p>
Resultaat en conclusie	<p><b>Resultaat:</b> In Figuur 5 is het meetresultaat te zien van stroomtestscenario 1. Het outputsignaal van de Rogowski-spoel is 399 mVrms.</p> <p><b>Conclusie:</b> Het resultaat komt ongeveer overeen met mijn verwachte uitkomst van 375 mVrms. Het antwoord kan verschillen doordat de gain van 150 of de constante factor van <math>\frac{1}{10000}</math> iets afwijkt.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Als de gain 150 is, dan is de werkelijke constante factor = <math>\frac{1}{9375}</math> (M)</li> <li>- Als de werkelijke constante factor M= <math>\frac{1}{10000}</math>, dan is de gain 159,6</li> </ul> <p>Hierbij gaat de afstudeerde ervan uit dat de werkelijke constante factor (M) gewoon gelijk is aan de gegevens die te vinden zijn in de datasheet van de stroomsensor [7], en dat de afwijking in de output optreedt omdat de gain 159 is in plaats van 150. In de volgende stroomtestscenario's wordt rekening gehouden met een gain van 159.</p> 

Figuur 5, Meetresultaat stroom test scenario 1

Tabel 12, stroom test scenario 1

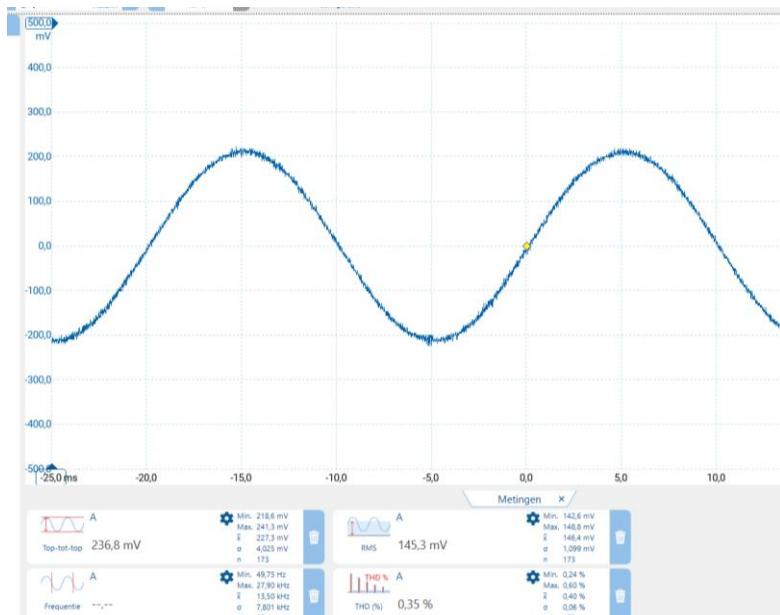
## Stroom test scenario 2

<b><u>Stroom test scenario 2</u></b>	L1, L2 en L3: 6,5 Ampère rms Fase L1,L2 en L3 : 0, -120 en 120°. <b>2. Note:</b> <i>Door het gebrek aan meetapparatuur is alleen het signaal van L1 gemeten.</i>
Verwachte uitkomst	Volgens vergelijking {5} en met de conclusie van stroomtestscenario 1 dat de gain 159 is, is het verwachte outputsignaal van de Rogowski-spoel L1 $0,65 \times 159 = 103,35$ mVrms.
Resultaat en conclusie	<b>Resultaat:</b>  In Figuur 6 is het meetresultaat te zien van stroomtestscenario 2. Het outputsignaal van de Rogowski-spoel is 103,5 mVrms.  <b>Conclusie:</b>  Het resultaat komt bijna precies overeen met mijn verwachte uitkomst van 103,35 mVrms.  

Tabel 13, stroom test scenario 2

## Stroom test scenario 3

<b><u>Stroom test scenario 3</u></b>	L1, L2 en L3: 9,186 Ampère rms Fase L1,L2 en L3 : 0, -120 en 120°. <b>2. Note:</b> <i>Door het gebrek aan meetapparatuur is alleen het signaal van L1 gemeten.</i>
Verwachte uitkomst	Volgens vergelijking {5} en met de conclusie van stroomtestscenario 1 dat de gain 159 is, is het verwachte outputsignaal van de Rogowski-spoel L1 $0,9186 \times 159 = 146,05$ mVrms.
Resultaat en conclusie	<b>Resultaat:</b>  In Figuur 7 is het meetresultaat te zien van stroomtestscenario 2. Het outputsignaal van de Rogowski-spoel is 145,3 mVrms.  <b>Conclusie:</b>  Het resultaat komt bijna precies overeen met mijn verwachte uitkomst van 146,05 mVrms.



Figuur 7 ,Meetresultaat stroom test scenario 3

Tabel 14, stroom test scenario 3

## THD% Test Scenario 1

<b><u>THD% Test Scenario 1</u></b>	<p>Stroom L1, L2, L3: 20 A;      THD% = 29,15%.      Ordes: 3e = 15%, 5e = 20%, 7e = 10%, 9e = 8%, 11e = 6%, 13e = 5%</p> <p><b>2. Note:</b>  <i>Door het gebrek aan meetapparatuur is alleen het signaal van L1 gemeten.</i></p>
Verwachte uitkomst	<p>Doordat er een stroom van 20 ampère RMS loopt, zal volgens vergelijking {5} en met een versterkingsfactor (gain) van 159, het verwachte outputsignaal van de Rogowski-spoel <math>2 \times 159 = 318</math> mVrms zijn. De verwachte decibelwaarden kunnen door de volgende formule berekend worden:</p> $6) A(dB) = 20 \times \log \left( \frac{V_{out} \times \text{Percentage}}{V_{ref}} \right)$ <p><i>Vout = Het verwachte outputsignaal in Vrms</i>  <i>Percentage = Het percentage van de (grond)harmonische, minimaal 0 en maximaal 1</i>  <i>Vref = De referentiespanning van de oscilloscoop, vaak is dit 1V, ook in ons geval.</i></p> $A(dB) = 20 \times \log \left( \frac{0,318 \times 1}{1} \right) = -9,95 \text{ dB}$ <p>Het verwachte FFT-resultaat van het THD% test scenario 1 volgens de berekeningen van vergelijking 6:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• 3e harmonische: 47,7 mV, -26,43 dB</li> <li>• 5e harmonische: 63,6 mV, -23,93 dB</li> <li>• 7e harmonische: 31,8 mV, -29,95 dB</li> <li>• 9e harmonische: 25,44 mV, -31,89 dB</li> <li>• 11e harmonische: 19,08 mV, -34,39 dB</li> <li>• 13e harmonische: 15,9 mV, -35,97 dB</li> </ul>
Resultaat en conclusie	<p><b>Resultaat:</b></p> <p>In Figuur 7 is het FFT-meetresultaat te zien van THD% test scenario 1. Hieronder zijn de meetresultaten opgesomd:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• THD% =</li> <li>• Grondsignaal: -26,43 dB</li> <li>• 3e harmonische: -26,43 dB</li> <li>• 5e harmonische: -23,93 dB</li> <li>• 7e harmonische: -29,95 dB</li> <li>• 9e harmonische: -31,89 dB</li> <li>• 11e harmonische: -34,39 dB</li> <li>• 13e harmonische: -35,97 dB</li> </ul> <p><b>Conclusie:</b></p>

Tabel 15, THD% Test Scenario 1

## THD% Test Scenario 2

<b><u>THD% Test Scenario 1</u></b>	<p>Stroom L1, L2, L3: 20 A;      THD% = 15,8%.      Ordes: 3e = 15%, 5e = 5%</p> <p><b>2. Note:</b>  <i>Door het gebrek aan meetapparatuur is alleen het signaal van L1 gemeten.</i></p>
Verwachte uitkomst	<p>Volgens de berekeningen van vergelijking {5} en {6} is het verwachte FFT-resultaat als volgt:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• THD% = 15,8%</li> <li>• Grondsignaal: 318 mV, -9,95 dB</li> <li>• 3e harmonische: 47,7 mV, -26,43 dB</li> <li>• 5e harmonische: 63,6 mV, -35,97 dB</li> </ul>
Resultaat en conclusie	<p><b>Resultaat:</b></p> <p>In Figuur 7 is het FFT-meetresultaat te zien van THD% test scenario 1. Hieronder zijn de meetresultaten opgesomd:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• THD% =</li> <li>• Grondsignaal: -26,43 dB</li> <li>• 3e harmonische: -26,43 dB</li> <li>• 5e harmonische: -23,93 dB</li> </ul> <p><b>Conclusie:</b></p>

Tabel 16, THD% Test Scenario 2

## THD% Test Scenario 3

<b><u>THD% Test Scenario 1</u></b>	<p>Stroom L1, L2, L3: 20 A;      THD% = 31,7%.      Ordes: 3e = 30%, 5e = 2% en 7e = 10%</p> <p><b>2. Note:</b>  <i>Door het gebrek aan meetapparatuur is alleen het signaal van L1 gemeten.</i></p>
Verwachte uitkomst	<p>Volgens de berekeningen van vergelijking {5} en {6} is het verwachte FFT-resultaat als volgt:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• THD% = 31,7%</li> <li>• Grondsignaal: 318 mV, -9,95 dB</li> <li>• 3e harmonische: 95,4 mV, -20,4 dB</li> <li>• 5e harmonische: 6,36 mV, -43,93 dB</li> <li>• 7e harmonische: 31,8 mV, 29,95 dB</li> </ul>
Resultaat en conclusie	<p><b>Resultaat:</b></p> <p>In Figuur 7 is het FFT-meetresultaat te zien van THD% test scenario 1. Hieronder zijn de meetresultaten opgesomd:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• THD% =</li> <li>• Grondsignaal: -26,43 dB</li> <li>• 3e harmonische: -26,43 dB</li> </ul>

	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 5e harmonische: -23,93 dB</li> <li>• 7e harmonische: -23,93 dB</li> </ul> <p><b>Conclusie:</b></p>
--	---

Tabel 17, THD% Test Scenario 3

## Welke eigenschappen van het Rogowski-spoelsignaal zijn cruciaal voor een nauwkeurige simulatie?

Om het Smart Device nauwkeurig te testen, moeten de testscenario's precies worden nagebootst. Bij het simuleren van het Rogowski-spoelsignaal voor het testen van het Smart Device wordt voornamelijk gekeken naar twee aspecten: de THD% (Total Harmonic Distortion) en de stroomsterkte. Het is cruciaal dat het gesimuleerde sinusvormige signaal exact overeenkomt met de gewenste testscenario's, zoals weergegeven in tabel 2, om het Smart Device betrouwbaar te kunnen evalueren.

In Tabel 9 is een overzicht te vinden van de eigenschappen van het Rogowski-spoelsignaal en waarom het zo belangrijk is om deze zo nauwkeurig mogelijk te simuleren.

Eigenschappen van de Rogowski-spoelsignaal	Waarom is deze zo belangrijk?
THD%	De testengineer test of het Smart Device de THD% correct meet. Daarom is het van belang dat de inputwaarde van de THD%, afkomstig van de testengineer, bijna perfect overeenkomt met de THD% die het elektronische systeem genereert. Dit is cruciaal om de meetfunctionaliteit van de THD% van het Smart Device te kunnen verifiëren.
De amplitude van alle harmonische tot de 13 <sup>e</sup>	De testengineer bepaalt het gewenste percentage van de harmonische. Hierbij is het belangrijk naast THD% goed is ook de percentage en dus de amplitude van alle harmonische ook correct zijn om zo het Smart Device goed te kunnen testen.
Stroomsterkte	Het Smart Device meet ook de amplitude van de stroom die de testengineer instelt. Het is cruciaal dat de amplitude van het gesimuleerde signaal perfect overeenkomt met de amplitude van het Rogowski-spoelsignaal om het Smart Device effectief te kunnen testen.

Tabel 18, Eigenschappen van het Rogowski-spoelsignaal die nauwkeurig moeten worden nagesimuleerd.

## Hoe nauwkeurig moet het gesimuleerde signaal zijn om het Smart Device betrouwbaar te kunnen testen?

Om te bepalen hoe nauwkeurig het gesimuleerde signaal moet zijn om het Smart Device betrouwbaar te kunnen testen, is het essentieel de nauwkeurigheid van de MEM101 (multi measurement unit) in ogenschouw te nemen, aangezien dit de kern is van de meetnauwkeurigheid van stroomsterkte en THD% (Total Harmonic Distortion).

De MEM101 gebruikt een MCP3914A1-E ADC-chip om het Rogowski-spoelsignaal te meten. De meetprestaties van deze ADC spelen dus een grote rol in de nauwkeurigheid van de MEM101. Belangrijke factoren die de nauwkeurigheid van de ADC beïnvloeden, zijn onder andere de resolutie, het differentiële ingangsspanningsbereik, de analoge ingangslekstroom, en de meetfout (Electronics, 2022) [26]. De ADC-chip heeft een meetfout van 0,1% en een resolutie van 24 bits, met een Vref van 1,2V ( $\pm 600\text{mV}$ ), en kan de kleinste meetbare verandering van 71,5 nV detecteren (zie vergelijking {7}), wat zorgt voor hoge meetnauwkeurigheid (Microchip Technology Inc., 2020) [25]. Deze aspecten dragen bij aan de totale prestaties van de MEM101 bij het detecteren van subtiele veranderingen in het inputsignaal.

$$7) \text{ LSB waarde} = \frac{V_{ref}}{2^n}$$

In de datasheet van de MEM101 wordt de nauwkeurigheid van bepaalde parameters weergegeven als volgt [9]:

- Stroommeting: gespecificeerd met een nauwkeurigheid van  $\pm 0,5\%$ .
- Gemeten conform klasse S van de IEC 61000-4-30 norm; specifieke nauwkeurigheidswaarden voor THD-metingen zijn niet explicet vermeld. Door vergelijking met soortgelijke apparaten die power quality meten volgens klasse S, is vastgesteld dat de meetonzekerheid kan variëren van  $\pm 0,5\%$  tot  $\pm 5\%$  voor THD-metingen. Er wordt aangenomen dat de meetnauwkeurigheid voor THD%  $\pm 5\%$  is.

In de volgende tabel wordt de verwachte maximale afwijking geïllustreerd voor diverse testscenario's:

Test scenario	Verwachte waarde	Maximale afwijking
Stroom Test Scenario 1	25 Ampere	$\pm 0,125 \text{ A}$ ( $\pm 0,5\%$ )
Stroom Test Scenario 2	6,5 Ampere	$\pm 0,0325 \text{ A}$ ( $\pm 0,5\%$ )
Stroom Test Scenario 3	9,186 Ampere	$\pm 0,046 \text{ A}$ ( $\pm 0,5\%$ )
THD% Test Scenario 1	29,15 %	$\pm 1,46 \text{ %}$ ( $\pm 5\%$ )
THD% Test Scenario 2	15,8 %	$\pm 0,79 \text{ %}$ ( $\pm 5\%$ )
THD% Test Scenario 3	31,6 %	$\pm 1,58 \text{ %}$ ( $\pm 5\%$ )

Tabel 19, Meetnauwkeurigheid MEM101 [309]

Hieruit kan worden geconcludeerd dat het te simuleren signaal zeer nauwkeurig moet zijn, omdat een kleine afwijking al een significant ander meetresultaat kan geven. Als voorbeeld: wanneer de testengineer stroomtestscenario 1 uitvoert, zou het gesimuleerde signaal volgens vergelijking {5} 2,5 mVrms moeten zijn. Als het daadwerkelijke gesimuleerde signaal 2,8 mVrms is, zal de MEM101 een meetresultaat opleveren van 28 ampère ( $\pm 0,5\%$ ). Dit komt niet overeen met het verwachte meetresultaat van stroomtestscenario 1, weergegeven in Tabel 10 ( $25 \pm 0,125 \text{ A}$ ). Als de gemeten waarde buiten de in de tabel gespecificeerde marge valt, duidt dit op een afwijking in het gesimuleerde signaal. De exacte toelaatbare afwijking voor het gesimuleerde signaal zal worden vastgesteld in het programma van eisen.

## Wat is de beste methode om de Rogowski-spoelsignaal te simuleren?

In dit hoofdstuk wordt er gekeken naar de verschillende methoden om het Rogowski signaal te simuleren. Hierbij worden de voor- en nadelen van deze methoden geanalyseerd, met als doel de meest geschikte methode voor onze toepassing te identificeren.

### Welke methoden/technologieën zijn beschikbaar om het signaal te simuleren?

Verschillende methoden en technologieën kunnen worden gebruikt om een sinusgolf te produceren, waarbij de fase en frequentie, en andere kenmerken zoals amplitude, de bijbehorende harmonischen en de totale harmonische vervorming (THD%) instelbaar kunnen zijn, of achteraf kunnen worden berekend. Het is een elektronisch systeem dat vaak wordt toegepast om dergelijke technologieën te implementeren via een Printed Circuit Board (PCB). Hier zijn enkele gebruikte methoden:

- **Directe Digitale Synthese (DDS):**

DDS is een technologie die zeer nauwkeurige frequenties en golfvormen kan genereren door een frequentie, fase en amplitude variabel digitaal te manipuleren. Een DDS-chip kan geprogrammeerd worden om een zuivere sinusgolf te produceren met specifieke eigenschappen. Het voordeel van DDS is de hoge nauwkeurigheid en flexibiliteit in het instellen van de gewenste parameters (Cordesses, 2004) [10].

- **Gebruik van een DAC-chip aangestuurd door een microcontroller:**

Een DAC-chip, aangestuurd door een microcontroller, maakt het genereren van sinusgolven met instelbare fase, frequentie, amplitude, en THD% mogelijk, door digitale signalen om te zetten in hun analoge equivalenten. Deze methode biedt een nauwkeurige afstemming van signaalparameters via software, waardoor het een flexibele en kosteneffectieve keuze is voor veel toepassingen (Dongmei, 2009) [11].

- **Function Generator IC's:**

Er zijn specifieke geïntegreerde schakelingen (IC's) ontworpen voor het genereren van verschillende golfvormen, waaronder sinusgolven. Voorbeelden hiervan zijn de AD9833 van Analog Devices of de MAX038. Deze IC's bieden instelbare frequentie, amplitude en soms ook fase, en kunnen worden geïntegreerd in een PCB-ontwerp (E Frenzel, z.d.) [12].

- **Programmeerbare Microcontrollers:**

Veel microcontrollers hebben ingebouwde DAC's (Digital-to-Analog Converters) of PWM (Pulse Width Modulation) output, die kunnen worden gebruikt om sinusgolven te genereren. Door de output te filteren (om de PWM-golf om te zetten in een analoge golfvorm) en softwarematig de timing en duur van de pulsen aan te passen, kun je de gewenste sinusgolf eigenschappen bereiken. Dit biedt veel flexibiliteit en aanpasbaarheid (Keim, 2017) [13].

- **Analoge Circuitontwerpen:**

Hoewel minder flexibel dan digitale methoden, kunnen analoge circuits zoals Wien-brug oscillatoren of fasoverschuiingsoscillatoren worden ontworpen om sinusgolven te genereren met specifieke frequenties. De amplitude kan worden gecontroleerd met behulp van een automatische gain control (AGC) circuit. Analoog ontwerp kan complexer zijn wanneer het gaat om het aanpassen van fase of het nauwkeurig regelen van THD en harmonischen (Horowitz & Hill, 2015) [14].

- **FPGA (Field-Programmable Gate Array):**

Bij het omgaan met complexere gevallen, of in die welke een zeer hoge verwerkingscapaciteit vereisen, zal het mogelijk zijn om FPGA's voor golfvormopwekking te gebruiken. De FPGA's bieden onovertroffen flexibele en snelle signaalaanpassing en -generatie, inclusief real-time realisatie van elke gedefinieerde harmonische inhoud en THD% (Gisselquist Technology, 2017) [15].

- **Toepassing van Softwareprogramma's zoals MATLAB:**

Softwareprogrammas zoals MATLAB stelt gebruikers in staat om sinusgolven te simuleren met uitgebreide controle over elke parameter, inclusief fase, frequentie, amplitude, harmonischen, en THD%. Deze benadering is ideaal voor het analyseren van signaleigenschappen en het optimaliseren van ontwerpen zonder de noodzaak van fysieke implementatie, wat tijd en middelen bespaart in de ontwerp fase (Viswanathan, 2013) [16].

### **Wat zijn de voor- en nadelen van deze methoden/technologieën?**

De specificaties die vermeld zijn voor de verschillende methodes komen afkomstig van vaak gebruikte chips die bij de methodes worden toegepast.

Methode	Voordelen	Nadelen	Bronverwijzing
Direkte Digitale Synthese (DDS)	Biedt hoge frequentienauwkeurigheid en beschikt over 32-bit faseresolutie, wat uiterst nauwkeurige frequentie- en fasecontrole mogelijk maakt. Ondersteunt fijnafstemming en de generatie van diverse golfvormen.	Beperkt door klokfrequentie en DAC-resolutie, waarbij een vaak voorkomende DAC-resolutie 10-bit is. Hoge resoluties vereisen geavanceerde DDS-chips, die soms tot wel 1000 euro kosten.	(Cordesses, 2004), [10]  (Zhongqing, 2006), [17]  (Surber & McHugh, z.d.) [18]
Gebruik van een DAC-chip aangestuurd door een microcontroller:	Combineert softwareflexibiliteit met de precisie van hoogwaardige DAC's. Biedt nauwkeurige controle over de uitgangsspanning. Geavanceerde DAC-chips met 16-bit resolutie zijn beschikbaar in de prijsklasse van €10-€30.	Afhankelijk van DAC-resolutie en microcontrollerverwerkingscapaciteit. Uitgangsspanning en -stroom kunnen beperkt zijn zonder aanvullende hardware. Dit vereist kennis van signaalverwerking en seriële datacommunicatie, zoals de SPI-interface.	(Dongmei, 2009) [11]  (Skach & Noorizadeh, 2017) [19]  (Analog Devices, 2007) [20]
Function Generator IC's	Eenvoudig te gebruiken en te integreren, vaak met een seriële interface voor externe systemen. Biedt 28-bit frequentieresolutie en is kosteneffectief (ongeveer €5). Geschikt voor standaardtoepassingen en frequentiestimulatie/golfvormgeneratie.	Beperkt tot vaak 10-bit DAC-resolutie. Flexibiliteit afhankelijk van het IC, met beperkte software-aanpassingen en minder aanpassingsvermogen vergeleken met programmeerbare opties.	(E Frenzel, z.d.) [12].  (Analog Devices, 2013)[21].

Programmeerbaar e Microcontrollers	Maakt het mogelijk om gewenste sinusgolfvormen te creëren door softwarematig timing en duur van pulsen aan te passen. Biedt veel flexibiliteit. Door gebruik te maken van interne interfaces zoals een DAC kan bespaard worden op kosten (ongeveer €10-€30).	Nauwkeurigheid van het signaal kan beperkt zijn door de resolutie van de ingebouwde DAC of de effectiviteit van PWM-filtering. Veel microcontrollers zijn beperkt tot 8-bit DAC-resolutie.	(Jae Kweon & Kajol Rafi, 2022) [22].  (Keim, 2017) [13].
Analoge Circuitontwerpen	Vereist niet de complexiteit van digitale programmering of microcontroller-configuratie. Geen digitale kwantisatie-effecten. Kan zuivere signalen genereren (THD < 1%).	Ontwerp en aanpassing kunnen complex zijn, minder flexibel dan digitale methoden.	(Horowitz & Hill, 2015) [14].  (Stork, 2014) [23].
FPGA (Field- Programmable Gate Array)	Kan worden geprogrammeerd voor het genereren van een breed scala aan signaalvormen, inclusief complexe modulatietechnieken. Kan meerdere golfvormen tegelijk genereren dankzij parallelle verwerkingscapaciteit. Geschikt voor telecommunicatie, radar- en sonarsystemen met hoge snelheden (kloksnelheden van enkele honderden MHz tot meer dan een GHz).	Vereist kennis van digitale logicaontwerp en VHDL. FPGA's en ontwikkeltools kunnen kostbaar zijn, variërend van €50 voor low-end modellen tot €2000 voor high-end modellen. Extern systeem nodig voor het omzetten van het digitale naar een analoog signaal.	(Gisselquist Technology, 2017) [15].  (Yi, 2010) [24].
Toepassing van Softwareprogram- ma's zoals MATLAB:	MATLAB berekent met floating-point precisie, wat resulteert in zeer nauwkeurige signalen. Biedt volledige controle over parameters zoals frequentie, amplitude en fase. De software ondersteunt uitgebreide visualisatie- en analyse-tools.	MATLAB kan kostbaar zijn met benodigde toolboxen voor geavanceerde signaalverwerking. De nauwkeurigheid en het aantal outputkanalen zijn afhankelijk van de gebruiker's audio-interface, vaak met 2 outputkanalen (stereo) en 16-bit DAC-resolutie. Vereist tijd om MATLAB's taal en functionaliteiten te leren.	(Viswanathan, 2013) [16].  (Matlab, n.d.)[27].

Tabel 20, De voor- en nadelen van verschillende methodes om een sinus vormig signaal te genereren.

### Welke methode is het meest geschikt voor de huidige toepassing?

Stedin streeft ernaar om meerdere poorten tegelijkertijd te testen om de testprocedure te versnellen. Daarnaast is behoefte aan een eenvoudigere gebruikersinterface, waarbij testscenario's door de testengineer zelf ingesteld en eventueel aangepast kunnen worden. De gewenste testmethode moet daarom aan de volgende criteria voldoen [8]:

- Flexibele en aanpasbare testscenario's.

- Het moet een hoge nauwkeurigheid/resolutie bieden. Het Smart Device beschikt over een 24-bit ADC, dus het moet in staat zijn het signaal zo nauwkeurig mogelijk in microvolts te simuleren, wat een resolutie van 16 bits of hoger vereist.
- Het moet de mogelijkheid bieden om meerdere poorten gelijktijdig te testen.
- De methode moet ook koste efficiënt zijn.

De afstudeerde heeft, na onderzoek naar verschillende methoden, een beslismatrix samengesteld om te bepalen welke methode het meest geschikt is voor onze toepassing. Deze scores zijn op basis van onderzoek en aannames ingevuld. Binnen deze matrix is extra gewicht toegekend aan het criterium 'Hoge nauwkeurigheid', terwijl de andere criteria een lagere wegingsfactor hebben gekregen. Hieronder wordt de beslismatrix gepresenteerd:

Methode	Flexibiliteit (factor 2)	Vereist geen diepgaande kennis	Hoge nauwkeurigheid / resolutie (factor 3)	Meerdere poorten gelijktijdig testen (factor 2)	Kosteneffi ciëntie	<u>Totaalscore</u>
DDS	5	2	2	5	3	<b>3,4</b>
DAC-chip	4	4	5	4	4	<b>4,3</b>
Function Generato r IC's	3	4	2	3	5	<b>3</b>
Program meerbare Microcon trollers	4	4	1	1	5	<b>2,4</b>
Analoge Circuitont werpen	1	3	4	3	5	<b>3,1</b>
FPGA	5	1	5	4	1	<b>3,9</b>
Softwarep rogramm a's zoals MATLAB:	5	2	4	2	2	<b>3,3</b>

Tabel 21, beslismatrix voor verschillende simulatiemethoden

Op basis van deze analyse en vergelijking van de methoden adviseert de afstudeerde het gebruik van een **DAC-chip aangestuurd door een microcontroller**. Deze methode scoort het hoogst en biedt uitstekende nauwkeurigheid (met een capaciteit voor 16 tot 32-bit resolutie), aanpassingsvermogen, en de mogelijkheid om meerdere signalen tegelijk te genereren. Deze kenmerken stellen de DAC-chipmethode boven de andere overwogen opties. Gelet op de noodzaak om sinusvormige signalen in microvolts nauwkeurig te simuleren, wordt de DAC-chipmethode als de meest geschikte optie voor de huidige toepassing beschouwd.

## Conclusie

Dit onderzoek heeft aangetoond dat een efficiëntere testopstelling voor Smart Devices in middenspanningsstations realiseerbaar is door het Rogowski-spoelsignaal te simuleren. Dit vormt een belangrijke vooruitgang ten opzichte van de complexe testmethode met de Omicrone. Centraal stond de vraag hoe het opgewekte Rogowski-spoelsignaal gesimuleerd kan worden om het Omicron device te vervangen. Een cruciale ontdekking was dat het opgewekte Rogowski-spoelsignaal, specifiek voor de Current Sensor CR-200, beschreven kan worden met de volgende formule  $V_{out}(t) = I(t) \times \frac{1}{10000}$ . Deze bevinding benadrukt het belang van nauwkeurige simulatie van het Rogowski-spoelsignaal. Zelfs minimale afwijkingen in het gesimuleerde signaal kunnen leiden tot aanzienlijk verschillende meetresultaten bij de MEM101, die zeer nauwkeurig kleine veranderingen in het inputsignaal kan meten (De MEM101 is een multi measurement unit, onderdeel van het Smart Device dat de stroomeigenschappen meet).

Gezien deze bevindingen en de klantwensen van Stedin, die vereisen dat meerdere simulerende signalen gegenereerd en aangepast kunnen worden, is er onderzoek gedaan naar verschillende simulatiemethoden, waaronder Directe Digitale Synthese (DDS), het gebruik van een DAC-chip, Function Generator IC's, Programmeerbare Microcontrollers, Analoge Circuitontwerpen, FPGA en softwareprogramma's zoals MATLAB. Hierbij zijn de voor- en nadelen van elke methode geanalyseerd en vergeleken op basis van criteria zoals flexibiliteit, nauwkeurigheid, kostenefficiëntie, de leercurve en het vermogen om meerdere signalen tegelijkertijd te genereren, in lijn met de wensen en criteria van Stedin.

Uit dit onderzoek bleek dat het gebruik van een DAC-chip, aangestuurd door een microcontroller, de voorkeursmethode is. Deze benadering onderscheidt zich door zijn hoge resolutie/nauwkeurigheid en flexibiliteit in het instellen van parameters, wat essentieel is voor een accurate nabootsing van het Rogowski-spoelsignaal. Daarnaast maakt deze methode het mogelijk om meerdere simulerende signalen te genereren, waardoor het testen van verschillende poorten van het Smart Device efficiënter wordt, wat leidt tot tijdsbesparing. Hieruit kan geconcludeerd worden dat de DAC chip-methode zich profileert als de meest geschikte aanpak voor de huidige toepassing. Dit onderzoek dient als basis voor toekomstig onderzoek naar de simulatie van Rogowski-spoelsignalen voor geavanceerdere Smart Devices, die met hogere spanningen en stromen werken, en benadrukt het potentieel van DAC-chip methode in de ontwikkeling van efficiëntere testopstellingen.

## 14 Bibliografie

1. Stedin [K Peelen]. (z.d.). Toenemende elektriciteitsvraag.
2. OMICRON electronics. (z.d.). CMC 356 Technical Data (Versie 1) [Dataset]. Omicron.  
<https://www.Omicronenergy.com/download/document/F4E6A7A9-A0AF-490C-A0E0-E956970E0FE6/>
3. Van Ravenstein, R. (2023, 9 oktober). Betrouwbare bronnen gebruiken in je scriptie - 24editor. 24editor. <https://24editor.com/betrouwbare-bronnen-gebruiken-in-je-scriptie/>
4. Parsa-Sirat, A., Hossein, N., & Babak, P. (2023). Ultra-Wideband Surface Current Sensor Topology for Wide-Bandgap Power Electronics Applications [Dataset]. BOOK.  
<https://doi.org/10.1109/WiPDA58524.2023.10382209>
5. Hamed Samimi, M., Mahari, M., Ali Farahnakian, M., & Mohseni, H. (2014). The Rogowski Coil Principles and Applications: A Review [Dataset]. IEEE.  
<https://doi.org/10.1109/JSEN.2014.2362940>
6. Draxler, K. (2011). Calibration of Rogowski Coils With an Integrator at High Currents [Dataset]. IEEE Xplore. <https://doi.org/10.1109/TIM.2011.2126090>
7. Mikronika. (2019). CR-200 CURRENT SENSORS (Versie 2) [Dataset].  
<https://www.mikronika.pl/en/offer/products/devices/control-measuring-automation/>
8. Stedin. (z.d.). Bron Stedin. <https://www.stedin.net/>
9. Mikronika. (2022). MEM-101 MULTI ENERGY MEASUREMENT UNIT [Dataset]. In USER MANUAL (Versie V3). <https://www.mikronika.pl/en/offer/products/devices/control-measuring-automation/>
10. Cordesses, L. (2004). Direct digital synthesis: a tool for periodic wave generation (part 2) [Dataset]. IEEE Xplore. <https://doi.org/10.1109/MSP.2004.1328096>
11. Dongmei, L. (2009). Digital Sine-Wave Generator for testing High Resolution DAC.  
<https://www.semanticscholar.org/paper/Digital-Sine-Wave-Generator-for-Testing-High-DAC-Dongmei/90cf04ba1271c0dda837b0509169056321cdf6e3>
12. E Frenzel, L. (z.d.). Seven Common Ways to Generate a Sine Wave. Nuts And Volts Magazine.  
<https://www.nutsvolts.com/magazine/article/seven-common-ways-to-generate-a-sine-wave>
13. Keim, R. (2017, 12 oktober). Microcontroller Design for an Arbitrary Waveform Generator. Technical Articles. <https://www.allaboutcircuits.com/technical-articles/microcontroller-design-for-an-arbitrary-waveform-generator/>
14. Horowitz, P., & Hill, W. (2015). The Art of Electronics. Cambridge University Press. (3de editie). Cambridge University Press.  
[https://eclass.uniwa.gr/modules/document/index.php?course=EEE265&download=/6218412\\_aGLbn/5e6db8cd5KNP.pdf](https://eclass.uniwa.gr/modules/document/index.php?course=EEE265&download=/6218412_aGLbn/5e6db8cd5KNP.pdf)
15. Gisselquist Technology. (2017, 11 juli). The simplest sine wave generator within an FPGA.  
<https://ziPCpu.com/dsp/2017/07/11/simplest-sinewave-generator.html>
16. Viswanathan, M. (2013). SIMULATION OF DIGITAL COMMUNICATION SYSTEMS USING MATLAB [Dataset]. In SECOND EDITION FOR KINDLE (SECOND EDITION FOR KINDLE). Smashwords.  
[https://scholar.google.com/scholar?hl=nl&as\\_sdt=0%2C5&q=MATLAB+signal+simulation&btn\\_G=](https://scholar.google.com/scholar?hl=nl&as_sdt=0%2C5&q=MATLAB+signal+simulation&btn_G=)
17. Zhongqing, T. (2006). A new design of a sinusoidal wave signal generator.  
<https://www.semanticscholar.org/paper/A-New-Design-of-a-Sinusoidal-Wave-Signal-Generator-Zhongqing/729b7521dfe03ac0e008aed76665620b8c25d4c8>

18. Surber, J., & McHugh, L. (z.d.). Single-Chip Direct Digital Synthesis vs. the Analog PLL. ADI Analog Dialogue. Geraadpleegd op 1 april 2024, van <https://www.analog.com/en/resources/analog-dialogue/articles/dds-vs-analog-pll.html>
19. Skach, C., & Noorizadeh, S. (2017, May 17). How New DAC Technologies are Changing Signal Generation For Test. Electronic Design. <https://www.electronicdesign.com/technologies/test-measurement/article/21805033/how-new-dac-technologies-are-changing-signal-generation-for-test>
20. Analog Devices. (2007, October 11). AD5754 Datasheet and product info. <https://www.analog.com/en/products/ad5754.html>
21. Analog Devices. (2013). Low Power, 12.65 MW, 2.3 V to 5.5 V, programmable Waveform generator (Versie 1) [Dataset]. <https://www.analog.com/en/products/ad9833.html>
22. Jae Kweon, S., & Kajol Rafi, A. (2022). On-Chip Sinusoidal Signal Generators for Electrical Impedance Spectroscopy: Methodological Review [Dataset]. IEEE Xplore. <https://doi.org/10.1109/TBCAS.2022.3171163>
23. Stork, M. (2014). Wide range voltage controlled oscillators sinusoidal Wien-bridge and ring. <https://www.semanticscholar.org/paper/Wide-range-voltage-controlled-oscillators-and-ring-Stork/2e4c0f0d22bac015e234277b4bce16b6cbb6d6fe>
24. Yi, Y. (2010). Design of sinusoidal signal generator based on FPGA. <https://www.semanticscholar.org/paper/Design-of-sinusoidal-signal-generator-based-on-FPGA-Yi/b74d2431775271c5f74752a70034675ae76e0d15>
25. Microchip Technology Inc. (2020). MCP3914: 3V Eight-Channel Analog Front End (C, pp. 1–3) [Report]. [https://nl.mouser.com/datasheet/2/268/MCP3914\\_3V\\_Eight\\_Channel\\_Analog\\_Front\\_End\\_D\\_S200052-708863.pdf](https://nl.mouser.com/datasheet/2/268/MCP3914_3V_Eight_Channel_Analog_Front_End_D_S200052-708863.pdf)
26. Electronics, A. (2022, October 13). Analog to Digital Converter (ADC) selection Guide. Arrow.com. <https://www.arrow.com/en/research-and-events/articles/analog-to-digital-converter-selection-guide>
27. Matlab. (z.d.). Introduction to Streaming Signal Processing in MATLAB. Mathworks. Geraadpleegd op 2 april 2024, van <https://www.mathworks.com/help/dsp/ug/introduction-to-streaming-signal-processing-in-matlab.html>

---

# Bijlage C: Programma van eisen

DA3-project Stedin

---

<b>Auteur:</b>	Younes Boulmani
<b>Stagedocent:</b>	De heer Fogarty
<b>Bedrijfsbegeleiders:</b>	Mark Burghout en Koen Peelen
<b>Titel:</b>	Plan van Aanpak (testopstelling)
<b>Datum van uitgifte:</b>	26-03-2024

## Inhoud

1	Definiëren van de eisen .....	117
1.1	Systeemcontext .....	117
1.2	Procesbeschrijving .....	118
1.3	Systeemfuncties.....	119
1.3.1	Beheer testsysteem .....	119
1.3.2	Bepaal het gesimuleerde signaal .....	120
1.3.3	Simuleer signaal.....	121
1.3.4	Weergeef status systeem .....	123
1.3.5	Toon actieve testscenario .....	124
1.3.6	Genereer testrapport.....	124
1.4	Niet functionele eisen.....	125

## Versie Historiek

Revisie Datum	Auteur	Omschrijving
1.0	20-03-2024	Younes Boulmani
1.1	21-03-2024	Younes Boulmani
1.2	22-02-2024	Younes Boulmani
1.3	26-03-2024	Younes Boulmani
1.4	13-09-2024	Younes Boulmani

## Definitiefase (Requirements Phase)

### 1 Definiëren van de eisen

In dit hoofdstuk wordt doormiddel van de Yourdon analyse alle functionele en niet functionele eisen opgesteld.

#### 1.1 Systeemcontext

Na aansluiting op de voeding controleert het testsysteem of er verbinding is met de PC via USB. Zodra de verbinding tot stand is gebracht, kan de testengineer via een interface de gewenste testscenario's voor de testprocedure instellen en naar het testsysteem verzenden. Daarnaast is er een optie om een standaardtestprocedure te initiëren, bestaande uit een set vastgestelde scenario's (zie Tabel 1), zodat de testengineer de instellingen niet handmatig hoeft in te voeren en te verzenden.

Wanneer de testengineer de instellingen heeft verstuurd en het testsysteem deze correct heeft ontvangen en verwerkt, geeft het testsysteem visueel aan dat het klaar is voor gebruik. De testengineer kan vervolgens op elk gewenst moment een startsignaal geven om de testprocedure te starten. Tijdens de testprocedure is zichtbaar welk testscenario op dat moment wordt uitgevoerd.

De testprocedure kan op elk moment worden gepauzeerd, waarbij het huidige scenario doorgaat zonder over te schakelen naar het volgende. De test kan worden hervat met een startsignaal en op elk gewenst moment worden beëindigd met een stopsignaal. Wanneer alle scenario's zijn doorlopen, informeert het testsysteem de testengineer dat de testprocedure is voltooid.

De klant wenst dat het testsysteem de systeemstatus (gestopt, gepauzeerd, voltooid, of gestart) visueel weergeeft aan de testengineer. Optioneel wenst de klant dat het testsysteem via het Modbus-protocol kan communiceren met een Smart Device, de gemeten testscenario's uitleest en op basis daarvan een testrapport genereert over welke tests geslaagd zijn en welke niet.

Tabel 1 toont de testscenario's die worden uitgevoerd tijdens de standaardtestprocedure. Ze zijn verdeeld in twee categorieën: "Stroom Testscenario's" en "Total Harmonic Distortion (THD%)".

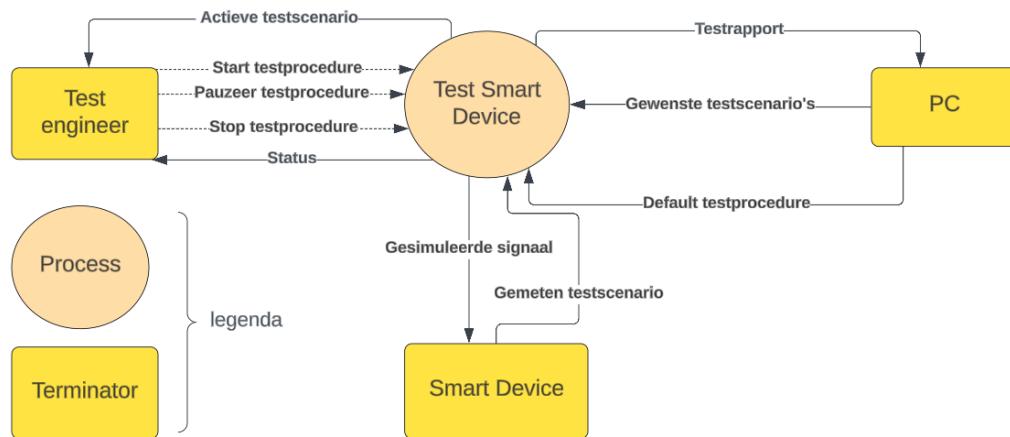
**Note:**

*De frequentie van het grondsignaal is in alle testscenario's 50 Hz. De stromen zijn in RMS-waarde*

Categorie	Testscenario	Parameters
<u>Stroom Test Scenario's</u>	1	L1, L2, L3: 25 Ampère
	2	L1, L2, L3: 6,8 Ampère
	3	L1, L2, L3: 9,186 Ampère
<u>THD% Test Scenario's</u>	1	Stroom L1, L2, L3: 20 A; THD% = 29,15%. Ordes: 3e = 15%, 5e = 20%, 7e = 10%, 9e = 8%, 11e = 6%, 13e = 5%
	2	Stroom L1, L2, L3: 20 A; THD% = 15,8%. Ordes: 3e = 15%, 5e = 5%
	3	Stroom L1, L2, L3: 20 A; THD% = 32,02%. Ordes: 3e = 30%, 5e = 5%, 7e = 10%

Tabel 1, De gewenste testscenario's die de testengineer kan instellen

In Figuur 1 is het data context diagram van het testsysteem weergeven.

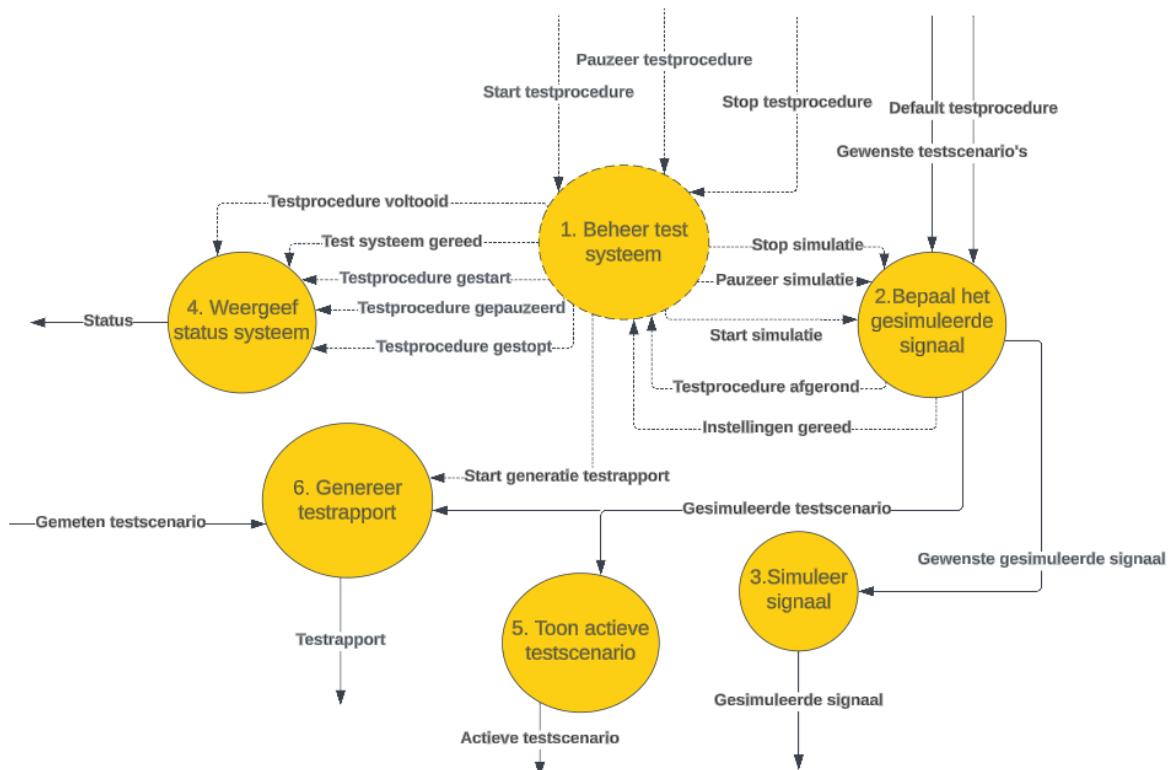


Figuur 1, data context diagram van het testsysteem

## 1.2 Procesbeschrijving

In Figuur 2 is het dataflow diagram (DFD0) te zien van het systeem met daarin 6 processen:

7. Simuleer signaal
  8. Bepaal het gesimuleerde signaal
  9. Weergeef status systeem
  10. Beheer testsysteem
  11. Toon actieve testscenario
  12. Genereer testrapport



Figuur 2, data flowdiagram (DFD0)

### 1.3 Systeemfuncties

In dit hoofdstuk worden de functionele eisen besproken van het systeem. De eisen zijn gecategoriseerd volgens de MoSCoW methode. Met MH als 'Must Have', CH als 'Could Have', SH als 'Should Have' en WH als 'Won't Have'. Figuur 2 weergeeft de dataflow diagram van het systeem. Er zijn 6 functies die geïmplementeerd moeten worden:

7. Beheer testsysteem
8. Bepaal het gesimuleerde signaal
9. Simuleer signaal
10. Weergeef status systeem
11. Toon actieve testscenario
12. Genereer testrapport

Deze functies/processen zullen in het volgende paragrafen uitgebreid worden beschreven.

#### 1.3.1 Beheer testsysteem

Het proces 'Beheer testsysteem' ontvangt start-, pauzeer- en stopsignalen van de testengineer en geeft deze door aan de relevante processen. Daarnaast zorgt het ervoor dat communicatie met de PC en het Smart Device mogelijk is.

##### *Stimulus en response*

Stimulus:      Ontvangt een start- en stop signaal en de berekende testscenario van de terminators

Response:      Beheert het testsysteem op basis van de inputsignalen.

##### *Functionele en Performance requirements*

De klant eist dat het testsysteem de testengineer in staat stelt een startsignaal te geven zodra alle instellingen gereed zijn. Het kan voorkomen dat de testengineer nog niet klaar is om de testprocedure te starten, daarom is het belangrijk dat de testengineer hier de controle over heeft. Dit moet op elk gewenst moment kunnen gebeuren nadat de instellingen zijn voltooid.

**REQ-1.1[MH]:** De testengineer kan na het instellen van alle gewenste testscenario's de testprocedure laten starten.

De klant eist dat hij op elk willekeurig moment de testprocedure kan stoppen. Als bijvoorbeeld de testengineer de verkeerde testscenario's heeft ingesteld en per ongeluk op start heeft geklikt, hoeft de testengineer niet te wachten tot de testprocedure helemaal klaar is om een nieuwe testprocedure te starten.

**REQ-1.2[MH]:** De testengineer kan de testprocedure laten stoppen.

De klant wenst de mogelijkheid om de testprocedure op elk gewenst moment te kunnen pauzeren. Dit stelt de testengineer in staat om, indien nodig vanwege specifieke redenen, langer bij een bepaald testscenario te blijven door de testprocedure te pauzeren.

**REQ-1.3[MH]:** De testengineer kan de testprocedure laten pauzeren.

De klant eist dat de volledige testprocedure bij een standaard default testprocedure niet langer mag dan een kwartier mag duren, met als doel de testtijd te verkorten ten opzichte van de Omicron-testprocedure.

**REQ-1.4[SH]:** De standaard default testprocedure mag niet langer duren dan een kwartier.

De klant wenst te communiceren met de PC via het USB-protocol, aangezien de PC's van de testengineer vaak gebruikmaken van een USB-poort. De klant wil graag dat het testsysteem kan worden aangesloten op de PC met behulp van een USB-kabel.

**REQ-1.5[MH]:** Het testsysteem communiceert met de PC volgens het USB-protocol.

De klant wenst te kunnen communiceren met het Smart Device via het Modbus-protocol, zodat belangrijke meetresultaten kunnen worden uitgelezen. Aangezien het project voornamelijk gericht is op het simuleren van testscenario's en niet per se op de communicatie met het Smart Device, is dit gedefinieerd als een optionele eis (Could Have).

**REQ-1.6[CH]:** Het testsysteem communiceert met het Smart Device via het Modbus-protocol.

In REQ-1.3 is gespecificeerd dat de standaardtestprocedure niet langer dan een kwartier mag duren. Voor de toekomst zou het waardevol zijn als de duur van de testprocedure variabel kan zijn, zodat de testengineer de gewenste duur van een testprocedure kan instellen.

**REQ-1.7[WH]:** De testengineer kan de duur van de standaardtestprocedure instellen.

Als optionele eis (REQ-1.6) verlangt de klant dat het testsysteem communiceert met het Smart Device. Mocht communicatie met het Smart Device niet mogelijk zijn of bepaalde data niet kunnen worden uitgelezen, dan zou het nuttig zijn als het testsysteem in de toekomst een melding geeft aan de testengineer dat de communicatie niet mogelijk is.

**REQ-1.8[WH]:** Het testsysteem informeert de testengineer wanneer er een communicatiefout optreedt met het Smart Device.

### 1.3.2 Bepaal het gesimuleerde signaal

Het proces "Bepaal het gesimuleerde signaal" ontvangt de gewenste testscenario's van de testengineer en bepaalt welk signaal gesimuleerd moet worden op basis van de gekozen testscenario's.

#### *Stimulus en response*

Stimulus: De testengineer stelt de gewenste testscenario's in die tijdens de testprocedure moet worden uitgevoerd.

Response: Bepaalt het gewenste simulatie signaal.

#### *Functionele en Performance requirements*

Om het Smart Device te testen en te evalueren of het correct functioneert, worden momenteel de testscenario's uit Tabel 1 uitgevoerd met behulp van de Omicron. Dit omvat 6 testscenario's. De klant wenst dat de testengineer in het nieuwe systeem ook zelf 6 testscenario's kan definiëren en uitvoeren.

**REQ-2.1[MH]:** Het testsysteem biedt de mogelijkheid om 6 testscenario's uit te voeren voor de testprocedure, zoals weergegeven in Tabel 1.

Bij de huidige stroomtestscenario's worden standaard RMS-stroomwaarden gebruikt die telkens worden uitgevoerd, zoals 25 ampère. De klant wenst echter dat de RMS-stroomwaarde parameteriseerbaar is, zodat de testengineer deze kan instellen binnen een bereik van 5 tot 500 ampère. De klant heeft gekozen voor een maximum van 500 omdat dit het maximum is dat het Smart Device kan meten, en de klant dit graag wil testen. Stromen lager dan 5 ampère RMS zijn niet relevant voor de klant.

**REQ-2.2[CH]:** De testengineer kan de gewenste stroomtestscenario's instellen binnen een bereik van 5 tot 500 Ampère RMS, met stapgroottes van één duizendste.

Voor de klant is het van groot belang om de meetfunctionaliteit van het Smart Device voor de 3e, 5e en 7e harmonischen te kunnen testen. Deze harmonischen komen vaak voor in middenspanningsstations en moeten goed worden gemonitord, omdat netbeheerders zoals Stedin moeten voldoen aan de NEN-EN 50160-norm, die de kwaliteitskenmerken van geleverde elektriciteit beschrijft, inclusief de grenzen voor harmonische vervorming. De 3e, 5e en 7e harmonischen zijn vanwege deze norm belangrijk voor netbeheerders. De klant wenst dat de 3e, 5e en 7e harmonischen instelbaar zijn binnen een bereik van 5 tot 50% ten opzichte van de amplitude van een grondsignaal van 50 Hz. percentage waarden buiten deze grenzen zijn niet relevant voor de klant en worden ook niet getest bij de huidige testprocedure.

**REQ-2.3[SH]:** De testengineer kan de 3e, 5e en 7e harmonischen van de THD% testscenario's instellen binnen een bereik van 5 tot 50% van de amplitude van de grondharmonische 50 Hz, met een stapgrootte van 1%.

De klant zou ook graag willen om alle oneven harmonischen tot en met de 13e in te kunnen stellen binnen een bereik van bereik van 5 tot 50% van de amplitude van de grondharmonische 50 Hz.

**REQ-2.4 [CH]:** De testengineer is in staat om alle oneven harmonischen tot en met de 13e in te stellen binnen een bereik van 5 tot 50%, met een stapgrootte van 1%.

Het handmatig instellen van alle gewenste testscenario's kan enige tijd in beslag nemen en de testprocedure vertragen. Daarom wenst de klant dat het testsysteem de mogelijkheid biedt om automatisch een standaardtestprocedure te starten, waarbij alle instellingen van de standaardtestprocedure automatisch worden verzonden.

**REQ-2.5 [CH]:** De testengineer kan een standaardtestprocedure initiëren, waarbij alle testscenario's en bijbehorende instellingen uit Tabel 1 automatisch worden verzonden.

Voor het simuleren van de testscenario's wordt gebruikgemaakt van een grondsignaal met een frequentie van 50 Hz, omdat dit relevant is voor de klant, gezien het een reële frequentie is die voorkomt in middenspanningsstations. Het kan echter voorkomen dat de klant in de toekomst de wens heeft om een andere frequentie als grondsignaal te gebruiken. In zo'n geval zou het handig zijn als de frequentie variabel is en door de testengineer ingesteld kan worden, inclusief de mogelijkheid om hogere en lagere frequenties rond de 50 Hz grens te selecteren.

**REQ-2.6 [WH]:** De testengineer kan de frequentie van het grondsignaal instellen binnen een bereik van 20 tot 200 Hz.

### 1.3.3 Simuleer signaal

Het proces "simuleer signaal" is in staat om het gewenste simulatiesignaal te genereren om het Smart Device te testen.

#### *Stimulus en response*

Stimulus:      Ontvangt het gewenste simulatiesignaal

Response:      Genereert het gewenste simulatiesignaal en stuurt dit door naar het Smart Device

#### *Functionele en Performance requirements*

De klant eist dat het testsysteem stroomtestscenario 1 (tabel 1) moet kunnen simuleren met een maximale afwijking van 6%. Dit stroomtestscenario wordt momenteel standaard getest bij alle Smart Devices om snel te beoordelen of het Smart Device naar behoren functioneert, en het is daarom van belang om dit te kunnen simuleren. Daarom wenst de klant dat het nieuwe testsysteem deze simulatie ook kan simuleren met een maximale afwijking van 6%.

De reden voor de 6%-grens komt voort uit de bevindingen van het onderzoek, waaruit blijkt dat zelfs kleine afwijkingen in de simulatie aanzienlijke verschillen in de meetresultaten kunnen veroorzaken. Een nauwkeurige signaalsimulatie is daarom essentieel om betrouwbare en consistente evaluaties te kunnen uitvoeren. Neem als voorbeeld stroomtestscenario 1, met een stroomsterkte van 25 Ampère, waarbij het gewenste simulatiesignaal 2,5 mV RMS is (zie onderzoek voor de berekening van het gewenste simulatiesignaal). In dit geval mag de afwijking maximaal 0,15 mV zijn. De maximale afwijking kan worden berekend volgens vergelijking {1}. Deze precisie is cruciaal voor de betrouwbare evaluatie van het Smart Device. Daarnaast toont verder onderzoek aan dat de nauwkeurigheid van de MEM101 binnen een marge van ±0,5% ligt voor stroomtestscenario's. Bij een ingestelde stroomsterkte van 25 ampère RMS betekent dit dat de MEM101, rekening houdend met de maximale afwijking van het testsysteem (±6%), een maximaal resultaat kan laten zien van 26,63 ampère (+0,5%) en een minimaal resultaat van 23,38 ampère (-0,5%). Resultaten buiten deze grenzen duiden op een niet-correct functionerend Smart Device.

$$1) \text{ Maximale afwijking} = \frac{\text{gewenste simulatie signaal}}{100} \times (\text{maximale afwijking test systeem})$$

**REQ-3.1[MH]:** Het testsysteem is in staat om stroomtestscenario 1 (zie tabel 1) te simuleren met de maximale afwijking van 6% ten opzichte van het gewenste simulatie signaal.

De klant wenst dat het testsysteem ook in staat is om de andere testscenario's uit tabel 1 te simuleren, aangezien deze ook gebruikelijk worden getest bij de huidige testprocedure.

**REQ-3.2[SH]:** Het testsysteem is in staat om alle testscenario's weergeven in Tabel 1 te simuleren met de maximale afwijking van 6% ten opzichte van het gewenste simulatie signaal.

De klant eiste in REQ-2.2 dat de stroom testscenario's parameteriseerbaar zijn. Het testsysteem moet dus in staat zijn om deze mogelijke ingestelde scenario's gespecificeerd in REQ 2.2 te kunnen simuleren.

**REQ-3.3[CH]:** Het testsysteem is in staat om alle stroomtestscenario's te simuleren volgens REQ-2.2 met de maximale afwijking van 6%

De klant wenst optioneel dat het nieuwe testsysteem ook de ingestelde stroomtestscenario's kan simuleren met een afwijking van 3%, waardoor het testsysteem nog nauwkeuriger kan simuleren en de meetresultaten van de MEM101 dichter bij de ingestelde scenario's liggen.

**REQ-3.4[CH]:** Het testsysteem is in staat om het gewenste stroom testscenario te simuleren met een maximale afwijking van 3% ten opzichte van het gewenste simulatie signaal.

Naast de stroomtestscenario's worden er bij de huidige testprocedure ook total harmonic distortion (THD) scenario's getest om te evalueren of het Smart Device de THD% correct meet. Het is belangrijk dat het testsysteem de THD% nauwkeurig kan simuleren. De klant vereist daarom dat zowel de maximale THD%-afwijking als de afwijking van alle oneven harmonischen binnen ±6% blijft. Bijvoorbeeld, als de ingestelde THD% 29,15% is, mag het door het testsysteem gesimuleerde THD-signaal maximaal ±1,75% afwijken van de ingestelde waarde.

Uit onderzoek van de afstudeerdeerder blijkt dat de meetnauwkeurigheid van de THD% door de MEM101 wordt bepaald volgens de IEC 61000-4-30 klasse S norm, waarbij een nauwkeurigheid van ±5% wordt gehanteerd. Daarom kan het maximale meetresultaat voor THD%-testscenario 1, inclusief de afwijkingen van zowel het testsysteem als de MEM101, oplopen tot 32,45%, terwijl het minimale resultaat 26,03% is. Een afwijking buiten deze waarden wijst erop dat het Smart Device niet naar behoren functioneert.

**REQ-3.5[SH]:** Het testsysteem is in staat om het gewenste THD% testscenario's te simuleren met een maximale afwijking van 6% ten opzichte van het ingestelde THD% door de testengineer.

**REQ-3.6[CH]:** Het testsysteem is in staat om het gewenste THD% testscenario's te simuleren met een maximale afwijking van 3% ten opzichte van het ingestelde THD% door de testengineer.

Bij de huidige testprocedure met de Omicron wordt slechts één poort van de maximale 8 poorten van de MEM101-device (onderdeel van het Smart Device) getest. De klant eist dat bij het nieuwe testsysteem in ieder geval ook één poort van het Smart Device getest kan worden. Echter zal het nieuwe testsysteem een veel gebruiksvriendelijker interface hebben en extra functionaliteiten die gekozen zijn op basis van de wensen van de klant. Hiermee zal het nieuwe testsysteem zich onderscheiden van de testmethode met de Omicron.

**REQ-3.7[MH]:** Het testsysteem is in staat om op 1 poort van de MEM101 de testscenario's te simuleren.

De momenteel gebruikte testmethode met de Omicron is beperkt tot het testen van slechts één van de maximaal 32 poorten van het Smart Device tegelijk. Deze beperking is een belemmering in het testproces van Smart Devices, wat resulteert in vertragingen bij de productie en ontwikkeling. Daarom heeft de klant als wens dat het testsysteem in staat is om alle 8 poorten van de MEM101 device tegelijk te testen, om zodoende de snelheid van de testprocedures te verbeteren.

**REQ-3.8[CH]:** Het testsysteem is in staat om op 8 poorten van de MEM101 tegelijkertijd de testscenario's te simuleren.

Indien de testengineer de frequentie kan instellen zoals gespecificeerd in REQ-2.6, moet het testsysteem in staat zijn om de testscenario's te simuleren op basis van de ingestelde grondfrequentie. Hierbij is nauwkeurigheid opnieuw van groot belang om de meetfunctionaliteit van het Smart Device adequaat te kunnen beoordelen.

**REQ-3.9[WH]:** Het testsysteem is in staat om de gewenste grondfrequentie te simuleren met een maximale afwijking van 1%.

### 1.3.4 Weergeef status systeem

Het proces 'weergeef status systeem' toont de status van het systeem aan de testengineer, zoals wanneer het testsysteem gereed is, bezig is met de testprocedure, gepauzeerd is, of wanneer de procedure voltooid is.

#### Stimulus en response

Stimulus: De huidige status van het systeem

Response: Weergeeft deze status aan de testengineer

#### Functionele en Performance requirements

Om aan te geven wanneer het testsysteem is aangesloten op de voeding, de initialisatie heeft voltooid en gereed is voor gebruik, wenst de klant dat het testsysteem een visuele indicatie geeft aan de gebruiker.

**REQ-4.1[CH]:** Het testsysteem geeft een visuele indicatie wanneer het testsysteem gereed is voor gebruik.

De klant wenst dat het testsysteem een visuele indicatie geeft wanneer de testprocedure gestart is.

**REQ-4.2[CH]:** Het testsysteem geeft een visuele indicatie wanneer het gestart is met de testprocedure.

De klant wenst dat het testsysteem een visuele indicatie geeft wanneer de testprocedure voltooid is.

**REQ-4.3[CH]:** Het testsysteem geeft een visuele indicatie wanneer de testprocedure voltooid is.

De klant wenst dat het testsysteem een visuele indicatie geeft wanneer de testprocedure gepauzeerd is.

**REQ-4.4[CH]:** Het testsysteem geeft een visuele indicatie wanneer de testprocedure gepauzeerd is.

De klant wenst dat het testsysteem een visuele indicatie geeft wanneer de testprocedure gestopt is.

**REQ-4.5[CH]:** Het testsysteem geeft een visuele indicatie wanneer het gestopt is met de testprocedure.

### 1.3.5 Toon actieve testscenario

Het proces “Toon actieve testscenario” toont het actieve testscenario aan de testengineer tijdens de testprocedure.

#### *Stimulus en response*

Stimulus: Het testsysteem voert een bepaalde testscenario uit tijdens de testprocedure

Response: Toont de actieve testscenario aan de testengineer

#### *Functionele en Performance requirements*

Om de functionaliteit van het Smart Device te evalueren en te verifiëren, onderzoekt de testengineer de ingestelde testscenario's. Tijdens de testprocedure leest hij de meetresultaten af van de MEM101 en vergelijkt deze met de ingestelde waarden. Op basis van deze vergelijking stelt hij uiteindelijk een testrapport op. Daarom eist de klant dat het testsysteem het actieve testscenario duidelijk weergeeft aan de testengineer. Dit stelt hem in staat om de afgelezen meetresultaten van de MEM101 effectief te vergelijken met de verwachte waarden, waardoor hij een accuraat testrapport kan samenstellen.

**REQ-5.1[MH]:** Het testsysteem geeft het actieve testscenario weer aan de gebruiker.

Het zou voor de klant in de toekomst wenselijk zijn dat het testsysteem naast het actieve testscenario ook het volgende en vorige testscenario aangeeft. Dit zou het voor de testengineer gemakkelijker maken om handmatig een testrapport te genereren.

**REQ-5.2[WH]:** Het testsysteem geeft het vorige testscenario weer aan de gebruiker.

**REQ-5.3[WH]:** Het testsysteem geeft het volgende testscenario weer aan de gebruiker.

### 1.3.6 Genereer testrapport

Het proces 'Genereer testrapport' zorgt ervoor dat er een testrapport wordt gegenereerd op basis van het gemeten testscenario door het Smart Device te vergelijken met het gewenste simulatietestscenario, en stuurt dit rapport door naar de PC.

#### **Stimulus en response**

Stimulus: Testprocedure is afgerond

Response: Genereert een testrapport door de meetresultaten van het Smart Device te vergelijken met de ingestelde testscenario's en stuurt dit door naar de PC.

#### **Functionele en Performance requirements**

Als communicatie met het Smart Device mogelijk is, wenst de klant als optionele functie dat het testsysteem automatisch een testrapport genereert met daarin de belangrijke meetresultaten. Dit stelt de testengineer in staat om te evalueren of het Smart Device naar behoren functioneert.

**REQ-6.1[CH]:** Het testsysteem genereert een testrapport na afloop van elk testprocedure en stuurt deze door naar de PC.

#### **1.4 Niet functionele eisen**

De klant wenst dat het testsysteem functioneert met een voeding die een ingangsspanningsbereik heeft van 10 tot en met 30V DC. Hierdoor kan het testsysteem niet alleen aangesloten worden op een labvoeding, die regelbaar is tot 30V, maar is het ook compatibel met andere veelvoorkomende spanningsbronnen zoals 12V. Bovendien maakt dit het mogelijk om het testsysteem te gebruiken met een accu die een uitgangsspanning heeft tussen de 10 en 30V.

**REQ-NF1[MH]:** Het testsysteem functioneert met een voeding die een ingangsspanningsbereik van 10 tot 30 VDC heeft.

De huidige verbinding tussen het Smart Device en de Rogowski-spoel verloopt via een UTP-kabel. Dit komt doordat bepaalde door de Rogowski-spoel geïnduceerde spanningen via specifieke lijnen van de UTP-kabel naar het Smart Device worden gestuurd. Het is daarom essentieel dat het testsysteem eveneens met het Smart Device verbonden is via een UTP-kabel, en dat de gesimuleerde spanningsignalen op dezelfde lijnen worden doorgestuurd naar het Smart Device, op dezelfde wijze als de Rogowski-spoel dat doet.

**REQ-NF2[MH]:** Het testsysteem kan verbonden worden met het Smart Device doormiddel van een UTP-kabel.

De klant verlangt dat het testsysteem tijdens de testprocedure niet meer dan 15 watt aan vermogen verbruikt. Stedin, een bedrijf dat zich inzet voor duurzaamheid en een belangrijke rol speelt in de energietransitie, streeft ernaar om alle processen te verduurzamen. Daarom is de wens dat het testsysteem een maximaal vermogen van 15 watt niet overschrijdt, waardoor het een duurzamer alternatief vormt voor het Omicron-apparaat.

**REQ-NF3[SH]:** Het testsysteem verbruikt tijdens de testprocedure niet meer dan 15 watt aan vermogen.

Het huidige testapparaat, de Omicron, is relatief zwaar en groot, wat het moeilijk maakt om te verplaatsen. Voor het ter plaatse testen van een Smart Device in een middenspanningsstationsruimte is het daarom van groot belang dat het testapparaat compact en niet te zwaar is. De klant vereist daarom dat het testsysteem een maximaal gewicht van 5 kg heeft en de afmetingen niet groter zijn dan 200x175x50 mm.

**REQ-NF4[CH]:** Het testsysteem weegt maximaal 5 kg.

**REQ-NF5[CH]:** De afmetingen van het testsysteem zijn maximaal 200x175x50 mm.

Het kan voorkomen dat de Smart Devices, reeds geïnstalleerd in middenspanningsstations, getest moeten worden indien nodig. Het is dan praktisch als het testsysteem op een accu werkt, zodat de testengineer zich geen zorgen hoeft te maken over het vinden van een voedingsbron in een middenspanningsstation om het testsysteem te laten functioneren.

**REQ-NF6[WH]:** Het testsysteem is uitgerust met een oplaadbare accu.

**REQ-NF7[WH]:** Er zal behuizing gemaakt worden voor het testsysteem.

---

# Bijlage D: Architectuurontwerp

DA3-project Stedin

*Architectuurontwerp testsysteem versie 1.4*

---

<b>Auteur:</b>	Younes Boulmani
<b>Stagedocent:</b>	De heer Fogarty
<b>Bedrijfsbegeleiders:</b>	Mark Burghout en Koen Peelen
<b>Titel:</b>	Architectuurontwerp
<b>Datum van uitgifte:</b>	16-04-2024

## Inhoud

1	Architectuurfase (Architecture Phase).....	129
1.1	Architectuur ontwerp .....	129
1.2	Ontwerpbesluiten.....	129
1.3	Deelsystemen .....	130
1.3.1	DAC .....	131
1.3.2	Microcontroller.....	132
1.3.3	Userinterface .....	132
1.3.4	RS485- transceiverchip .....	133
1.3.5	Voeding.....	133
1.4	Interfaces.....	133
1.4.1	Voeding en alle deelsystemen .....	133
1.4.2	Microcontroller en DAC (SPI) .....	134
1.4.3	Microcontroller en Userinterface.....	134
1.4.4	Microcontroller en RS485- tranceiverchip .....	134
1.5	Traceability .....	135

## Versie Historiek

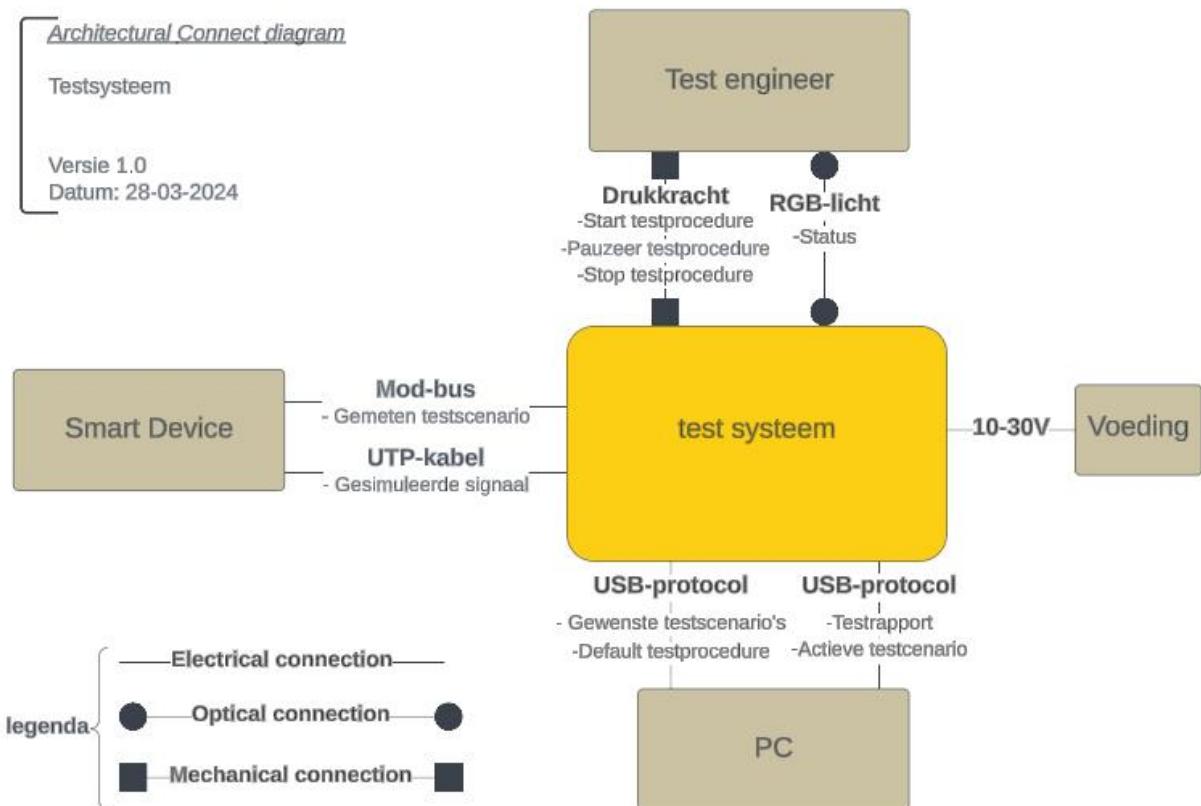
Revisie Datum	Auteur	Omschrijving
1.0	8-04-2024	Younes Boulmani
1.1	10-04-2024	Younes Boulmani
1.2	12-04-2024	Younes Boulmani
1.3	16-04-2024	Younes Boulmani
1.4	19-04-2024	Younes Boulmani

## 1 Architectuurfase (Architecture Phase)

Het testsysteem kan opgedeeld worden in meerdere deelsystemen. In dit hoofdstuk worden deze deelsystemen beschreven en gespecificeerd. De koppeling met andere deelsystemen wordt ook uiteengezet.

### 1.1 Architectuur ontwerp

In Figuur 1 is het architectuur context diagram weergeven van het testsysteem.



Figuur 1, ACD van het testsysteem

### 1.2 Ontwerpbesluiten

De keuze is gevallen op microcontrollers uit de STM32F4-serie. Deze reeks microcontrollers is gebaseerd op de ARM Cortex-M4 kern en biedt uitstekende rekencapaciteit en digitale signaalverwerking (DSP)-functies. Ze beschikken over een FPU (floating point unit), wat voor onze applicatie wenselijk is omdat we veel digitale signaalbewerking zullen uitvoeren. Ook zijn de microcontrollers in deze reeks voorzien van een USB-interface, wat het mogelijk maakt om via de microcontroller te communiceren met de PC via het USB-protocol. Daarnaast heeft de afstudeerde veel ervaring met programmeren van STM32 microcontrollers in deze serie, wat de ontwikkeltijd van het project zal versnellen. Dit vergroot de kans dat het project binnen de gestelde deadline kan worden gerealiseerd.

Op basis van de bevindingen van het onderzoek koos de afstudeerde voor het gebruik van een DAC-chip aangestuurd door een microcontroller als signaalgenerator om het Rogowski-spoelsignaal te simuleren.

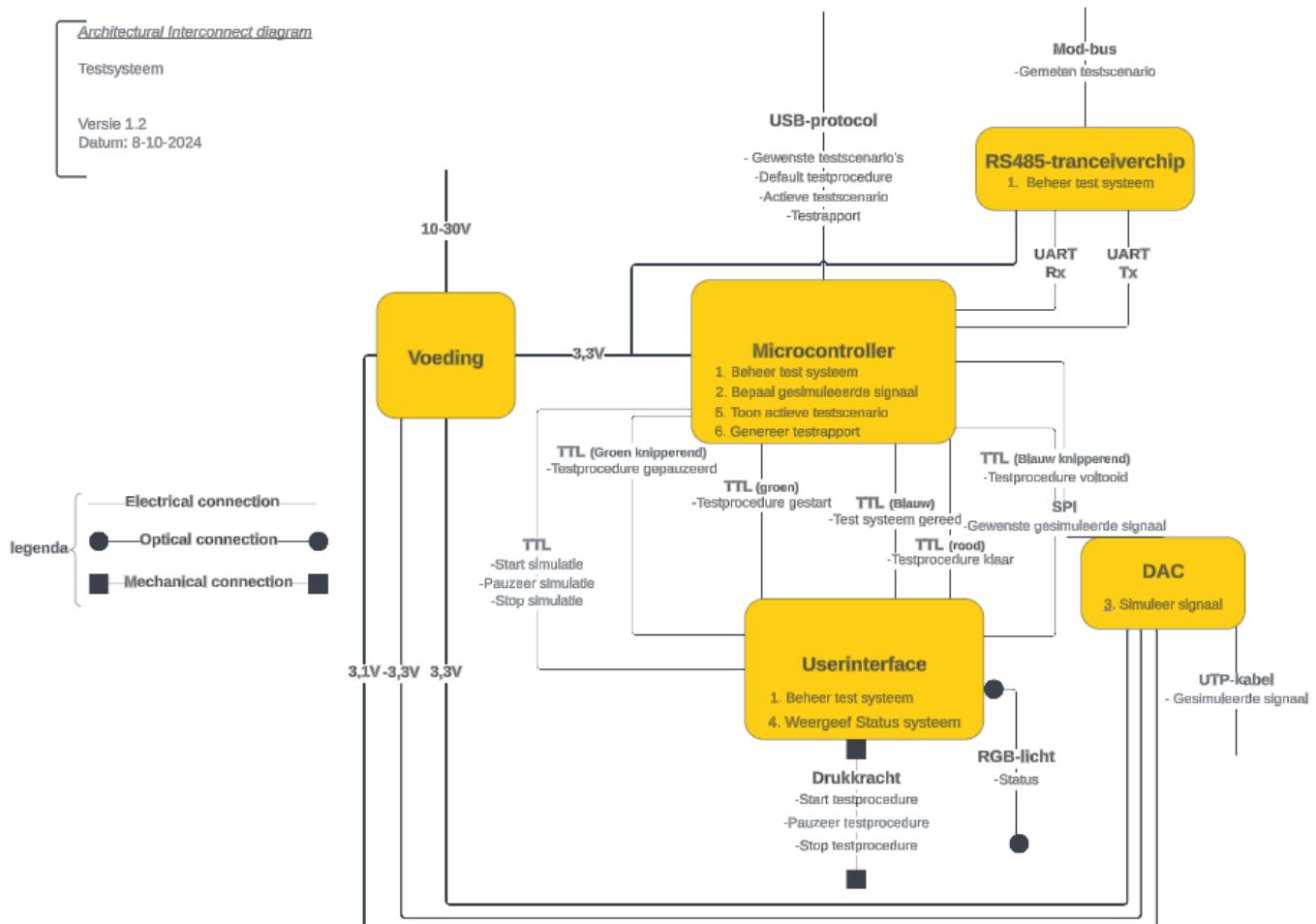
Om het actieve testsenario aan te tonen, is ervoor gekozen om het display van de PC van de testengineer te gebruiken. Aangezien er al een gebruikersinterface op de PC zal zijn voor het instellen van de gewenste testsenario's, heeft de afstudeerde besloten ook het actieve testsenario in deze gebruikersinterface te tonen. Hierdoor is er geen extra deelsysteem nodig dat alleen verantwoordelijk is voor het weergeven van het actieve testsenario, wat ruimte op de PCB bespaart en kosten vermindert.

Om de status van het systeem weer te geven, koos de afstudeerde voor een RGB-led. Hiermee kunnen drie statussen effectief aan een gebruiker getoond worden door telkens een ander lichtsignaal. RGB-leds zijn doorgaans goedkoop en eenvoudig aan te sturen, wat de keuze verklaart.

Om de testprocedure te kunnen starten, pauzeren en stoppen wordt er een knop gebruikt op het bedieningspaneel. Dit is een eenvoudige en kosteneffectieve manier om de testprocedure te reguleren.

### 1.3 Deelsystemen

De volgende Architectural Interconnect Diagram (AID) toont de verschillende deelsystemen van het architectuurontwerp, samen met hun interconnecties die beschrijven hoe ze met elkaar verbonden zijn.



Figuur 2, de AID van het testsysteem

### 1.3.1 DAC

Het genereren van het gewenste simulatiesignaal wordt gedaan door het deelsysteem DAC. De DAC ontvangt een digitaal signaal via het SPI-dataprotoocol en zet dit om in het gewenste analoge signaal, dat vervolgens via een UTP-kabel naar het Smart Device wordt gestuurd. Het is hierbij belangrijk dat de DAC een hoge resolutie heeft om het Smart Device betrouwbaar te kunnen testen. Ook moet het deelsysteem compatibel zijn om meerdere signalen tegelijk te kunnen genereren.

#### Unitspecificaties

Om te voldoen aan **REQ-3.1[MH]**, waarbij het testsysteem in staat moet zijn om het gewenste stroomtestscenario te simuleren met een maximale afwijking van 6% ten opzichte van het gewenste simulatiesignaal, is het belangrijk dat de DAC een hoge resolutie heeft. Om de vereiste resolutie voor de DAC te berekenen, kan de volgende formule worden gebruikt {1}:

$$1) \text{Resolutie(bits)} = \log_2\left(\frac{\text{referentiespanning}}{\text{Gewenste nauwkeurigheid}}\right)$$

- De referentiespanning van de DAC varieert veelal tussen 1.25V en 5V, waarbij 2.5V een vaakgebruikte referentiespanning is. De afstudeerde zal deze waarde gebruiken voor de berekening.
- De gewenste nauwkeurigheid van het testsysteem mag maximaal 6% afwijken van het gewenste simulatiesignaal. Het gewenste simulatiesignaal zal, volgens **REQ-2.2[CH]** en de conclusie van het onderzoek, variëren van 5 tot 500 gedeeld door 10000 (constante Rogowski-spoel) in mVrms. Dus, volgens **REQ-3.1 [MH]**, is de minimale gewenste nauwkeurigheid  $\frac{\frac{5}{10000} \times \sqrt{2}(\text{peak})}{100} \times 6 \approx 42,4\mu V$ .

De vereiste resolutie is:

$$\text{Resolutie(bits)} = \log_2\left(\frac{2.5}{42,4\mu}\right) \approx 15,84 \text{ bits}$$

Om het worstcasescenario te berekenen en daadwerkelijk de minimale vereiste resolutie te bepalen, wordt de nauwkeurigheidswaarde van 3% **REQ-3.4[CH]** gebruikt. Daarnaast wordt gebruikgemaakt van de maximale referentiespanning die een DAC gewoonlijk heeft, namelijk 5V. Het gebruik van deze parameters resulteert in een minimale vereiste resolutie van:

$$\text{Resolutie(bits)} = \log_2\left(\frac{5}{21.2\mu}\right) \approx 17,84 \text{ bits}$$

Om aan de eisen te voldoen, is er minimaal een resolutie van 17,84 bits en hoger nodig. Gezien de minimale vereiste resolutie van 17,84 bits en het feit dat 18 en 20-bits DAC's in vergelijking met 24-bits DAC's veel minder vaak voorkomen, vaak ook beperkt in voorraad zijn en meestal slechts over één uitvoerkanaal beschikken, terwijl het Smart Device een 24-bits ADC bevat en het testsysteem voornamelijk bedoeld is voor het testen van de ADC-chip van het Smart Device, wordt een DAC-chip met een resolutie van minimaal 24 bits aanbevolen, conform SPEC 1.1.

**SPEC 1.1:** De DAC heeft een resolutie van 24 bits of hoger.

Zoals gespecificeerd in **REQ-3.7[MH]**, moet het testsysteem minstens 1 poort kunnen testen. Voor elke poort zullen drie fasen signalen worden gegenereerd. Daarom moet het deelsysteem in staat zijn om minimaal 3 verschillende signalen tegelijkertijd te genereren.

**SPEC 1.2:** De DAC moet minimaal 3 verschillende signalen tegelijk kunnen genereren.

Als een extra wens (Could have) moet het mogelijk zijn om 8 poorten te testen, wat neerkomt op 24 signalen, waarvan 3 verschillende soorten signalen.

**SPEC 1.3:** De DAC is in staat om de drie verschillende signalen elk 8 keer te dupliveren.

Om te voldoen aan **REQ-3.7[SH]**, waarbij het testsysteem de THD%-testscenario's uitvoert en de 13e harmonische kan instellen, moet de DAC-chip in staat zijn om een frequentiecomponent van de 13e harmonische ( $13 \times 50 \text{ Hz} = 650 \text{ Hz}$ ) te genereren. Het is belangrijk dat de samplefrequentie van de DAC-chip minstens het dubbele van 650 Hz is om aliasing te voorkomen.

**SPEC 1.4:** De DAC moet een samplefrequentie hebben van minimaal het dubbele van de maximale frequentiecomponent (1300 Hz).

**SPEC 1.5:** De DAC moet in staat zijn om zowel positieve als negatieve signalen te genereren.

### 1.3.2 Microcontroller

De microcontroller vormt het brein van het systeem en is daarmee een kritiek onderdeel van het testsysteem. Deze communiceert met de verschillende deelsystemen, stuurt ze aan, vraagt data op van deze systemen, en beheert zodoende het testsysteem. Daarnaast communiceert de microcontroller met externe systemen, zoals het Smart Device en de PC. De microcontroller ontvangt de gewenste testscenario's via het USB-protocol en berekent vervolgens het benodigde simulatiesignaal op basis van deze scenario's. Het is essentieel dat de microcontroller voldoende rekencapaciteit en werkgeheugen heeft om het simulatiesignaal nauwkeurig te kunnen berekenen. Ook is het verantwoordelijk voor het opstellen en doorsturen van het testrapport, waarin de vooraf ingestelde testscenario's worden vergeleken met de uitgevoerde en gemeten testresultaten van het Smart Device.

### Unitspecificaties

**SPEC 2.1:** De microcontroller kan data doorsturen via het USB-protocol.

**SPEC 2.2:** De microcontroller kan data doorsturen via het SPI-protocol.

**SPEC 2.3:** De microcontroller kan pinnen hoog (3.3V) of laag (0V) zetten ten behoeve van het aansturen van de RGB-led.

**SPEC 2.4:** De microcontroller kan een logisch hoog (3.3V) of laag (0V) signaal registreren.

**SPEC 2.5:** De microcontroller kan data sturen via de UART-protocol

### 1.3.3 Userinterface

Het userinterface-deelsysteem bestaat uit een bedieningspaneel met een aantal knoppen en een RGB-led. Hiermee kan de testengineer de testprocedure starten, pauzeren en stoppen, en de status van het systeem bekijken. De userinterface zendt verschillende lichtsignalen uit voor de gereed-, start-, pauze- en stopstatus van de testprocedure, en laat ook zien wanneer de testprocedure voltooid is.

**SPEC 3.1:** Bij het indrukken van de startknop wordt er een startsignaal (laag signaal, 0V) doorgegeven om de testprocedure te starten.

**SPEC 3.2:** Bij het indrukken van de pauzeerknop wordt er een pauzeersignaal (laag signaal, 0V) doorgegeven om de testprocedure te pauzeren.

**SPEC 3.3:** Bij het indrukken van de stopknop wordt er een stopsignaal (laag signaal, 0V) doorgegeven om de testprocedure te stoppen.

**SPEC 3.4:** De drukknop levert geen denderend signaal bij het indrukken van de knop.

**SPEC 3.5:** De RGB-led kan een blauw licht uitzenden (gereed).

**SPEC 3.6:** De RGB-led kan een groen licht uitzenden (testprocedure gestart).

**SPEC 3.7:** De RGB-led kan een groen knipperend licht uitzenden (testprocedure gepauzeerd).

**SPEC 3.8:** De RGB-led kan een blauw knipperend licht uitzenden (testprocedure voltooid).

**SPEC 3.9:** De RGB-led kan een rood licht uitzenden (testprocedure gestopt).

#### 1.3.4 RS485- transceiverchip

De RS485-tranceiverchip dient als intermedium tussen het Smart Device en de microcontroller. De unit zorgt ervoor dat het Modbus-protocol (RTU) wordt omgezet naar de UART-protocol. Hierdoor kan de microcontroller communiceren met het Smart Device.

**SPEC 4.1:** De RS485-tranceiverchip zet het Modbus-protocol om in een UART-protocol.

#### 1.3.5 Voeding

Het deelsysteem voeding zorgt ervoor dat alle deelsystemen van het testsysteem de gewenste spanningen krijgen. De ingangsspanning het deelsysteem voeding is 10-30 Volt. Deze ingangspanning moet worden omgezet naar 3.3 en -3.3V. De meeste deelsystemen werken op 3.3V echter heeft de DAC ook een negatieve spanning nodig om zowel positieve als negatieve signalen te kunnen genereren. Het is belangrijk dat de uitgangspanningen van de voeding stabiel en zuiver en dat de voeding genoeg stroom kan leveren, zodat de andere deelsystemen goed kunnen functioneren.

**SPEC 5.1:** Het deelsysteem voeding moet kunnen werken met een ingangspanningsbereik van 10-30 Volt.

**SPEC 5.2:** De voeding levert een gewenste spanning van 3.3 en -3.3Volt met een maximale afwijking van 5%.

Omdat de afstudeerde nog niet weet hoeveel componenten er zullen worden gebruikt voor het testsysteem, en welke stroom deze componenten verbruiken, wordt de volgende specificatie niet exact gespecificeerd wat betreft de benodigde stroom. Dit zal duidelijk worden in het detailontwerp, zodra de componentkeuzes zijn gemaakt.

**SPEC 5.3:** De voeding moet minimaal de benodigde stroom kunnen leveren die het testsysteem verbruikt wanneer het actief is.

### 1.4 Interfaces

In dit hoofdstuk worden alle interfaces beschreven met de verschillende deelsystemen

#### 1.4.1 Voeding en alle deelsystemen

De voeding zorgt ervoor dat alle deelsystemen de gewenste spanning krijgen, zoals gespecificeerd in **SPEC 6.1**.

**ISPEC 1.1:** De voeding voorziet de microcontroller met een spanning van 3.3 Volt.

**ISPEC 1.2:** De voeding voorziet de DAC met een spanning van 3.3, -3.3Volt en 3.1Volt.

**ISPEC 1.3:** De voeding voorziet de RS485- tranceiverchip met een spanning van 3.3 Volt.

#### 1.4.2 Microcontroller en DAC (SPI)

De microcontroller communiceert met de DAC via het SPI-protocol. Het berekende gewenste signaal wordt digitaal doorgestuurd naar de DAC via het SPI-protocol en omgezet naar het gewenste analoge signaal.

**ISPEC 2.1:** Het berekende gewenste signaal wordt omgezet naar een analoog signaal.

#### 1.4.3 Microcontroller en Userinterface

De userinterface stuurt start-, pauzeer- en stopsignalen door naar de microcontroller via TTL-lijnen. Daarnaast ontvangt de userinterface hoge (3.3V) of lage (0V) signalen, zodat de RGB-led de juiste kleurenlicht kan weergeven voor elke status.

**ISPEC 3.1:** De userinterface stuurt een laag signaal van 0 volt naar de microcontroller als startsignaal.

**ISPEC 3.2:** De userinterface stuurt een laag signaal van 0 volt naar de microcontroller als stopsignaal.

**ISPEC 3.3:** De userinterface stuurt een laag signaal van 0 volt naar de microcontroller als pauzeersignaal.

**ISPEC 3.4:** De userinterface zendt blauw licht als de status van het testsysteem “gereed” is.

**ISPEC 3.5:** De userinterface zendt groen licht uit als de status van het testsysteem “testprocedure gestart” is.

**ISPEC 3.6:** De userinterface zendt groen knipperend licht uit als de status van het testsysteem “testprocedure gepauzeerd” is.

**SPEC 3.7:** De userinterface zendt blauw knipperend licht uit als de status van het testsysteem “testprocedure voltooid” is.

**ISPEC 3.8:** De userinterface zendt rood licht uit als de status van het testsysteem “testprocedure gestopt” is.

#### 1.4.4 Microcontroller en RS485- tranceiverchip

De interface tussen de microcontroller en de RS485-transceiverchip verloopt via het UART-protocol. Hiermee worden de UART\_TX- en RX-lijnen geconverteerd door de chip naar het Modbus-protocol, waarbij differentiële signaleering wordt toegepast.

**ISPEC 4.1:** De microcontroller kan data verzenden via het Modus-protocol.

**ISPEC 4.2:** De microcontroller kan data ontvangen via het Modbus-protocol.

## 1.5 Traceability

In de traceability tabel hieronder wordt geverifieerd of de units alle functionele requirements van het systeem dekken. Met de specificaties die zijn opgesteld zouden alle functionele requirements behaald kunnen worden.

Eisen ↓	Units →	Microcontroller	DAC	Userinterface	RS485-tranceiverchip	Voeding
REQ-1.1						
REQ-1.2						
REQ-1.3						
REQ-1.4						
REQ-1.5						
REQ-1.6						
REQ-2.1						
REQ-2.2						
REQ-2.3						
REQ-2.4						
REQ-2.5						
REQ-3.1						
REQ-3.2						
REQ-3.3						
REQ-3.4						
REQ-3.5						
REQ-3.6						
REQ-3.7						
REQ-3.8						
REQ-4.1						
REQ-4.2						
REQ-4.3						
REQ-4.4						
REQ-4.5						
REQ-5.1						
REQ-6.1						
REQ-NF1						
REQ-NF2						
REQ-NF3						
REQ-NF4						
REQ-NF5						

Legenda	
Must-Have	Blue
Should-Have	Orange
Could-Have	Grey
Van toepassing	Dark Blue
Niet van toepassing	Yellow

---

# Bijlage E: Detailontwerp fase

DA3-project Stedin

---

*Detailontwerp testsysteem versie 1*

<b>Auteur:</b>	Younes Boulmani
<b>Stagedocent:</b>	De heer Fogarty
<b>Bedrijfsbegeleiders:</b>	Mark Burghout en Koen Peelen
<b>Titel:</b>	Detailontwerp
<b>Datum van uitgifte:</b>	31-04-2024

## Inhoud

1	Detailontwerp.....	139
1.1	Herontwerp .....	139
1.2	DAC.....	140
1.2.1	Probleem met de AD1934WBSTZ-RL.....	140
1.2.2	Overstap naar een 16-bits DAC.....	140
1.2.3	Componentkeuze.....	141
1.2.4	Hardware ontwerp.....	142
1.2.4.1	Output stage .....	142
1.2.4.2	Duplicatie fase .....	143
1.3	Microcontroller.....	145
1.3.1	Componentkeuze.....	145
1.3.2	USB-interface .....	146
1.3.3	Hardware ontwerp.....	147
1.3.3.1	JTAG .....	147
1.3.3.2	Externe crystal .....	147
1.3.3.3	Schakeling microcontroller.....	147
1.4	Voeding.....	149
1.4.1	3.3Volt en -3.3Volt .....	149
1.4.1.1	3.3Volt .....	150
	Componentkeuze.....	150
	Schakeling .....	150
	Simulatie.....	151
1.4.1.2	-3.3Volt .....	152
	Componentkeuze.....	152
	Schakeling .....	152
1.4.2	LDO .....	153
1.4.2.1	Componentkeuze .....	153
1.4.2.2	Schakeling .....	154
1.4.3	Connector .....	154
1.5	RS485- tranceiverchip .....	155
1.5.1	Componentkeuze .....	155
1.5.2	Schakeling .....	155
1.6	Userinterface .....	156
1.6.1	RGB LED .....	156

1.6.1.1	Componentkeuze .....	156
1.6.1.2	Schakeling .....	157
1.6.2	Bedieningspaneel.....	157
1.7	Eerste ontwerp DAC.....	158
1.8	PCB Design.....	165
1.9	Schema's.....	166
1.10	BOM.....	166
1.11	Softwaredesign .....	167
1.11.1	Embedded Software .....	167
1.11.1.1	Belangrijke functies.....	168
1.11.1.2	Threads .....	169
	Main thread .....	169
	Knop thread .....	170
	Status thread .....	171
	Display_active_scenario thread .....	171
	Interrupt service handler .....	172
1.11.2	GUI software .....	173
1.11.2.1	Belangrijke functies.....	174
1.11.2.2	Threads .....	175
	Hoofd-UI-loop .....	175
	Seriële data-thread .....	176
1.12	Bibliografie.....	177

## Versie Historiek

Revisie	Datum	Auteur	Omschrijving
1.0	20-04-2024	Younes Boulmani	Eerste opzet detail ontwerp
1.1	27-04-2024	Younes Boulmani	Deelsysteem DAC uitgewerkt
1.2	5-05-2024	Younes Boulmani	Alle andere deelsystemen uitgewerkt.
1.3	25-05-2024	Younes Boulmani	PCB-design keuzes uitgewerkt
1.4	31-05-2024	Younes Boulmani	De documentatie bijgewerkt

## 1 Detailontwerp

In de detailfase worden keuzes voor componenten en ontwerp, evenals de implementatie van hardware en software voor elk deelsysteem, uitgewerkt. Voor het vinden van geschikte elektronische componenten heeft de afstudeerde gebruikgemaakt van Octopart, een zoekmachine voor het vergelijken van componenten op basis van categorie, prijs, beschikbaarheid, en specificaties.

### 1.1 Herontwerp

In het eerste ontwerp lukte het de afstudeerde niet om een functionerend product op te leveren vanwege problemen met de DAC. Daarom is een herontwerp gemaakt met een nieuwe DAC-chip. De overige deelsystemen zijn alleen op enkele punten aangepast, zoals de USB-interface (microcontroller) en de RGB-LED (user interface). De rest functioneerde naar behoren en vereiste geen verdere aanpassingen. Op de DAC na zijn alle componenten gebaseerd op de oorspronkelijke specificaties van versie 1 van het testsysteem. De keuze om de overige componenten ongewijzigd te laten, was tijds efficiënt en bood zekerheid dat het systeem goed zou functioneren. In het hoofdstuk 'Aanbevelingen' wordt een nieuwe microcontroller voorgesteld voor toekomstige versies.

## 1.2 DAC

Een van de belangrijkste deelsystemen van het testsysteem is de DAC (Digital-to-Analog Converter). Dit deelsysteem is verantwoordelijk voor het genereren van het gewenste simulatiesignaal. Het is dus van essentieel belang dat de juiste DAC-chip wordt gekozen, die nauwkeurige signaalomzetting kan bieden en voldoet aan de gestelde eisen. Op basis van het architectuurontwerp zijn de volgende specificaties voor de DAC vastgelegd:

- De DAC heeft een resolutie van 24 bits of hoger (**SPEC 1.1**).
- De DAC moet minimaal 3 verschillende signalen te gelijk kunnen genereren (**SPEC 1.2**).
- De DAC moet een samplefrequentie hebben van minimaal het dubbele van de maximale frequentiecomponent (1300 Hz) (**SPEC 1.4**).
- De DAC moet in staat zijn om zowel positieve als negatieve signalen te genereren. (**SPEC 1.5**)

### 1.2.1 Probleem met de AD1934WBSTZ-RL

Aanvankelijk werd, na een uitgebreide analyse van marktbeschikbaarheid, prijs en prestaties, de **AD1934WBSTZ-RL DAC**-chip gekozen voor de eerste versie van het testsysteem. Ondanks uitgebreide testen tijdens de realisatiefase lukte het echter niet om deze DAC correct werkend te krijgen. Er is contact opgenomen met de fabrikant en ontwerpbestanden zijn gedeeld, maar de oorzaak van het probleem bleef onduidelijk. De afstudeerde vermoedde dat het probleem lag bij de communicatie tussen de STM32-microcontroller en de DAC via het I2S-protocol. De STM32-microcontroller stuurt een 24-bits dataframe in een 32-bits frame, terwijl de DAC alleen 24 bits verwacht. Dit leidde waarschijnlijk tot problemen waarbij de DAC in standby bleef staan, omdat de ontvangen data niet in het juiste formaat werd aangeleverd. Vanwege de beperkte tijd en de noodzaak om een werkend product te leveren, heeft de afstudeerde besloten over te stappen op een andere DAC-chip. Zie **{1.7}** voor het detailontwerp van de AD1934WBSTZ-RL chip.

### 1.2.2 Overstap naar een 16-bits DAC

Hoewel de oorspronkelijke specificaties een resolutie van 24 bits vereisten, bleek uit de nauwkeurigheidsanalyse dat een 16-bits DAC voldoende zou zijn om aan de belangrijkste eisen te voldoen. Het testsysteem mag een afwijking hebben van maximaal 6%, en met een 16-bits DAC zou de maximale afwijking 5,39% bedragen (zie de formules hieronder voor de berekening).

#### 1. Effectieve Spanningsstapgrootte:

$$\text{Effectieve Spanningsstapgrootte} = \left( \frac{V_{ref}}{2^{16}} \right)$$

Dit is de kleinste spanningsverandering die de 16-bits DAC kan maken. Voor Vref=2.5V, is de stapgrootte ongeveer 38.1 µV.

#### 2. Minimale gewenste simulatiesignaal:

$$\text{Minimale gewenste simulatie signaal} = \frac{5}{10000} \times \sqrt{2}(\text{peak}) = 0,707\text{mV}$$

Dit is de kleinste signaalpuls die moet worden gegenereerd bij een ingesteld stroomtestscenario van 5 Ampere (minimum bereik van testsysteem)

#### 3. Afwijking:

$$\text{Afwijking testsysteem} = \left( \frac{\text{Effectieve Spanningsstapgrootte}}{\text{minimale gewenste simulatie signaal}} \right) \times 100 = \left( \frac{3,81 \times 10^{-5}}{0,707 \times 10^{-3}} \times 100 \right) = 5,39\%$$

Dit geeft aan dat het systeem een maximale afwijking van 5,39% heeft, wat binnen de toegestane afwijking van 6% valt.

Gezien de tijdsdruk en de noodzaak om een werkend systeem te leveren voor de herkansing, en om te focussen op de belangrijkste eisen, koos de afstudeerde ervoor om een 16-bits DAC te gebruiken in plaats van een 24-bits DAC. DAC's met een 16-bits resolutie hebben vaak een SPI/I2C-interface, die eenvoudiger aan te sturen is dan het I2S-protocol dat meestal wordt gebruikt bij 24-bits DAC's.

De afstudeerde heeft drie verschillende 16-bits DAC's met elkaar vergeleken op basis van resolutie, aantal kanalen, nauwkeurigheid en prijs. Hieronder worden de resultaten van deze vergelijking:

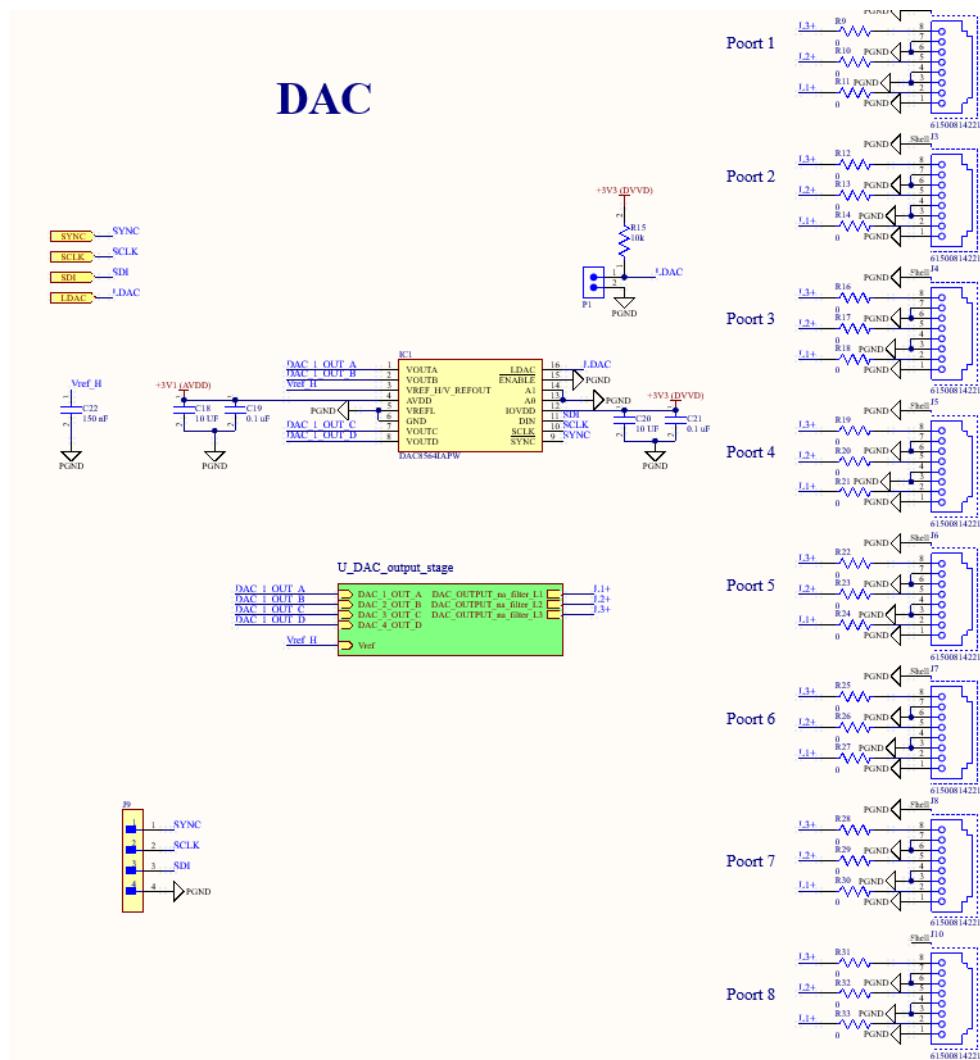
Part Number	Resolutie	Kanalen	Vref	DNL/INL (LSB)	Vsupply	Bemonsteringsnelheid	Interface type	Prijs (€)
1.DAC8564IAPW	16	4	2.5V	$\pm 0.5 / \pm 4$	2.7V to 5.5V	200 kS/s	3-Wire, DSP, Microwire, QSPI, SPI	€14,87
2.AD5664RBRMZ-5	16	4	2.5V	$\pm 1 / \pm 12$	2.7V to 5.5V	220 kS/s	3-Wire, DSP, Microwire, QSPI, SPI	€19,16
3.DAC7632VFT	16	2	2.5V	$\pm 2 / \pm 3$	5V	89 kS/s	Serial	€21,97

### 1.2.3 Componentkeuze

Na de vergelijking viel de keuze op component nummer 1: DAC8564IAPW. Hoewel component nummer 3 een betere INL (Integrale Niet-Lineariteit) biedt in vergelijking met de andere twee componenten, heeft deze slechts twee kanalen en werkt hij op een 5V voeding. Dit zou extra ontwerptijd vereisen om zowel een extra DAC toe te voegen voor het derde kanaal (voor het genereren van drie verschillende gelijktijdige signalen) als een aangepaste voeding te ontwikkelen, wat niet praktisch is. Daarom is gekozen voor de DAC8564IAPW. Deze biedt niet alleen vier kanalen, wat voldoet aan de specificaties, maar heeft ook een betere balans tussen DNL (Differentiële Niet-Lineariteit) en INL ten opzichte van de andere componenten. Dit is belangrijk voor een nauwkeurige signaalomzetting, wat cruciaal is voor onze toepassing, aangezien de signalen in de millivolt-range worden gegenereerd. Bovendien is deze chip ook de goedkoopste optie, wat het een kostenefficiënte keuze maakt voor de uiteindelijke implementatie.

### 1.2.4 Hardware ontwerp

Figuur 1 toont de aanbevolen schakeling van de DAC volgens de datasheet (Texas Instruments, 2011) [1]. Testpinnen zijn toegevoegd aan de SPI-datalijnen en de LDAC-lijn, zodat de afstudeerde de DAC goed kan unitesten. Daarnaast is er een duplicatiestage met 8 poorten en een DAC-uitgangsstage aanwezig, die verder in deze paragraaf worden uitgewerkt.



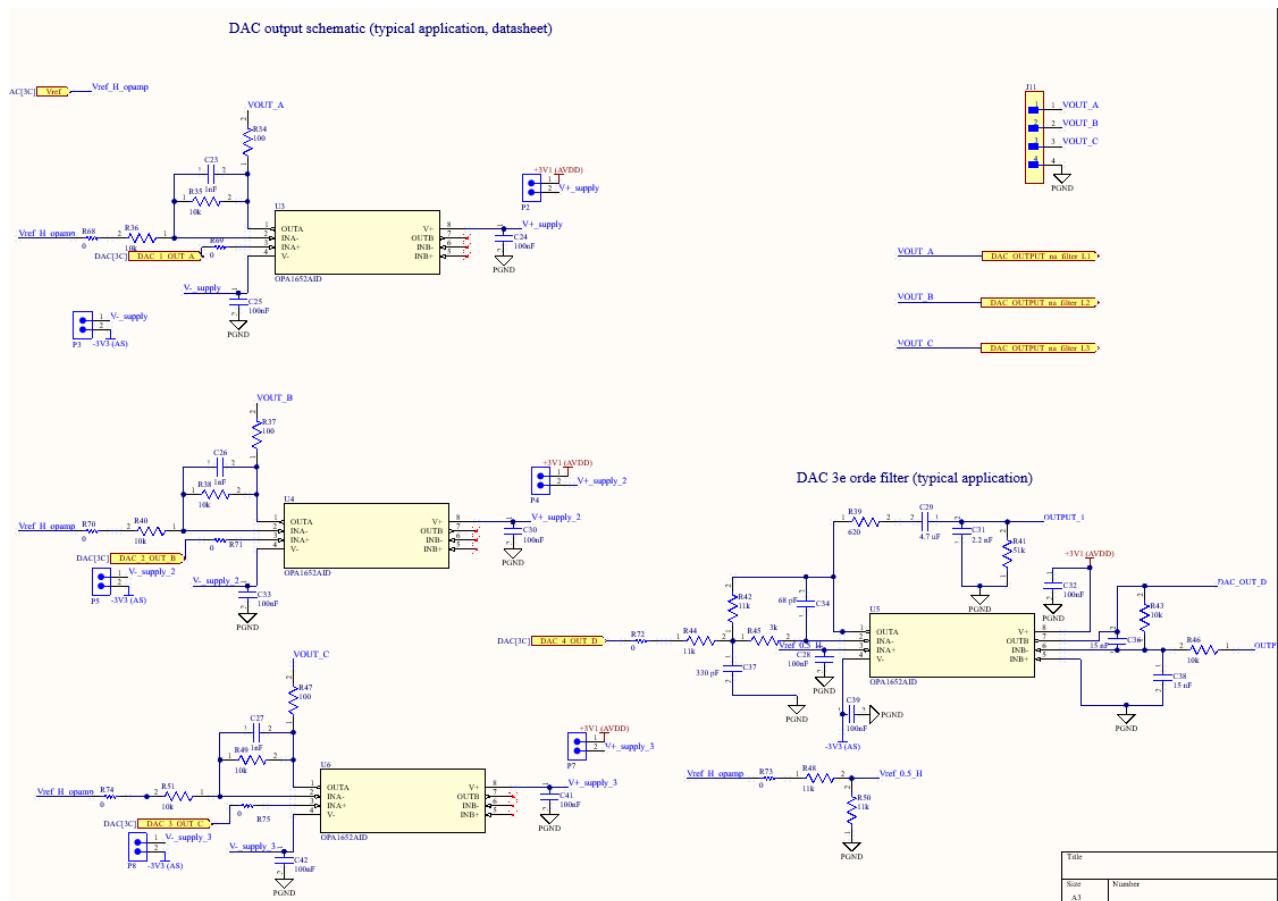
Figuur 1, schema van DAC-deelsysteem

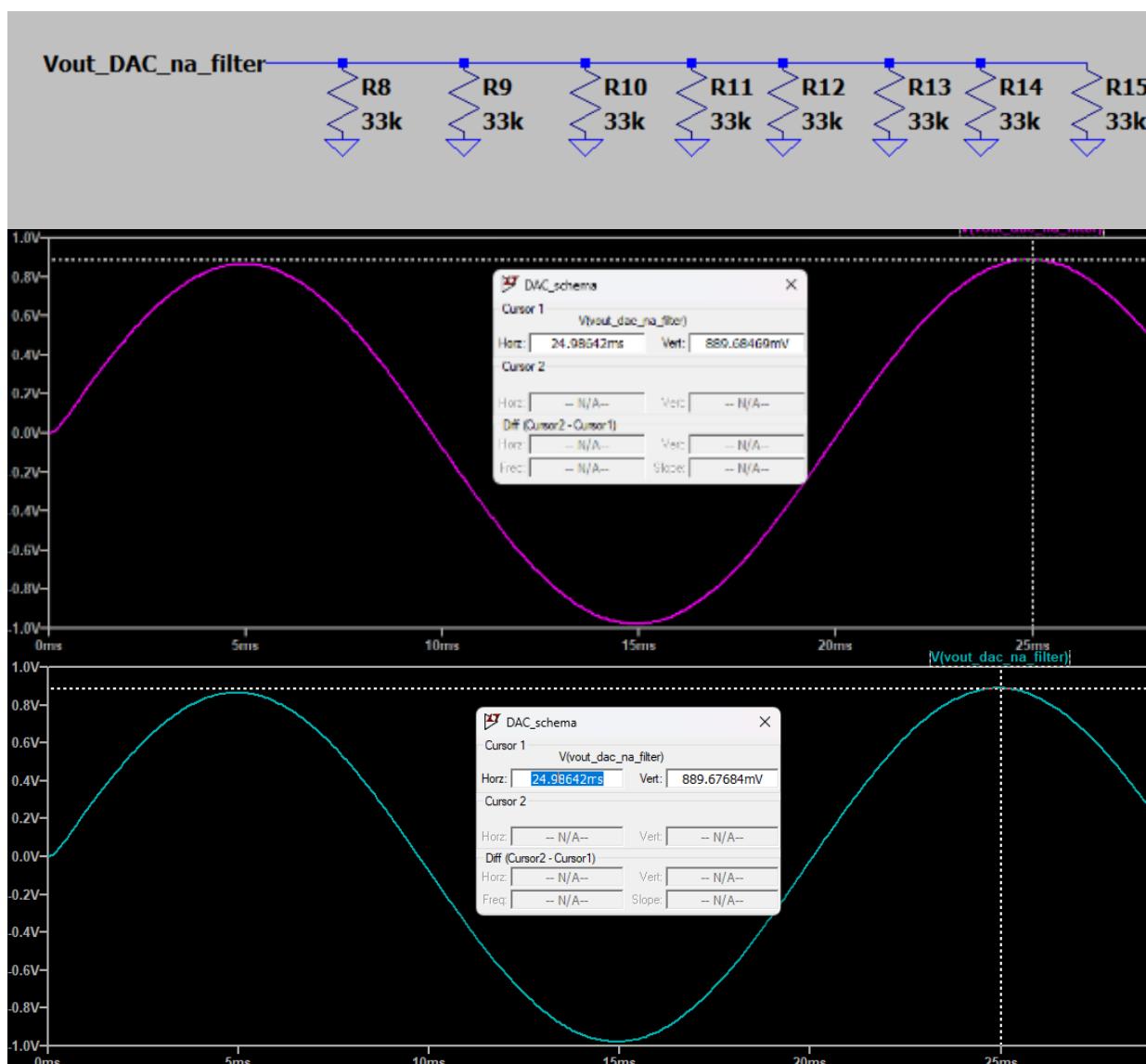
#### 1.2.4.1 Output stage

Om een bipolaire uitgang te genereren, waarbij zowel positieve als negatieve signalen mogelijk zijn (**SPEC 1.5**), is een outputstage nodig. Deze stage zorgt ervoor dat de offset van de uitgang naar 0 wordt gebracht. In Figuur 2 wordt het schema getoond van de aanbevolen outputstage volgens de datasheet, evenals de outputstage die is gebruikt op het DAC8564EVM development bordje (Texas Instruments, 2008)[2]. Omdat er vier kanalen zijn, wordt ook het vierde kanaal gebruikt, waarbij het outputfilter van de DAC uit de eerste versie werd hergebruikt. Dit stelt de afstudeerde in staat om tijdens het unittesten het signaal te vergelijken: met en zonder outputfilter, zodat het effect hiervan kan worden geanalyseerd (voor de berekeningen en simulaties, zie de bijlage van de DAC voor de herkansing). Daarnaast zijn er extra testpinnen toegevoegd bij de Vsupply-pinnen om tijdens het unittesten eventueel te testen met

een externe voeding. Ook zijn er meerdere 0-ohm weerstanden toegevoegd, zodat de DAC-output stage optimaal kan worden getest.

De afstudeerde heeft gekozen voor de OPA1652AID van Texas Instruments als opamp voor de outputfilters, dezelfde opamp die al in de eerste versie van het testsysteem werd gebruikt. Deze opamp behoort tot de categorie audioversterkers en biedt een lage ruisdichtheid van 4.5 nV/VHz bij 1 kHz, samen met een lage totale harmonische vervorming (THD) van 0.00005%. Deze eigenschappen zijn belangrijk voor onze toepassing om de signaal-ruisverhouding te maximaliseren.





Figuur 3, De schakeling met laad. De paarse simulatie vertegenwoordigt het uitgangssignaal zonder laad, terwijl het lichtblauw de simulatie met laad weergeeft.

### 1.3 Microcontroller

De microcontroller vormt het brein van het systeem en is daarmee een kritiek onderdeel van het testsysteem. Deze communiceert met de verschillende deelsystemen, stuurt ze aan, vraagt gegevens op van deze systemen, en beheert zodoende het testsysteem en communiceert met externe systemen. Er is gekozen om gebruik te maken van de microcontrollers uit de STM32F4-serie (zie ontwerpbesluiten).

De microcontroller is gekozen op basis van de specificaties die oorspronkelijk werden opgesteld voor testsysteem versie 1, waarbij de DAC een I2S-interface gebruikte. De afstudeerde heeft ervoor gekozen om voor het nieuwe ontwerp dezelfde microcontroller te gebruiken, omdat het ontwerp al beschikbaar was en goed functioneerde. Dit bespaart tijd in het ontwerpproces en biedt de zekerheid dat het systeem correct werkt. In het hoofdstuk 'Aanbevelingen' wordt echter wel een nieuwe microcontroller aanbevolen voor toekomstige versies.

De microcontroller moet aan de volgende specificaties voldoen:

- **SPEC 2.1:** De microcontroller kan communiceren via het USB-protocol.
- **SPEC 2.2:** De microcontroller kan communiceren via het SPI-protocol.
- **SPEC 2.3:** De microcontroller kan pinnen hoog (3.3V) of laag (0V) zetten ten behoeve van het aansturen van de RGB-led.
- **SPEC 2.4:** De microcontroller kan een logisch hoog (3.3V) of laag (0V) signaal registreren.
- **SPEC 2.5:** De microcontroller kan een digitaal bewerkt signaal doorsturen via het I2S-protocol. (Hierbij is het belangrijk dat de microcontroller minimaal twee I2S interfaces heeft om 3 verschillende signalen te kunnen genereren).
- **SPEC 2.6:** De microcontroller kan communiceren via het UART-protocol.

In tabel 9 zijn een aantal microcontrollers van de STM32F4 serie met elkaar vergeleken.

Microcontroller	Kloksnelheid (Hz)	Flash	Ram	Aantal I2S interfaces	Aantal USART /UART-interfaces	Aantal I/O pinnen	USB-interface	Prijs (€)
1. STM32F405RGT7TR	168 MHz	1MB	192 KB	2	4/2	50	USB 2.0	11,75
2. STM32F446RET6	180 Mhz	512 KB	128 KB	3	4/2	50	USB 2.0	9,35
3. STM32F401RCT6TR	84 MHz	256KB	64 KB	2	3/0	50	USB 2.0	5,11

#### 1.3.1 Componentkeuze

Voor deze toepassing is het essentieel dat de microcontroller voldoende geheugen heeft om DSP-bewerkingen uit te voeren en alle firmware voor het systeem te ondersteunen. Omdat de exacte geheugeneisen van de firmware vooraf niet bekend zijn, is een microcontroller met voldoende flash en RAM noodzakelijk om flexibiliteit te waarborgen. Component nummer 3 heeft relatief weinig geheugen vergeleken met de andere microcontrollers en de hoeveelheid geheugen kan onvoldoende zijn voor deze toepassing, wat het risico op beperkingen tijdens de ontwikkeling verhoogt. Daarom wordt er niet gekozen voor component nummer 3.

De I2S-interfaces zijn cruciaal voor de communicatie met DAC's (Digital-to-Analog Converters). Daarom is gekozen voor component nummer 2, de STM32F446RET6. Dit is de enige microcontroller in de STM32F4-serie met 3 I2S-interfaces, wat een belangrijk voordeel is. Door drie afzonderlijke I2S-kanalen te hebben, kan elk kanaal toegewezen worden aan een specifieke serial data-lijn voor de DAC. Dit

vereenvoudigt de ontwikkeling en vermindert de complexiteit van de firmware. Het gebruik van slechts twee I2S-kanalen zou betekenen dat complexe oplossingen zoals left-right justification geïmplementeerd moeten worden om drie signalen te genereren, wat zowel de ontwikkelingstijd als de foutkans verhoogt.

Na verdere analyse bleek dat de benodigde 3 I2S-interfaces alleen beschikbaar zijn in de 144-pin package variant van de STM32F446. Daarom is besloten om de **STM32F446ZET7** te gebruiken. Naast de bovengenoemde punten biedt de STM32F446RET6/ZET7 ook een uitstekende balans tussen kloksnelheid, geheugen en prijs, terwijl het voldoende I/O-pinnen en USB 2.0-ondersteuning biedt.

### 1.3.2 USB-interface

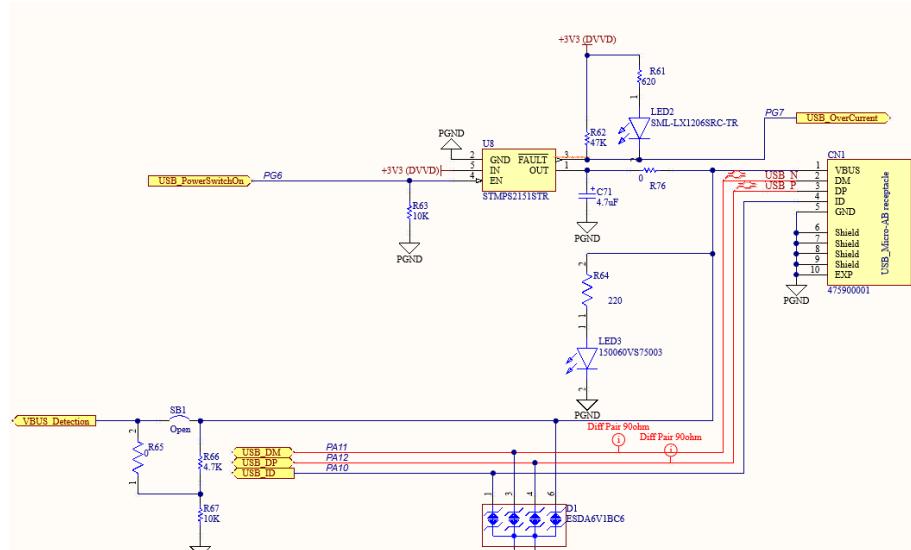
De microcontroller beschikt over een interne USB 2.0 OTG\_FS-interface (STMicroelectronics, 2024)[5] Echter vereist het testsysteem enkele externe componenten (zoals een connector en ESD-bescherming) om de USB-interface volledig operationeel te maken. Voor de connector is er gekozen voor **de micro USB B-connector 475900001**. Deze connector is een gangbare standaard voor veel smartphones, tablets en andere kleine elektronische apparaten. Bovendien zijn er veel kabels beschikbaar die deze micro USB B-connector ondersteunen.

Omdat een USB-connector vaak wordt los- en aangekoppeld, kan dit een bron van ESD zijn. Daarom is het belangrijk om ESD-bescherming te hebben in de schakeling om de andere componenten op de PCB te beschermen tegen ESD. Hiervoor is gekozen voor de ESD-beschermingschip **ESDA6V1BC6**, die ook door STM32 wordt gebruikt in hun Nucleo boards. "ESD protection of STM32 MCUs and MPUs" (STMicroelectronics, 2022)[6].

Aangezien het testsysteem niet via de USB-interface van stroom wordt voorzien, is Vbus-sensing belangrijk. Een spanningsdeler is nodig om de 5V van de VBUS-lijn compatibel te maken met de 3.6V die de I/O-pin van de microcontroller vereist. Daarnaast wordt de **STMPS2141STR**-chip gebruikt om de USB-poort te beschermen tegen overstroom. Er zijn ook status-LED's toegevoegd om de gebruiker te laten zien wanneer de USB-poort is gekoppeld en om overstroom aan te geven met een rode LED. In Figuur 4 is de schakeling van de USB-interface te zien.

### 1.3.3 Hardware ontwerp

In deze paragraaf wordt de schakeling van het deelsysteem van de microcontroller verder in detail besproken.



Figuur 4, Schakeling van de USB- interface.

#### 1.3.3.1 JTAG

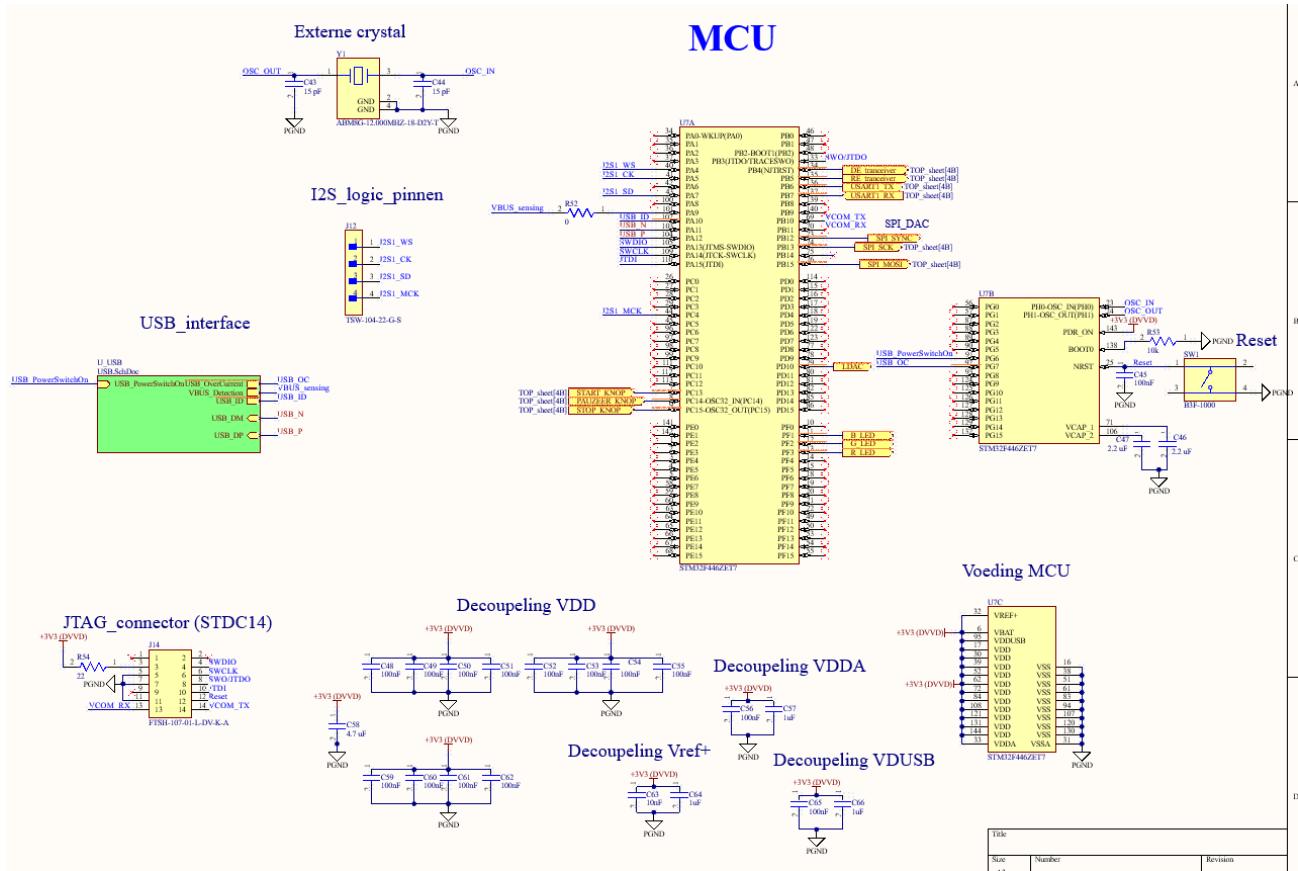
Om de firmware op het flashgeheugen te zetten, wordt de STLink V3Set-programmeur gebruikt, die beschikbaar is binnen Stedin. Om dit mogelijk te maken, heeft de afstudeerde de **FTSH-107-01-L-DV-K-A connector** gebruikt, met dezelfde pinout als de STLink V3Set. Hierdoor kan de STLink V3Set gemakkelijk worden gekoppeld aan het testsysteem voor debugging (STMicroelectronics, 2023) [7].

#### 1.3.3.2 Externe crystal

Om een goede, nauwkeurige en stabiele klok voor de microcontroller te garanderen, is gekozen om een extern kristal toe te voegen: de **ABM8G-12.000MHZ-18-D2Y-T** van 12 MHz. Aangezien de microcontroller via USB zal communiceren, is een stabiele en nauwkeurige klok zeer gewenst.

#### 1.3.3.3 Schakeling microcontroller

In Figuur 5 is de volledige schakeling van het deelsysteem van de microcontroller te zien. Ontkoppelcondensatoren zijn toegevoegd volgens de aanbevelingen in de datasheet, en er is ook een drukknop toegevoegd om de microcontroller te resetten (STMicroelectronics, 2021) [8].



Figuur 5, Schakeling van het deelsysteem microcontroller.

## 1.4 Voeding

Het deelsysteem voeding moet ervoor zorgen dat alle deelsystemen van het testsysteem de gewenste spanningen krijgen en moet van voldoende stroom kunnen voorzien. Voor de voeding zijn de volgende specificaties opgesteld.

**SPEC 5.1:** Het deelsysteem voeding moet kunnen werken met een ingangsspanningsbereik van 10-30 Volt.

**SPEC 5.2:** De voeding levert een gewenste spanning van 3.3 en -3.3 Volt met een maximale afwijking van 5%.

**SPEC 5.3:** De voeding moet minimaal de benodigde stroom kunnen leveren die het testsysteem verbruikt wanneer het actief is.

Na verdere analyse heeft de afstudeerde ontdekt dat het sterk wordt aangeraden om een aparte lineaire spanningsregelaar te gebruiken voor het analoge gedeelte van de DAC en een aparte voeding voor het digitale gedeelte van de PCB (zoals de microcontroller en RS485-transceiverchip). Dit scheidt de voedingen, waardoor de EMI wordt verlaagd en de nauwkeurigheid van de signaalgeneratie van de DAC wordt verhoogd [15].

**SPEC 5.4:** Het analoge gedeelte van de DAC moet gevoed worden met een aparte lineaire spanningsregelaar.

Binnen de PCB zijn er drie voedingssecties: het analoge gedeelte, het digitale gedeelte, en de negatieve voeding. Om componentkeuzes te kunnen maken, is er een schatting gemaakt van de minimale benodigde stroom die elk van deze secties moet kunnen leveren **SPEC 5.3**. Deze schattingen zijn gebaseerd op de typische/maximum voedingsstromen die in de datasheets van de IC's staan beschreven, evenals op simulaties die zijn uitgevoerd met LTspice voor de filtering stage van de DAC. In Tabel 1 staat hoeveel stroom elke sectie minimaal moet kunnen leveren.

Voedingssectie	Benodigde Stroom
Analoge sectie (voedingspinnen voor de DAC en de positieve voeding voor de opamps)	100 mA (Datasheet en simulatie)
Digitale sectie (alles behalve de analoge sectie)	405 mA (Datasheet)
Negatieve voeding (negatieve voeding voor de opamps)	24mA (simulatie)
<b>Totaal</b>	529 mA

Tabel 2, Stroom analyse

### 1.4.1 3.3Volt en -3.3Volt

Voor het omzetten van een ingangsspanning van 10-30 Volt naar 3.3 Volt en -3.3 Volt kan gebruik worden gemaakt van spanningsregelaars. Spanningsregelaars komen in twee hoofdtypen:

1. Lineaire spanningsregelaars
2. Schakelende spanningsregelaars

- **Keuze voor Schakelende Spanningsregelaars:**

Voor dit project is er gekozen voor schakelende spanningsregelaars. Dit komt doordat het deelsysteem een ingangsspanning van maximaal 30 Volt moet omzetten naar 3.3 Volt. Aangezien het spanningsverschil best groot is en schakelende regelaars een veel hoger rendement bieden in vergelijking met lineaire spanningsregelaars, zijn deze geschikter voor dit doel (Monolithic Power Systems, z.d.)[9].

- **Ontwerpdetails:**

Het selecteren van een schakelende spanningsregelaar die zowel een positieve als een negatieve spanning kan creëren, is beperkt en complex in ontwerp. Daarom is de gekozen benadering als volgt:

*Step-Down Regulator:* Eerst wordt een step-down (buck) schakelende spanningsregelaar gebruikt om een spanning van 3.3 Volt te creëren.

*Charge pump voltage regulator:* Vervolgens wordt een charge pump spanningsregelaar gebruikt om een inverse spanning van -3.3 Volt te genereren. Omdat er niet veel stroom door de -3.3 Volt voeding nodig is, wordt gekozen voor een charge pump spanningsregelaar. Deze keuze is gebaseerd op de eenvoudige implementatie en het vaak kleine formaat van charge pump regelaars in vergelijking met inverting schakelende regelaars. Dit maakt de charge pump spanningsregelaar een efficiënte en praktische oplossing voor het genereren van de benodigde negatieve spanning zonder veel ruimte in beslag te nemen of complexe schakelingen te vereisen.

#### 1.4.1.1 3.3Volt

Voor de omzetting van 30 Volt naar 3.3 Volt wordt gebruik gemaakt van een step-down spanningsregelaar. Hieronder worden drie mogelijke chips met elkaar vergeleken:

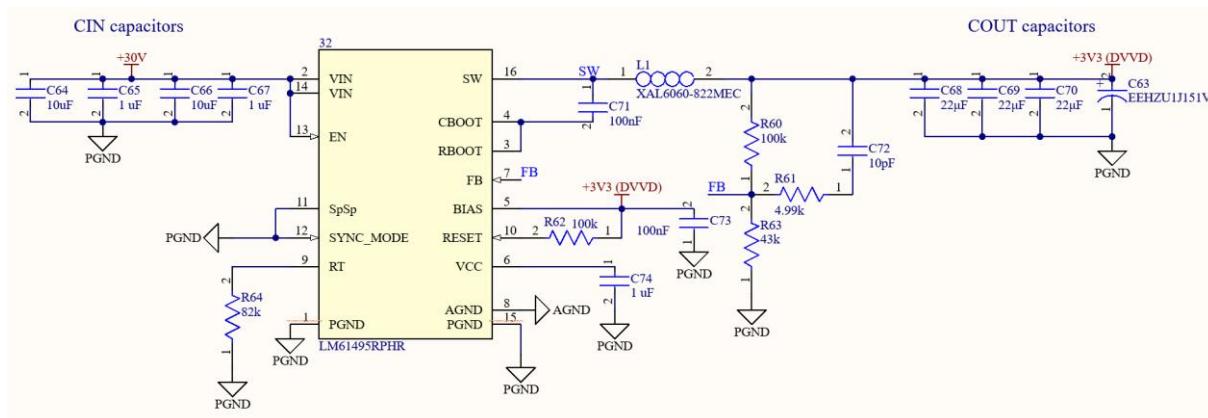
Part Number	Vin min/Vmax V.	Vout max	I out max	Efficiency up to(%)	Output tollerantie (%)	Switching frequency (min/max)	Prijs (€)
1. LM61495RP HR	3/36	1/34.2V	6A	93%	+ 0.8%	200/ 2200 kHz	4,33
2. LMR51430X DDCR	8/40	95%*Vin	3A	89,2%	±1.5%	500/ 1.1 MHz	1,39
3. LM60440DR PKR	3.8/36	1/24	4A	89%	±1.5%	1 MHz	2.50

#### Componentkeuze

Voor de componentkeuze is de LMR51430XDDCR uitgesloten vanwege de hoge switching frequentie in vergelijking met de andere voedingschips, wat voor veel elektromagnetische interferentie (EMI) kan zorgen en problemen kan veroorzaken voor de DAC. De afstudeerde heeft gekozen voor component nummer 1, de LM61495RPHR chip, omdat deze het hoogste rendement biedt en een zeer lage output tolerantie heeft in vergelijking met de LM60440DRPKR. De LM61495 heeft ook de laagste switching frequentie van 200 kHz, wat gunstig is voor het minimaliseren van EMI. Bovendien kan deze chip meer stroom leveren (6A), wat van toegevoegde waarde kan zijn als het testsysteem in de toekomst meer stroom nodig heeft.

#### Schakeling

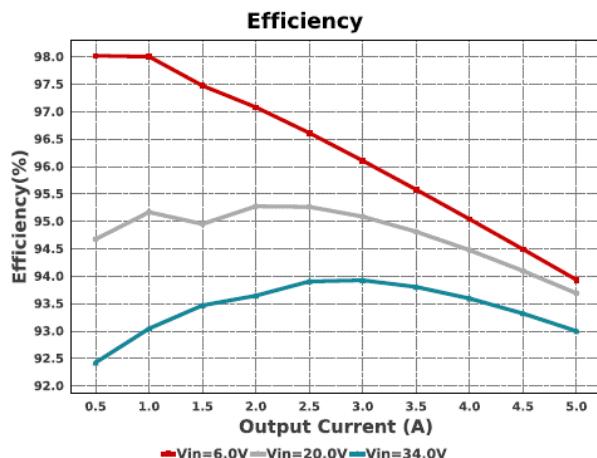
De schakeling van de LM61495 voedingschip wordt getoond in de figuur. De externe componenten en hun plaatsing zijn gebaseerd op de aanbevelingen van de datasheet (Texas Instruments Incorporated, 2020) [12].



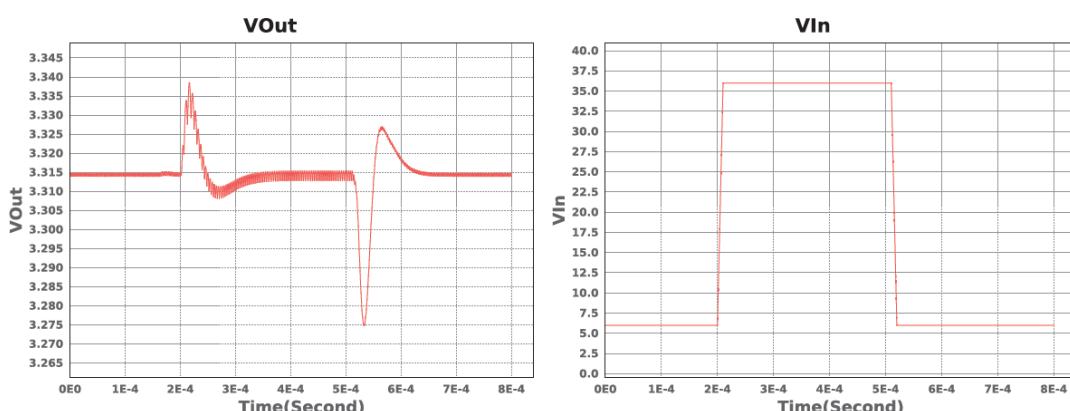
Figuur 6, schakeling van de LM61495 voedingschip

### Simulatie

Hieronder zijn een aantal grafieken te zien van simulaties die zijn uitgevoerd door de afstudeerde met behulp van de simulatielool van Texas Instruments. In Figuur 7 is de efficiëntieplot te zien bij verschillende uitgangstromen, en in Figuur 8 is de input transient simulatie uitgevoerd. Hierbij zijn de maximale en minimale uitgangsspanningen respectievelijk 3.34 V en 3.27 V, met een gemiddelde van 3.31 V, wat voldoet aan de maximale afwijking gespecificeerd in **SPEC 5.2**



Figuur 7, efficiëntieplot



Figuur 8, input transient

#### 1.4.1.2 -3.3 Volt

Na de omzetting van 30 Volt naar 3.3 Volt is er nu alleen nog een charge pump spanningsregelaar nodig om de spanning van 3.3 Volt om te zetten naar -3.3 Volt. Hieronder worden twee mogelijke chips met elkaar vergeleken.

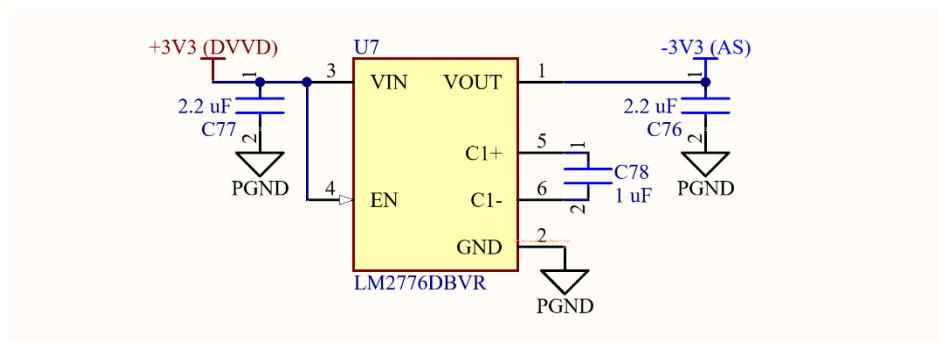
Part Number	Vin min/Vma V.	Vout max	I out max	Efficiency up to(%)	Switching frequency (min/max)	Prijs (€)
1. LM2776DBVR	2.7/5.5	-VIN	200 mA	91%	2MHz	1,39
2. ADM8828ARTZ-REEL7	1.5/5.5	-VIN	25 mA	90%	120 kHz	3.35

#### Componentkeuze

Er is gekozen voor component nummer 1, de LM2776DBVR, omdat deze een hogere uitgangsstroom heeft. De uitgangsstroom van 25mA van de ADM8828ARTZ-REEL7 is te weinig voor het voeden van de opamps. In de simulatie vragen de opamps een stroom van -24mA. In de praktijk kan deze waarde hoger liggen, waardoor een hogere uitgangsstroom vereist is. Daarom is gekozen voor de LM2776DBVR, die een uitgangsstroom van 200mA biedt.

#### Schakeling

In Figuur 9 is de schakeling te zien van de chip volgens de aanbevelingen van de datasheet (Texas Instruments Incorporated, 2015) [10].



Figuur 9, schakeling van de LM2776DBVR chip

### 1.4.2 LDO

Om aan SPEC 6.4 te voldoen is er een aparte lineaire spanningsregelaar nodig om de 3.3V output voeding van de switching voltage regulator te reguleren naar de gewenste voeding voor de DAC. De DAC heeft een minimale power supply nodig van 3V [15]. Om de spanning van 3.3V naar 3V om te zetten zal gebruik gemaakt worden van een LDO die heel goed werkt bij kleine spanningsregelaars.

Hieronder zijn een aantal LDO- chips met elkaar vergeleken.

Part Number	V <sub>in</sub> min/Vma x V.	Dropout voltage min/ max	I <sub>out</sub> max	Load regulation	PSRR	Prijs (€)
1. LT3021ES8# PBF	1/10	155mV	500 mA	0,2%	70	6,08
2. MAX604CSA	2.7/11.5	240mV	500 mA	0,9%	60	5.70
3. MAX1793EU E25+T	2.5/5.5	270mV	1A	0,7 %	55	4.13

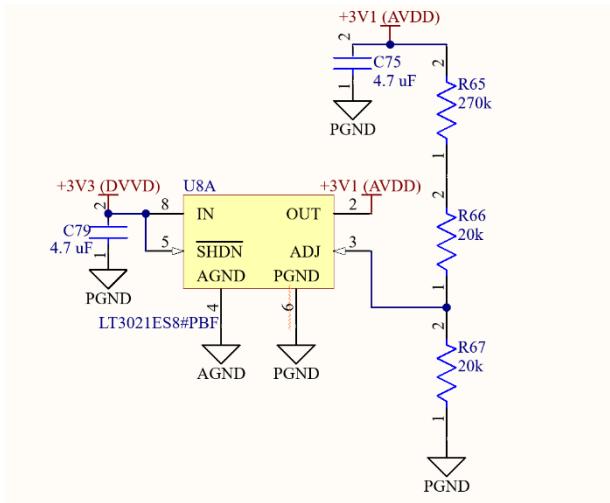
#### 1.4.2.1 Componentkeuze

Er is gekozen voor **component nummer 1, de LT3021ES8#PBF** vanwege de laagste dropout voltage. Omdat we een zo dicht mogelijke spanning willen benaderen bij de ingangsspanning van 3.3 Volt, is een LDO met een zo laag mogelijke dropout voltage gewenst. De LT3021ES8#PBF heeft een dropout voltage van slechts 155mV, wat het mogelijk maakt om een stabiele 3V output te behouden dicht bij de ingangsspanning van 3.3V.

Daarnaast heeft de LT3021ES8#PBF een hogere PSRR (Power Supply Rejection Ratio) van 70 dB, wat zeer gunstig is voor onze toepassing. Een hogere PSRR zorgt ervoor dat de LDO-variaties in de inputspanning beter kan onderdrukken, wat resulteert in een stabiele voeding voor de DAC. Tevens biedt de LT3021ES8#PBF de beste load regulation (0,2%), wat bijdraagt aan de stabiliteit van de uitgangsspanning onder verschillende belastingen.

#### 1.4.2.2 Schakeling

De schakeling van de LDO is in Figuur 10 te zien. Met behulp van weerstanden R65, R66 en R67 is een verstelbare uitgangsspanning van 3.1 Volt gecreëerd, berekend volgens de verstelbare uitgangsformule in de datasheet (Analog Devices, 2021). (Analog Devices, 2021)[11].



Figuur 10, schakeling van de LDO

#### 1.4.3 Connector

De afstudeerde heeft ervoor gekozen om de banaanplugconnector 2269-2 te gebruiken vanwege het gebruik van banaankabels in Stedin en het feit dat de labvoeding banaanpluggen gebruikt.

## 1.5 RS485- tranceiverchip

De RS485-transceiverchip dient als intermedium tussen het Smart Device en de microcontroller en zet het Modbus-protocol om in een UART-protocol zodat het testsysteem kan communiceren met het Smart Device. Het deelsysteem moet voldoen aan de volgende specificatie:

**SPEC 4.1:** De RS485-tranceiverchip zet de Modbus-protocol om in een UART-protocol.

Hieronder zijn een aantal RS485-tranceiverchips met elkaar vergeleken

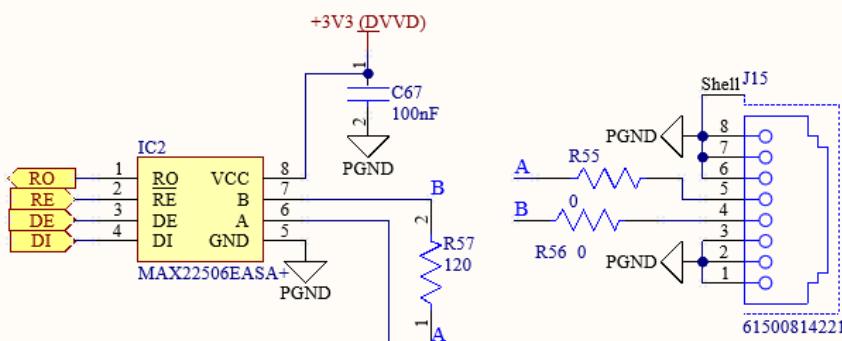
Part Number	Vin min/Vmax V.	Temperatuurbereik	ESD-bescherming	Datasnelheid	Duplex	Prijs (€)
1. MAX3485EP A+	3.3	-40/ 85	-	10 Mb/s	Half duplex	7,96
2. SN65HVD72 DR	3/3.6	-40/125	+- 15 kV	250 kb/s	Half duplex	2.73
3. MAX22506E ASA+	3/5.5	-40/125	+- 15 kV	50 Mb/s	Half duplex	3,89

### 1.5.1 Componentkeuze

Component nummer 2, de SN65HVD72DR, is uitgesloten vanwege de beperkte datasnelheid van 250 kb/s. Industriële toepassingen vereisen vaak een hogere datasnelheid tot 50 Mb/s. Daarom is gekozen voor component nummer 3, de MAX22506EASA+. Deze chip biedt de hoogste datasnelheid van 50 Mb/s en heeft ook een hoog temperatuurbereik van -40°C tot 125°C, wat extra flexibiliteit biedt voor toekomstig gebruik in industriële omgevingen.

### 1.5.2 Schakeling

In Figuur 11 is de schakeling van de RS485-transceiverchip te zien. De afstudeerde heeft gekozen voor de 61500814221 RS485-connector, die ook al eerder is gebruikt voor de DAC-poorten. Daarnaast zijn er 0-ohm weerstanden toegevoegd als testpunten voor de realisatiefase.



Figuur 11, schakeling van de RS485-transceiverchip

## 1.6 Userinterface

Het userinterface-deelsysteem bestaat uit een bedieningspaneel met een aantal knoppen en een RGB-led. Het zorgt ervoor dat de testengineer de testprocedure kan reguleren en de status van het testsysteem kan bekijken.

De userinterface moet voldoen aan de volgende specificaties:

**SPEC 3.1:** Bij het indrukken van de startknop wordt er een startsignaal (hoog signaal, 3.3V) doorgegeven om de testprocedure te starten.

**SPEC 3.2:** Bij het indrukken van de pauzeerknop wordt er een pauzeersignaal (hoog signaal, 3.3V) doorgegeven om de testprocedure te pauzeren.

**SPEC 3.3:** Bij het indrukken van de stopknop wordt er een stopsignaal (hoog signaal, 3.3V) doorgegeven om de testprocedure te stoppen.

**SPEC 3.4:** De drukknop levert geen denderend signaal bij het indrukken van de knop.

**SPEC 3.5:** De RGB-led kan een blauw licht uitzenden (gereed).

**SPEC 3.6:** De RGB-led kan een groen licht uitzenden (testprocedure gestart).

**SPEC 3.7:** De RGB-led kan een groen knipperend licht uitzenden (testprocedure gepauzeerd).

**SPEC 3.8:** De RGB-led kan een rood licht uitzenden (testprocedure klaar).

In de volgende paragrafen worden de componentkeuzes, inclusief het hardwareontwerp met schema's van schakelingen, beschreven die voldoen aan de specificaties.

### 1.6.1 RGB LED

De afstudeerde heeft ervoor gekozen om de RGB LED direct aan te sturen met de microcontroller, zonder gebruik te maken van transistors of FET's. Dit bespaart de aanschaf van externe componenten, ontwerptijd en ruimte op de PCB. Het is belangrijk om rekening te houden met de maximale stroom en spanning die een microcontroller I/O pin kan leveren (25 mA, 3.3V) [8]. Op basis van de beperkingen van de microcontroller moet de RGB-LED voldoen aan de volgende eisen:

- De forward voltage moet kleiner zijn dan 3.3V.
- De forward current moet kleiner zijn dan 25mA.

Hieronder zij twee mogelijke RGB LED's met elkaar vergeleken:

Part number	Forward current (mA)	Forward voltage (V)	Prijs (€)	SMD/Through hole
1. ASMT-YTD7-0AA02	R = 20 G = 20 B = 20	R= 2.1 G= 3.1 B= 3.1	1	SMD
2. MP008267	R = 20 G = 20 B = 20	R= 2 G= 3 B= 3	1.48	TH

#### 1.6.1.1 Componentkeuze

De afstudeerde heeft gekozen voor **component nummer 1, de ASMT-YTD7-0AA02**, omdat deze in SMD-formaat is en daardoor kleiner is en ruimte bespaart op de PCB. Dit formaat is gemakkelijker te solderen en goedkoper in aanschaf en assemblage. Bovendien is deze RGB LED ook goedkoper in vergelijking met component nummer 2.

### 1.6.1.2 Schakeling

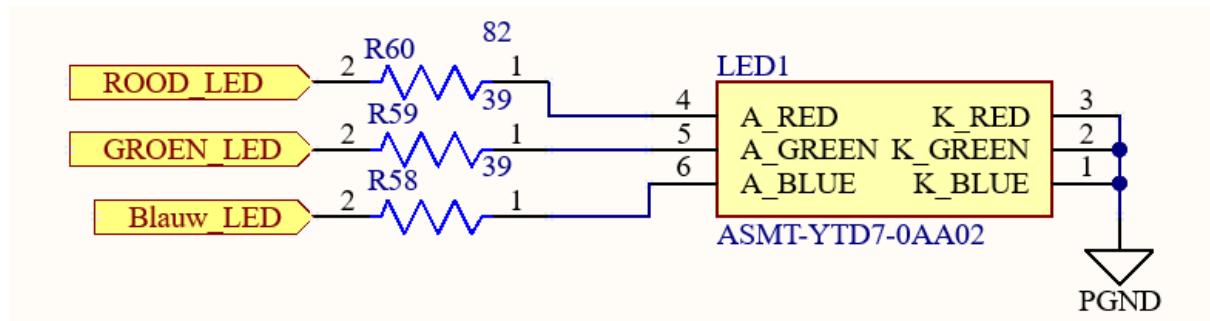
In figuur 12 is de schakeling van de RGB LED te zien. De weerstandswaarden zijn berekend op basis van de forward current (20 mA) en de minimum forward voltage zoals beschreven in de datasheet. Dit is gedaan om te voorkomen dat de maximale stroom van 25 mA wordt overschreden (Broadcom, 2023)[13].

De weerstanden voor de groene en blauwe LED's zijn als volgt berekend

$$RG, B = \frac{U}{I} = \frac{(3.3-2.6)}{0.02} = 35 \text{ Ohm} \quad (\text{weerstandswaarde groene en blauwe led}).$$

Dezelfde methode is toegepast voor de rode LED. De dichtstbijzijnde weerstandswaarden die op voorraad zijn, zijn uiteindelijk in de schakeling gebruikt.

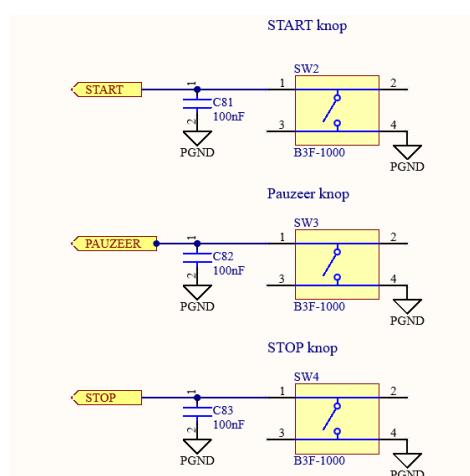
De weerstanden moeten respectievelijk 16 mW en 33 mW kunnen verdragen, berekend op basis van de vermogensformule. Daarom kiest de afstudeerde ervoor om SMD 0603-weerstanden te gebruiken met een vermogen van 100 mW. Deze weerstanden zijn klein van formaat maar toch gemakkelijk te solderen. Bovendien biedt de extra veiligheidsmarge in het vermogen extra betrouwbaarheid voor het systeem.



Figuur 12, schakeling van de RGB-LED

### 1.6.2 Bedieningspaneel

Voor het bedieningspaneel zijn drie drukknoppen nodig, waarvoor de afstudeerde heeft gekozen voor de drukknop B3F-1000. Deze drukknop is kostenefficiënt en wordt ook binnen Stedin op voorraad gehouden. Om te voldoen aan **SPEC 3.4**, waarbij de drukknop geen denderend signaal mag genereren bij het indrukken, is een condensator van 100nF toegevoegd, zoals te zien is in Figuur 13 voor de schakeling van het bedieningspaneel.



Figuur 13, schakeling van de B3F-1000 drukknop

## 1.7 Eerste ontwerp DAC

Een van de belangrijkste deelsystemen van het testsysteem is de DAC (Digital-to-Analog Converter). Dit deelsysteem is uiteindelijk verantwoordelijk voor het genereren van het gewenste simulatiesignaal. Het is dus belangrijk om een goed functionerende DAC-chip te kiezen die het gewenste simulatiesignaal nauwkeurig kan produceren. Uit het architectuurontwerp zijn de volgende specificaties opgesteld voor het DAC-deelsysteem.

- De DAC heeft een resolutie van 24 bits of hoger (**SPEC 1.1**).
- De DAC moet minimaal 3 verschillende signalen te gelijk kunnen genereren (**SPEC 1.2**).
- De DAC moet een samplefrequentie hebben van minimaal het dubbele van de maximale frequentiecomponent (1300 Hz) (**SPEC 1.4**).
- De DAC moet in staat zijn om zowel positieve als negatieve signalen te genereren. (**SPEC 1.5**)
- De DAC communiceert via het SPI-protocol (ontwerpbesluit).

De afstudeerde heeft de volgende DAC-chips gevonden die voldoen aan de bovengenoemde specs:

Part Number	Resolutie	DAC-kanalen	Vref	SNR	Sample rate (kHz)	Manufacturer	Prijs (€)
1. CS4385-CQZ	24	8	5	114	192	Cirrus Logic	9,64
2.PCM4104 PFBR	24	4	5	118	216	Texas Instruments	5,05
3.PCM1690 DCAR	24	8	8	113	192	Texas Instruments	5,57
4. AD1934WB STZ-RL	24	8	1.5	108	192	Analog Devices	9,72

Vervolgens is er ook gekeken naar de voorraad van deze componenten bij geautoriseerde en betrouwbare leveranciers zoals Farnell, Digi-Key en Mouser. De som van alle voorraden van deze verschillende leveranciers vormt de marktbeschikbaarheid. Ook is er gekeken naar de productstatus.

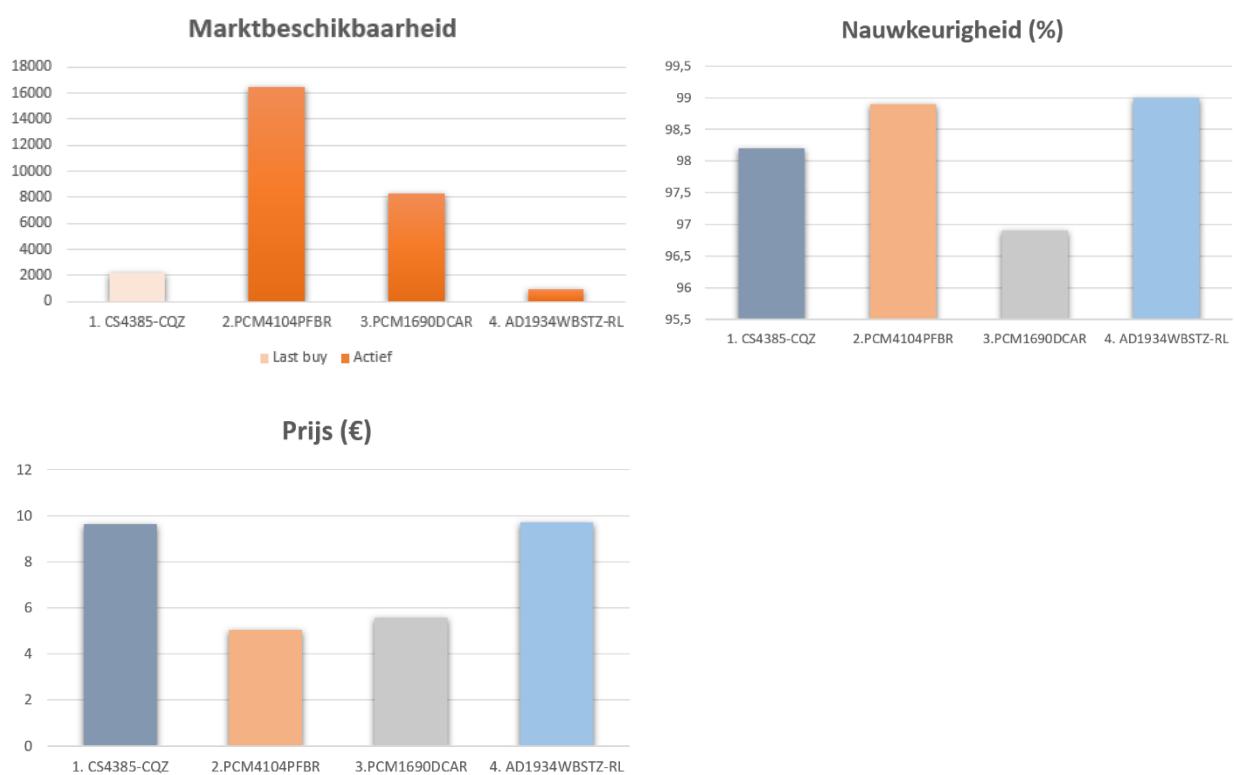
Part Number	Marktbeschikbaarheid	productstatus
1. CS4385-CQZ	2150	Last buy (levering zal worden stopgezet door fabrikant)
2.PCM4104P FBR	16460	Actief
3.PCM1690 DCAR	8250	Actief
4. AD1934WBS TZ-RL	998	Actief

Tabel 3, Marktbeschikbaarheid en productstatus van de verschillende componenten

Er zijn ook afwegingsgrafieken gemaakt op basis van alle data. In de grafieken (Figuur 14) zie je de marktbeschikbaarheid, de nauwkeurigheid en de prijs per eenheid. De nauwkeurigheid is als volgt door de afstudeerde berekend met de volgende formules:

$$\text{Nauwkeurigheid} = 100 - \left( \frac{\text{Effectieve Spanningsstapgrootte}}{\text{minimale gewenste simulatie signaal}} \times 100 \right)$$

- De effectieve spanningsstapgrootte van een DAC geeft de kleinste verandering in uitgangsspanning aan die de DAC kan produceren en kan worden berekend met de volgende formule:  $\text{Effectieve Spanningsstapgrootte} = \frac{V_{ref}}{2^{\text{ENOB}}}$ . Hierbij is ENOB het Effectief Aantal Bits, dat kan worden berekend met de volgende formule:  $\text{ENOB} = \frac{\text{SNR}-1.76}{6.02}$ . (Resolution Vs. ENOB | Analog Devices, n.d.)[14].
- Het minimale gewenste simulatie signaal is volgens REQ-2.2[CH] en de conclusie van het onderzoek  $\frac{5}{10000} \times \sqrt{2}(\text{peak})$



Figuur 14,toont afwegingsgrafieken van de nauwkeurigheid, marktbeschikbaarheid en de prijs per eenheid.

### 1.7.1 Component keuze

Op basis van de afwegingsgrafieken en verzamelde data is besloten niet te kiezen voor component nummer 1 en 3. Component 1 is relatief duur en heeft een 'last buy' productstatus met een lagere nauwkeurigheid vergeleken met andere DAC-chips. Component 3 biedt de laagste prestatie qua nauwkeurigheid en is om die reden afgevallen. Uiteindelijk bleven component 2 en 4 over, waarbij de keuze viel op de **AD1934WBSTZ-RL, component nummer 4**. Deze DAC-chip heeft met 99 % de hoogste nauwkeurigheid, wat cruciaal is gezien de maximale toegestane afwijking van 1% volgens REQ-3.3[CH]. Bovendien biedt deze chip meer DAC-kanalen dan component 2, wat eventueel voor in de toekomst van belang kan zijn als er meer dan drie verschillende signalen gegenereerd moeten worden. Hoewel component 4 bijna tweemaal zo duur is als component 2, heeft het als voordeel dat het op een 3,3V voeding werkt, in tegenstelling tot de 5V die nodig is voor component 2. Hierdoor is geen extra

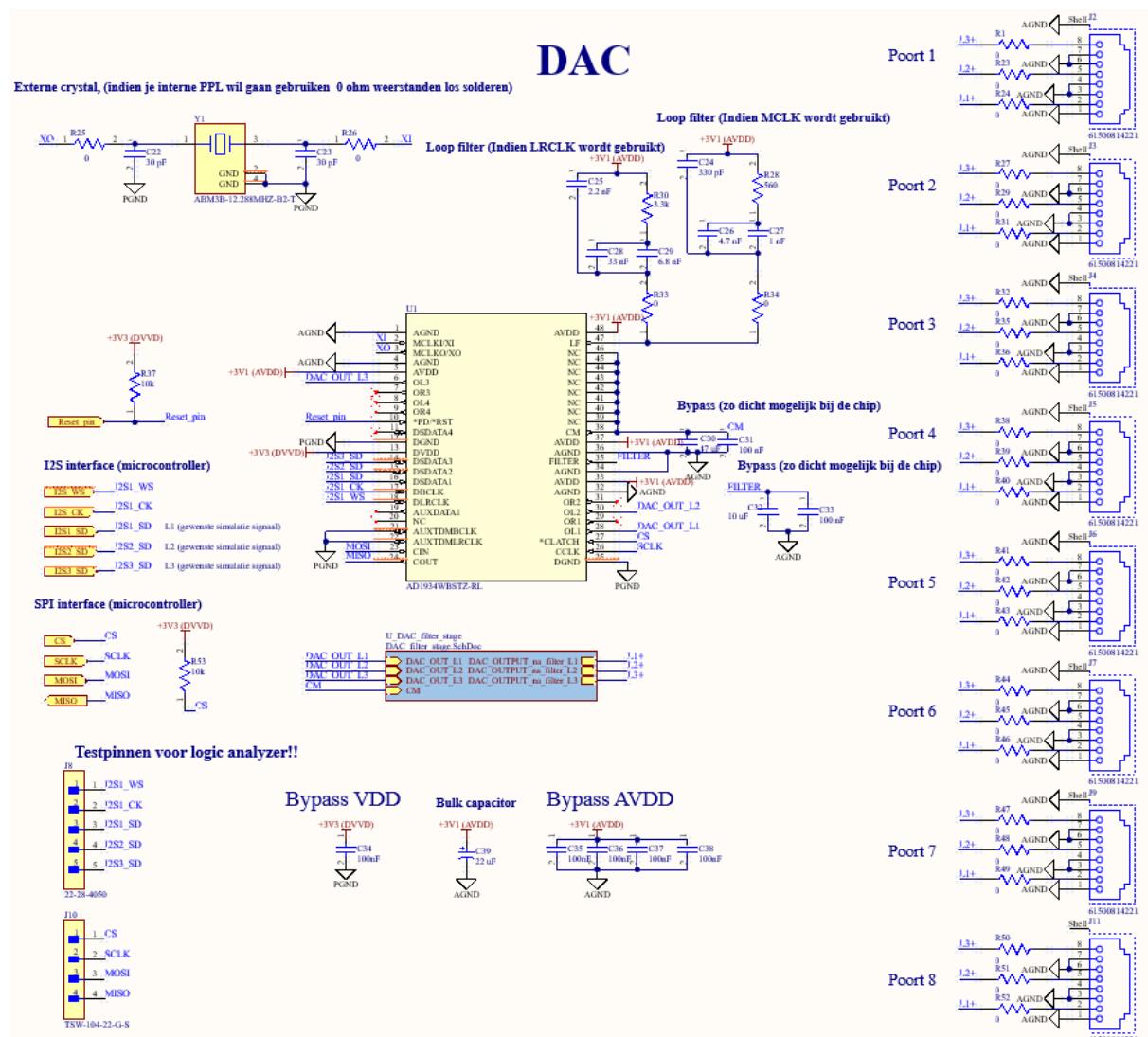
voedingscircuit nodig, wat ontwerptijd bespaart. Gezien de testopstelling niet in productie gaat, is het prijsverschil van vier euro minder significant.

### 1.7.2 Hardware ontwerp

In deze paragraaf wordt het hardware ontwerp van het deelsysteem verder in detail besproken, inclusief de schakelingen en simulaties. Het DAC-deelsysteem bestaat uit de DAC-chip, een filteringsfase en een duplicatiefase.

#### 1.7.2.1 DAC

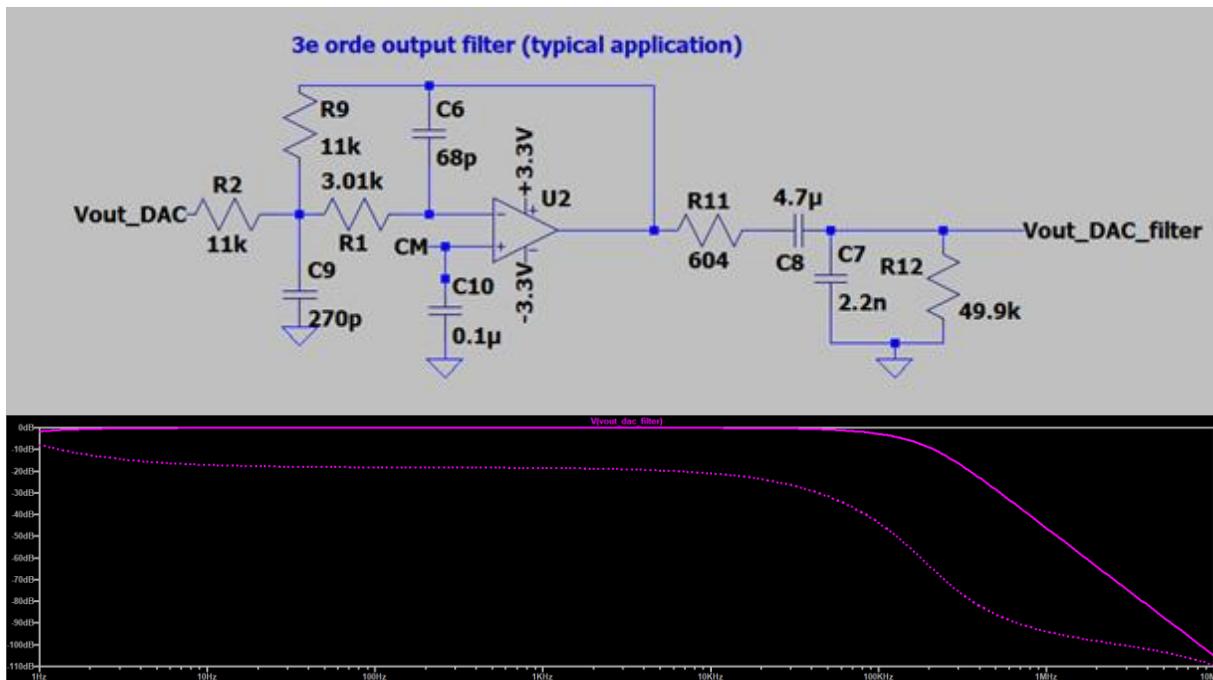
Figuur 15 toont de aanbevolen schakeling van de DAC volgens de datasheet. Testpinnen zijn toegevoegd op de I2S- en SPI-datalijnen. Er is ook een externe kristaloscillator en een extra loopfilter met 0-ohm weerstanden toegevoegd. Hierdoor kan de afstudeerde kiezen tussen de LRCLK (interne klok)- of MCLK-klok (externe klok). (AD1934 Datasheet en Productinformatie | Analog Devices, z.d.)(15).



Figuur 15, Schema van DAC-deelsysteem

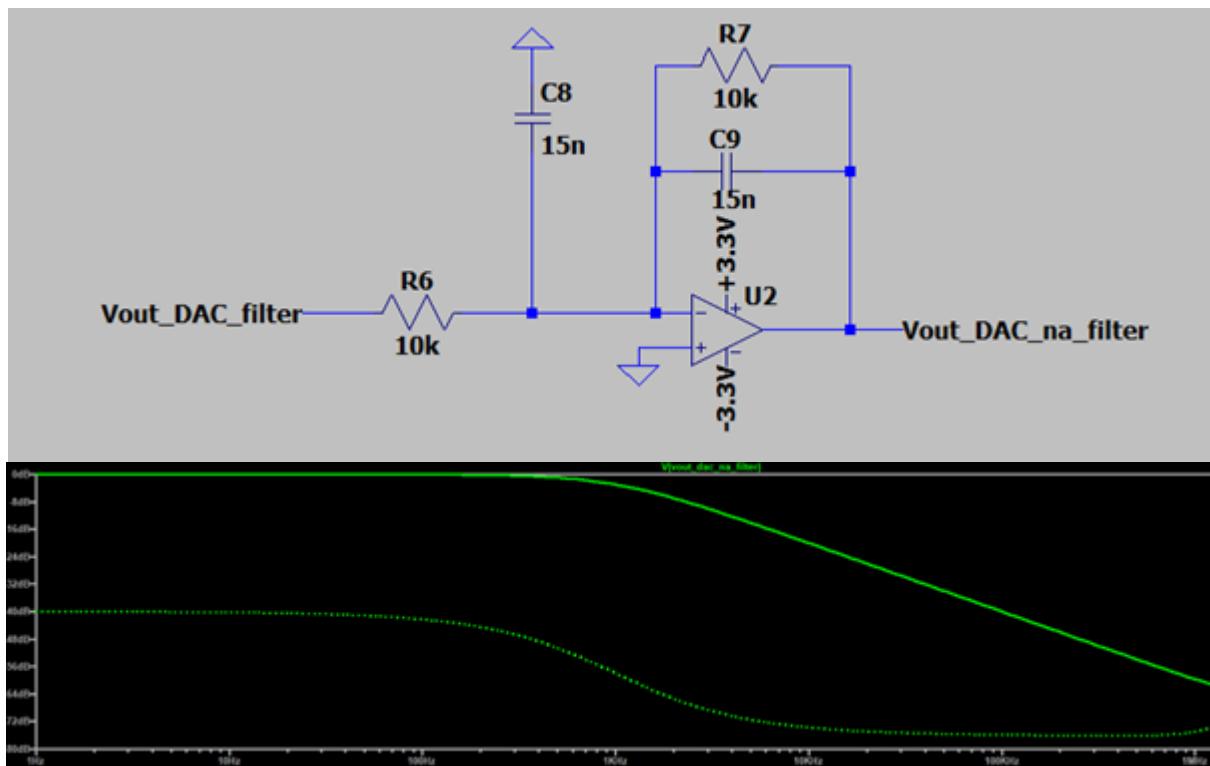
### 1.7.2.2 Filtering stage

Om een zuiver signaal te genereren, is het belangrijk om bij de uitgangen van de DAC-kanalen een filter toe te voegen. Figuur 16 toont de schakeling en simulatie van een 3e-orde inverterende uitgangsfilter, zoals aanbevolen in de datasheet van de AD1934 [15]. Dit filter heeft een afsnijfrequentie van 100 kHz en filtert hoogfrequente ruis om een zuiver signaal te verkrijgen. Daarnaast wordt de offset van 1.5V naar 0V gebracht door de output pin CM van de DAC-chip aan de niet-inverterende ingang van het filter toe te voegen.



Figuur 16, Schakeling en simulatie van 3e orde inverting output filter met cutoff frequentie van 100 kHz[2]

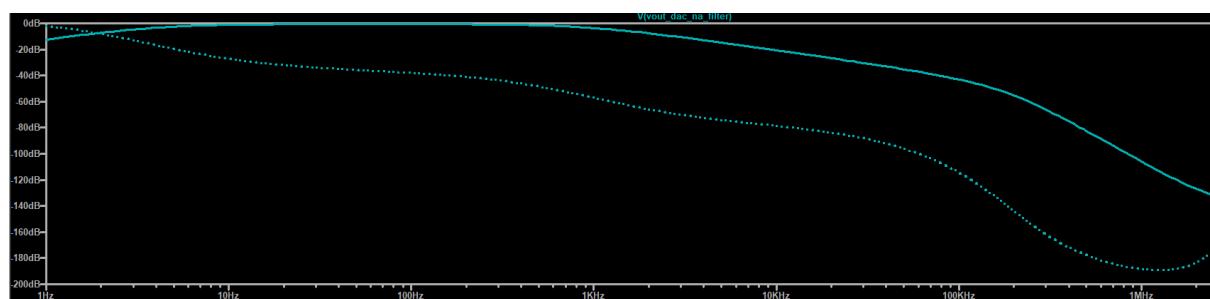
Omdat de vorige schakeling een inverterende output filter is, moet het signaal opnieuw worden geïnverteerd zodat het overeenkomt met het signaal dat uit het DAC-kanaal komt. Voor mijn specifieke toepassing, waarbij ik alleen frequenties tot 750 Hz (de 13e harmonische) gebruik en kleine signalen tussen 0.5 mVpiek en 5 mVpiek genereer, heeft de afstudeerde een extra inverterend actief laagdoorlaatfilter toegevoegd met een gewenste afsnijfrequentie van 1000 Hz om alle ruis boven 1 kHz weg te filteren en het signaal te inverteren. De componentwaarden zijn berekend met behulp van de volgende formule: 1)  $f_c = \frac{1}{2\pi \times R \times C}$ . Uit deze vergelijking volgt een condensatorwaarde van 15,9 nF. De afstudeerde heeft de dichtstbijzijnde generieke condensator die in voorraad is, van 15 nF gebruikt. Hierdoor is de afsnijfrequentie gewijzigd van 1000 Hz naar 1061 Hz, wat ook het gewenste resultaat is. De schakeling en simulatie van de extra actieve laagdoorlaatfilter is te zien in Figuur 17.



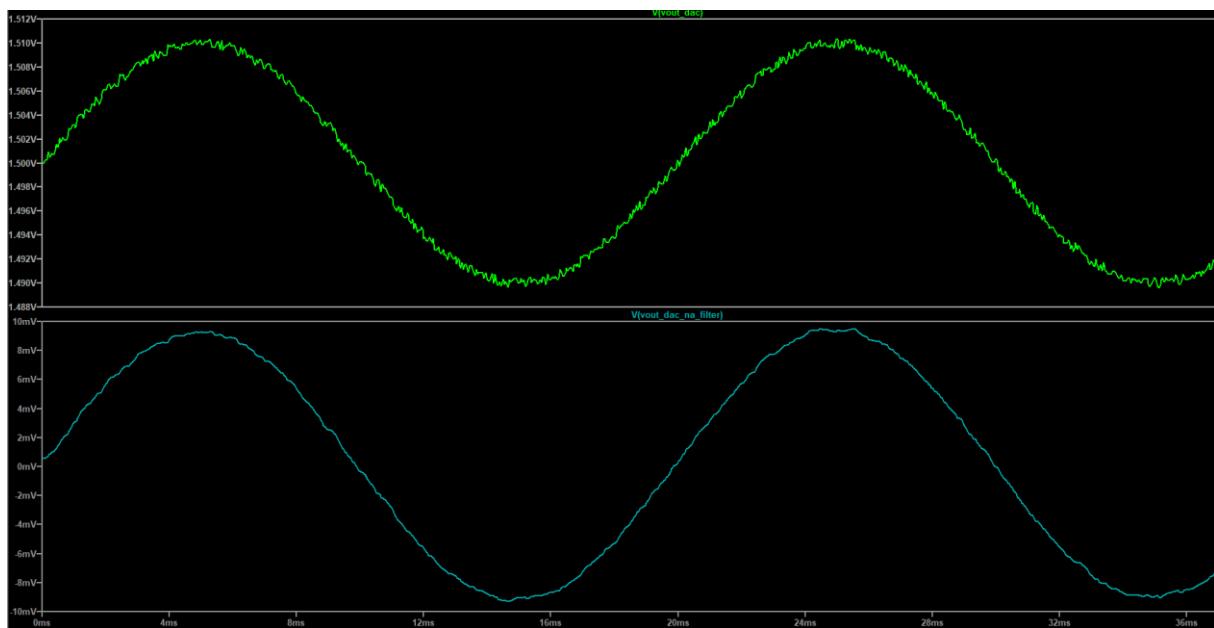
Figuur 17, Schakeling en simulatie van een inverterende actieve laagdoorlaat filter met een cutoff frequentie van 1061Hz

De afstudeerde heeft gekozen voor de OPA1652AID van Texas Instruments als opamp voor de outputfilters. Deze opamp behoort tot de categorie audioversterkers en biedt een lage ruisdichtheid van 4.5 nV/VHz bij 1 kHz, samen met een lage totale harmonische vervorming (THD) van 0.00005%. Deze eigenschappen zijn belangrijk voor onze toepassing om de signaal-ruisverhouding te maximaliseren. Bovendien is dit een vergelijkbare opamp die in de datasheet wordt aanbevolen voor de outputfilters [15].

Voor alle simulaties is gebruikgemaakt van het SPICE-model van de OPA1652AID om een realistisch beeld te krijgen van de praktische resultaten. Daarnaast is er in de simulatie witte ruis toegevoegd aan het ingangssignaal om te testen of de ruis wordt gefilterd door de DAC-outputfilters. In Figuur 18 is de totale frequentierespons van beide filters te zien. Figuur 19 toont het gesimuleerde DAC-uitgangskanaal met witte ruis vóór de DAC-outputfilter en het gefilterde signaal na de outputfilter.

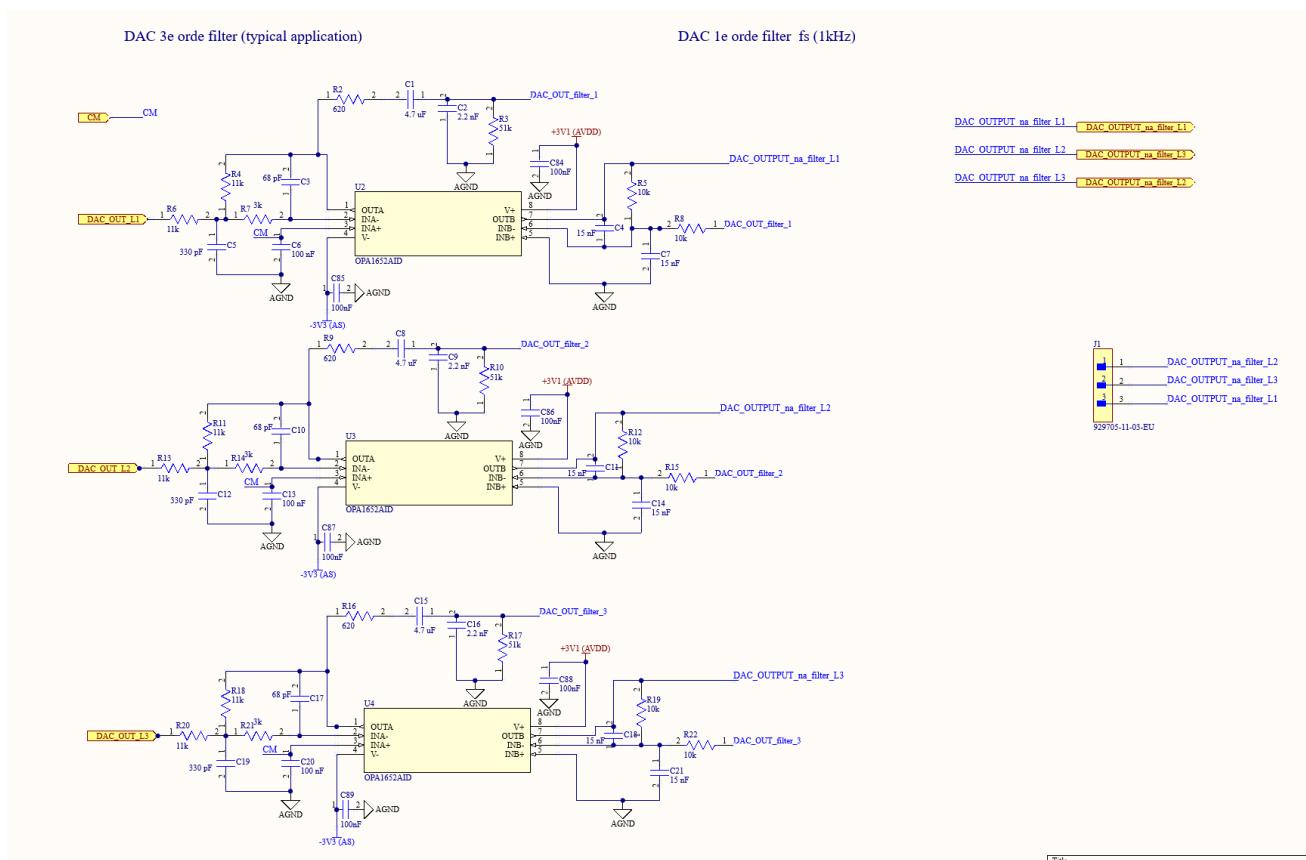


Figuur 18, frequentie respons DAC-output filters.



Figuur 19, Het gesimuleerde DAC-output signaal voor de filter (groen) en het signaal na de outputfilter (licht blauw).

In Figuur 20 het schema van het filterende gedeelte van het DAC-deelsysteem.

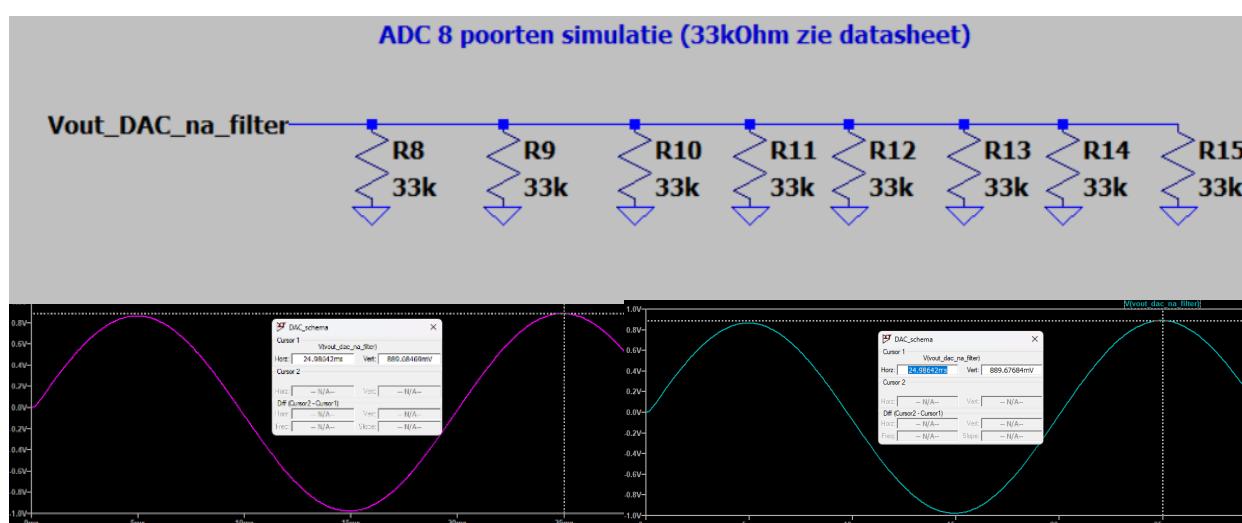


Figuur 20, schema van de filtering stage van de DAC

### 1.7.2.3 Duplicatie fase

Om te voldoen aan **SPEC-1.3**, waarbij de drie verschillende signalen elk acht keer geduplicateerd moeten worden, zal er gebruikgemaakt worden van de RS485-connector en zal dezelfde pinout gebruikt worden als die van de MEM101, zodat de MEM101 de juiste signalen meet (Mikronika, 2022) [3]. Ook zijn er 0-ohm weerstanden gebruikt, zodat je de poorten handmatig kunt selecteren en deselecteren door de 0-ohm weerstanden eraf te solderen. Deze 0-ohm weerstanden zijn ook toegevoegd om de unit goed te kunnen testen. Zie Figuur 15 voor het schema van het duplicerende gedeelte.

Er zijn ook simulaties gemaakt waarbij de ingangsimpedantie van de MEM101 is meegenomen (MCP3914, n.d.) [4]. Zo zijn er acht 33kOhm-weerstanden parallel aan elkaar gezet en is er een simulatie gemaakt waarbij het uitgangssignaal na de outputfilter is gemeten, zowel met load als zonder load. Er is geen verschil te zien in de simulatie, wat een gewenst resultaat is. Zie Figuur 21 voor de schakeling en de simulatie zonder load (lichtpaars) en met load (lichtblauw).



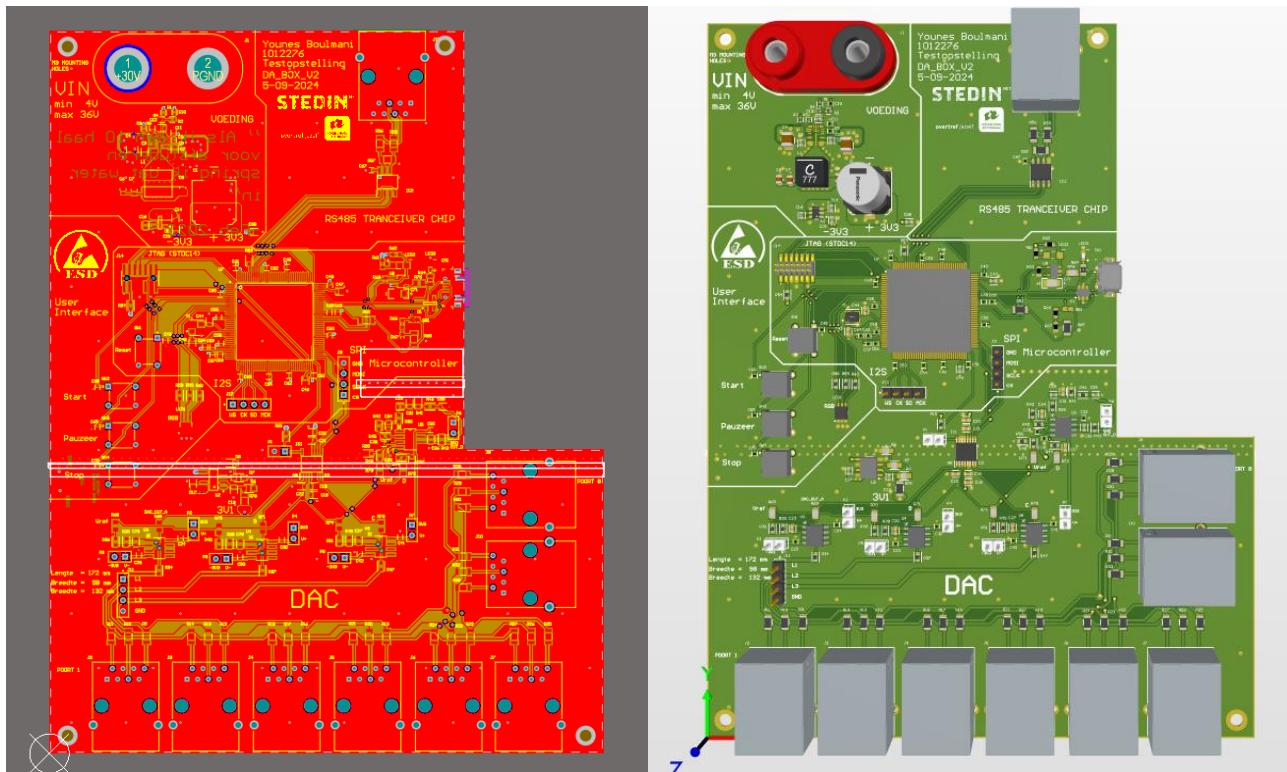
Figuur 21, De schakeling met laad. De paarse simulatie vertegenwoordigt het uitgangssignaal zonder load, terwijl het lichtblauw de simulatie met load weergeeft.

## 1.8 PCB Design

Design keuze	Onderbouwing
<b>1.</b> GND-plane onder de toplag en signaallayer (waar de analoge signalen lopen) en de dielektrische laag zo dun mogelijk maken	Door een GND-plane direct onder de toplag en signaallayer te plaatsen en de dielektrische laag dun te maken, verlaag je de parasitaire inductie en capacitive koppeling tussen lagen. Dit zorgt voor een betere afscherming van gevoelige analoge signalen tegen externe ruis en verbetert de signaalintegriteit.
<b>2.</b> Het fysiek scheiden van het analoge en digitale deel van de PCB, en het plaatsen van via's bij de scheiding	Het fysiek scheiden van de analoge en digitale delen van de PCB vermindert de kans op ruisoverspraak tussen beide. Door via's te plaatsen bij de scheiding, creëer je een solide verbinding naar de GND-plane, wat helpt om storingen verder te beperken en de signaalintegriteit te waarborgen.
<b>3.</b> Grottere clearance voor 30V net.	Door een grotere clearance in te stellen voor het 30V net volgens de IPC-2221A norm, voorkom je ongewenste effecten zoals kortsluiting. Dit zorgt voor een veiligere en betrouwbaardere PCB.
<b>4.</b> Breedte van tracks volgens IPC-2152 norm	Door de breedte van de sporen te berekenen volgens de IPC-2152 norm, zorg je ervoor dat de sporen de vereiste stroom kunnen verdragen zonder door te smelten of andere ongewenste effecten te veroorzaken.
<b>5.</b> USB-data lijnen traceren met een impedantieprofiel van 90 Ohm	Het volgen van een impedantieprofiel van 90 Ohm voor USB-data lijnen is cruciaal om te voldoen aan de USB-specificaties. Dit voorkomt signaalreflecties en waarborgt een hoge signaalintegriteit, wat essentieel is voor foutloze communicatie.
<b>5.</b> Kort houden van hoogfrequente lijnen zoals USB-data lijnen.	Hoogfrequente lijnen kort houden minimaliseert antennewerking, wat de invloed van EMI van andere hoge-frequentiesignalen vermindert. Dit verbetert de signaalintegriteit.
<b>6.</b> Continuiteit in trace breedte.	Een constante breedte van de traces voorkomt impedantie mismatches, wat cruciaal is voor het behouden van de signaalintegriteit, vooral bij hoge frequenties.
<b>7.</b> Omringing van de switch node pin van de voltage regulator met GND vias.	Het plaatsen van GND vias rondom de switch node pin vermindert EMI, wat zorgt voor een stabielere werking van de voltage regulator.
<b>8.</b> Gebruik van ground polygon op Top en Bottom laag	Het gebruik van ground polygons verlaagt de voedingsimpedantie, wat bijdraagt aan een stabielere stroomtoevoer en verminderen van ruis.

<b>9.</b> Plaatsing van vias voor GND plane dicht bij GND pinnen	Door GND vias zo dicht mogelijk bij de GND pinnen te plaatsen, zorg je ervoor dat de GND-stroom de kortste weg kan nemen. Dit vermindert inductie en verbetert de signaalintegriteit.
<b>11.</b> Volgen van datasheet PCB layout guidelines voor alle IC's	Door de PCB layout guidelines in de datasheets van de IC's te volgen, zorg je ervoor dat de componenten optimaal functioneren en voorkom je ongewenste effecten of storingen.
<b>12.</b> De datum, naam bedrijf en designer geplaatst in de Top overlay (Silkscreen).	Het toevoegen van deze informatie maakt het voor gebruikers en fabrikanten gemakkelijk om de oorsprong en productiegegevens van de PCB te traceren.
<b>13.</b> Plaatsing van mounting holes	Voor als de gebruiker de PCB ergens aan wil vastmaken

In Figuur 22 is de 2D view en 3D view van de PCB te zien.



Figuur 22, 2D en en 3D view van het testsysteem

## 1.9 Schema's

Indien de lezer alle schema's van de deelsystemen in een betere weergave wil zien, kan dit door de PDF te bekijken via de volgende link: [[Schema's.pdf](#)].

## 1.10 BOM

Als de lezer interesse heeft in de bill of materials, kan deze worden gedownload als Excel-bestand via de volgende link:[[BOM.xlsx](#)].

## 1.11 Softwaredesign

In dit hoofdstuk wordt het softwareontwerp van het testsysteem besproken. Het ontwerp kan worden opgesplitst in twee delen:

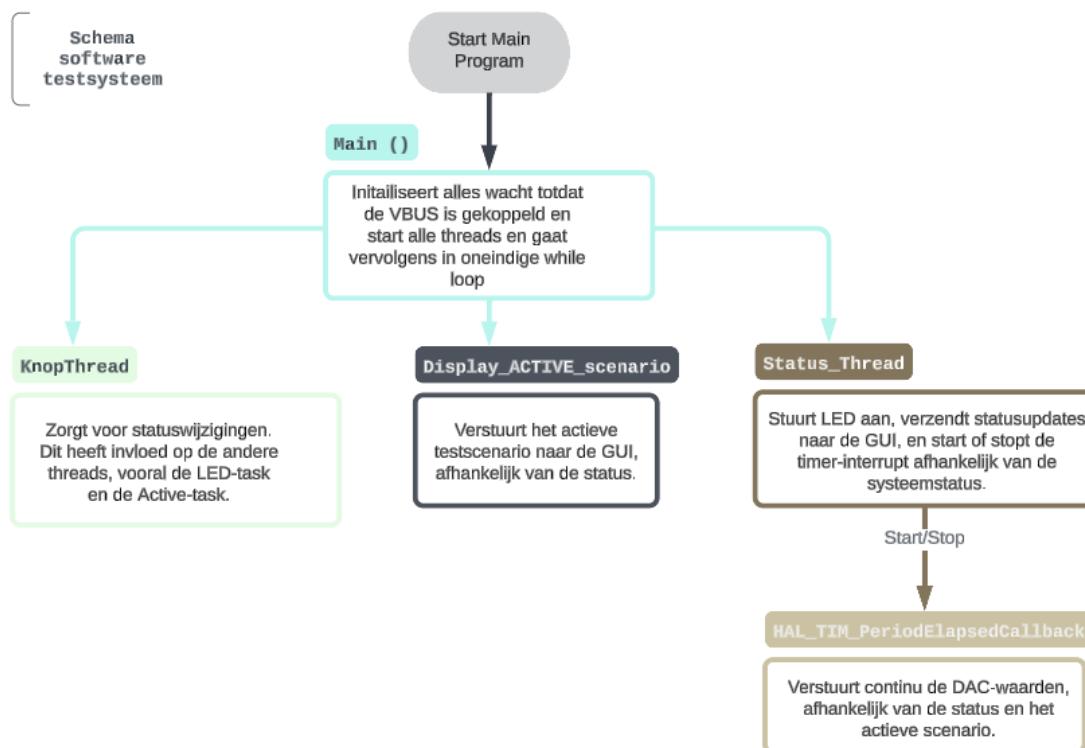
- **Embedded software** (STM32CubeIDE project): Deze code draait op de STM32 microcontroller en beheert de hardwarecomponenten zoals de DAC en de Userinterface [[LINK REPOSITORY](#)].
- **GUI software** (GUI\_Code.py): Dit Python-script draait op de PC en biedt een grafische gebruikersinterface (GUI). Hiermee kan de gebruiker verschillende testparameters instellen en de teststatus in real-time bekijken [[LINK REPOSITORY](#)].

De communicatie tussen de PC en de microcontroller verloopt via het USB-protocol.

### 1.11.1 Embedded Software

De embedded software bestaat uit meerdere threads: main (), KnopThread, Display\_active\_scenario, Status\_thread en een timer interrupt service handler. Elke thread is verantwoordelijk voor specifieke taken, zoals het aansturen van LED's, het controleren van knoppen en het verzenden van testscenario-informatie naar de GUI. De software maakt gebruik van hardwareperiferie zoals timers, SPI en USB voor communicatie en gegevensoverdracht.

Onderstaand schema toont het softwareontwerp. De flowcharts van alle threads zijn te vinden in paragraaf [{1.11.1.2}](#).



Figuur 23, Schema van het softwareontwerp

### 1.11.1.1 Belangrijke functies

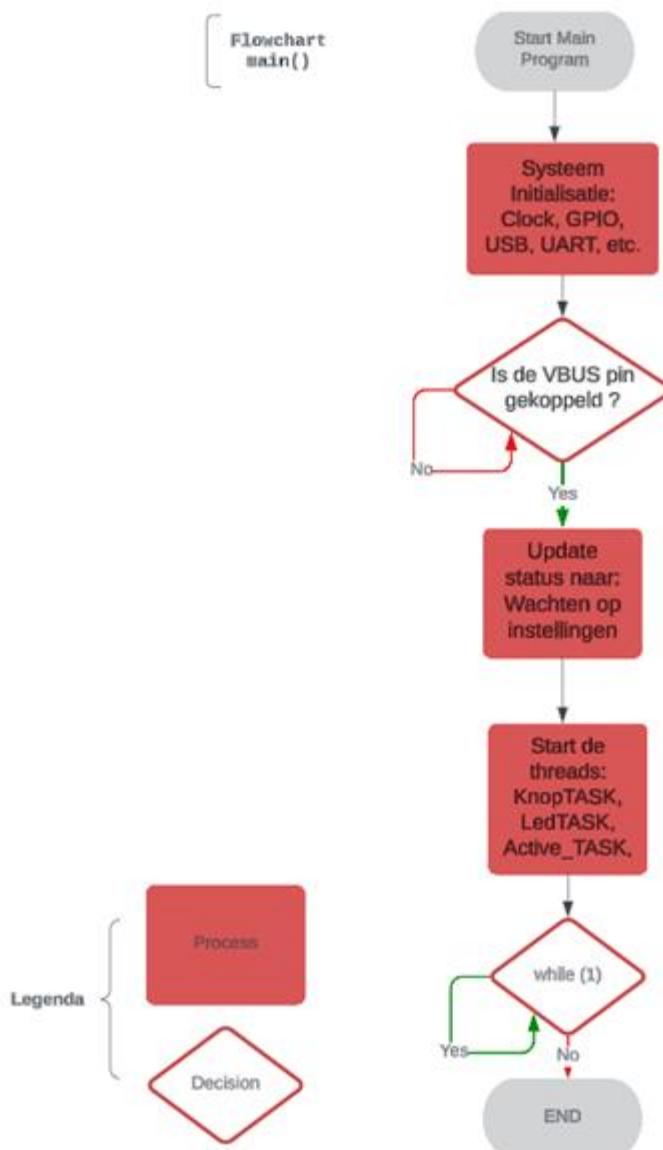
Het testsysteem maakt gebruik van verschillende kernfuncties die zorgen voor de coördinatie tussen de hardware en de communicatie met de GUI. Hieronder worden de belangrijkste functies beschreven:

- **calculate\_three\_phase\_sine\_wave\_samples()**  
Deze functie berekent de samples voor de drie-fase sinusgolf met optionele harmonische vervorming. Deze samples worden gebruikt om de DAC-waarden te genereren voor de testscenario's. De functie voegt harmonische componenten toe afhankelijk van de testinstellingen, zoals derde, vijfde, en zevende harmonischen, om vervormde sinusgolven te simuleren.
- **select\_test\_scenario()** Deze functie kiest op basis van het scenario nummer de juiste parameters voor stroom en harmonische vervorming. Vervolgens berekent de functie de nieuwe samples voor de sinusgolven. Dit stelt het systeem in staat om verschillende testscenario's met wisselende stroomwaarden en harmonische vervorming uit te voeren.
- **send\_status\_to\_gui()** Deze functie stuurt de huidige systeemstatus naar de GUI via USB. Het zorgt ervoor dat de GUI op elk moment wordt bijgewerkt met de actuele status van het testsysteem, zoals "wachten op instellingen", "gereed", "bezig", "gepauzeerd", of "voltooid".
- **DAC8564\_Write()** Deze functie schrijft de berekende DAC-waarden voor elke fase (A, B, C) naar de DAC via SPI-communicatie. Het is verantwoordelijk voor het genereren van de daadwerkelijke uitgangssignalen die worden gebruikt voor de testscenario's.
- **HAL\_TIM\_PeriodElapsedCallback()** Deze interrupt-gestuurde functie wordt periodiek aangeroepen door de timer en stuurt de gegenereerde sinusgolf-samples naar de DAC. Dit zorgt ervoor dat het systeem continu de juiste golfvormen genereert, afhankelijk van het huidige testscenario.
- **update\_status()** Deze functie past de systeemstatus aan, afhankelijk van de gebruikersinvoer of de voortgang van het testscenario. De statusverandering beïnvloedt niet alleen de hardware (zoals LED-indicatoren), maar wordt ook naar de GUI gestuurd om de gebruiker op de hoogte te houden.

### 1.11.1.2 Threads

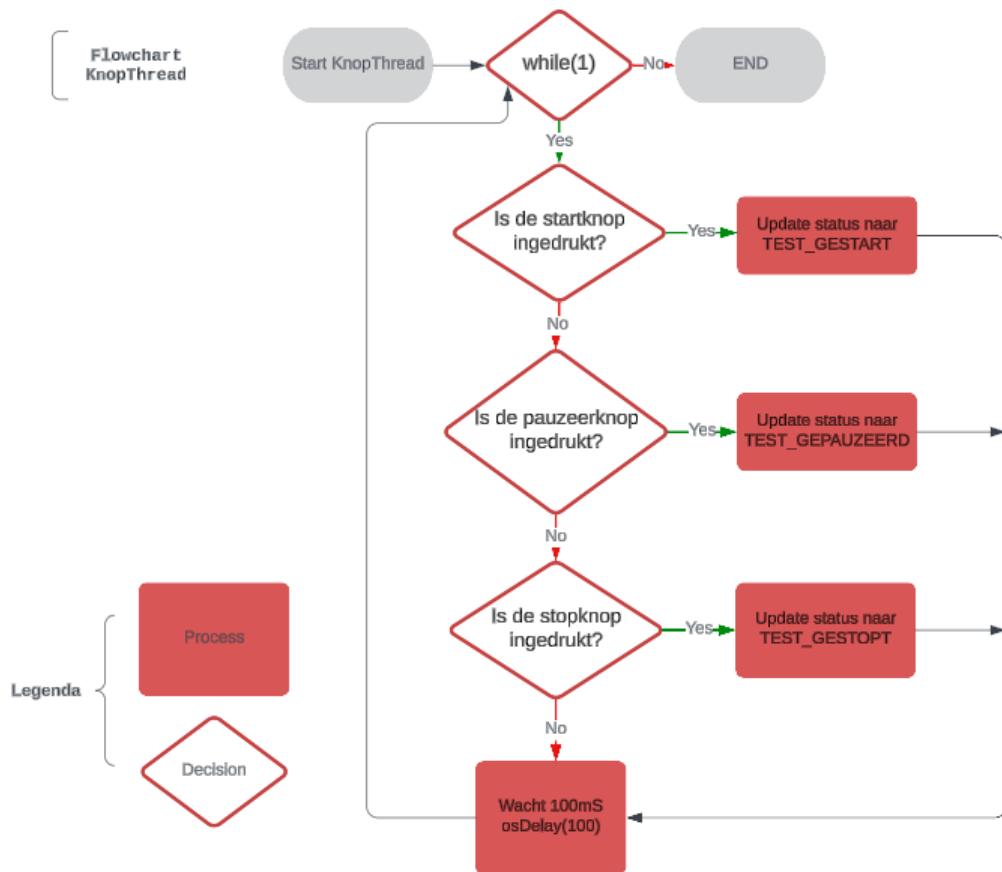
In dit hoofdstuk worden de flowcharts van alle taken weergeven.

Main thread



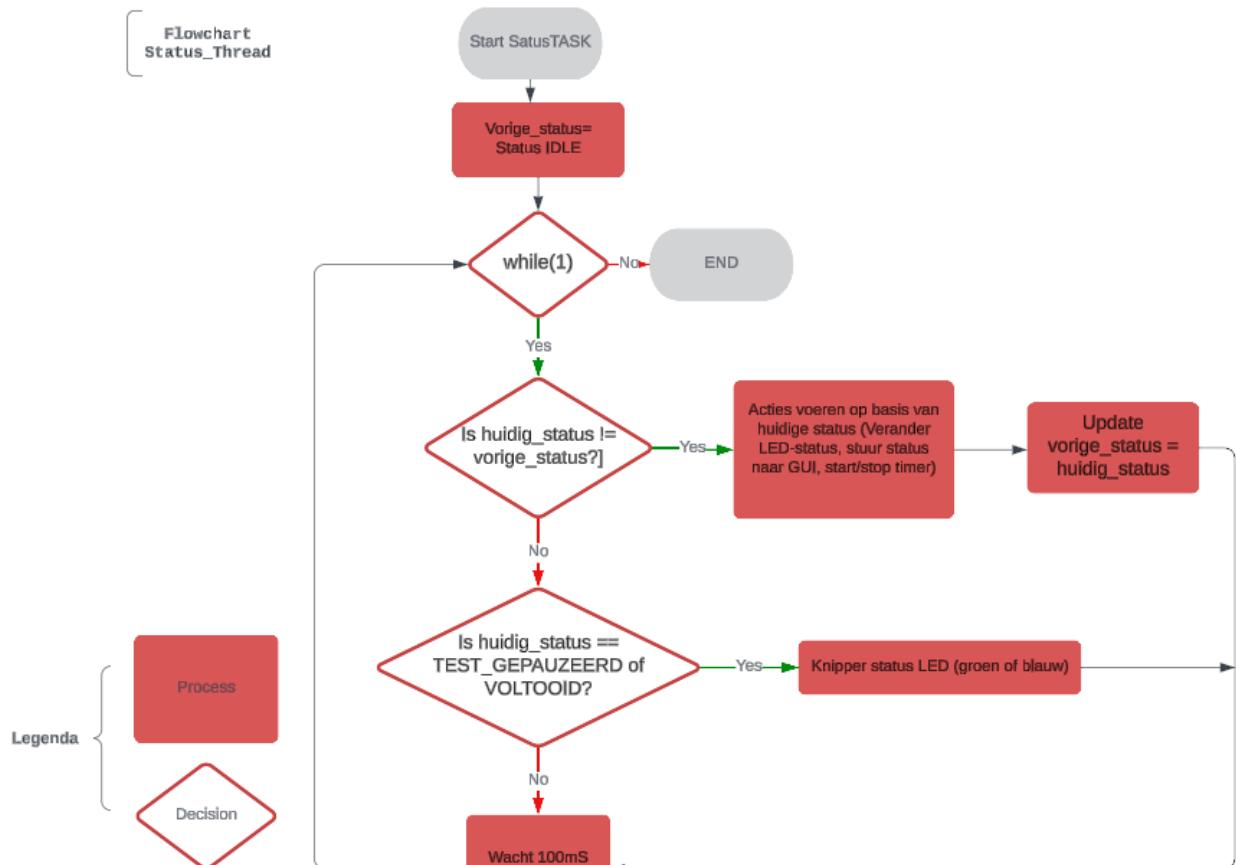
Figuur 24, Flowchart van de main() thread

## Knop thread



Figuur 25, Flowchart van de KnopThread

## Status thread

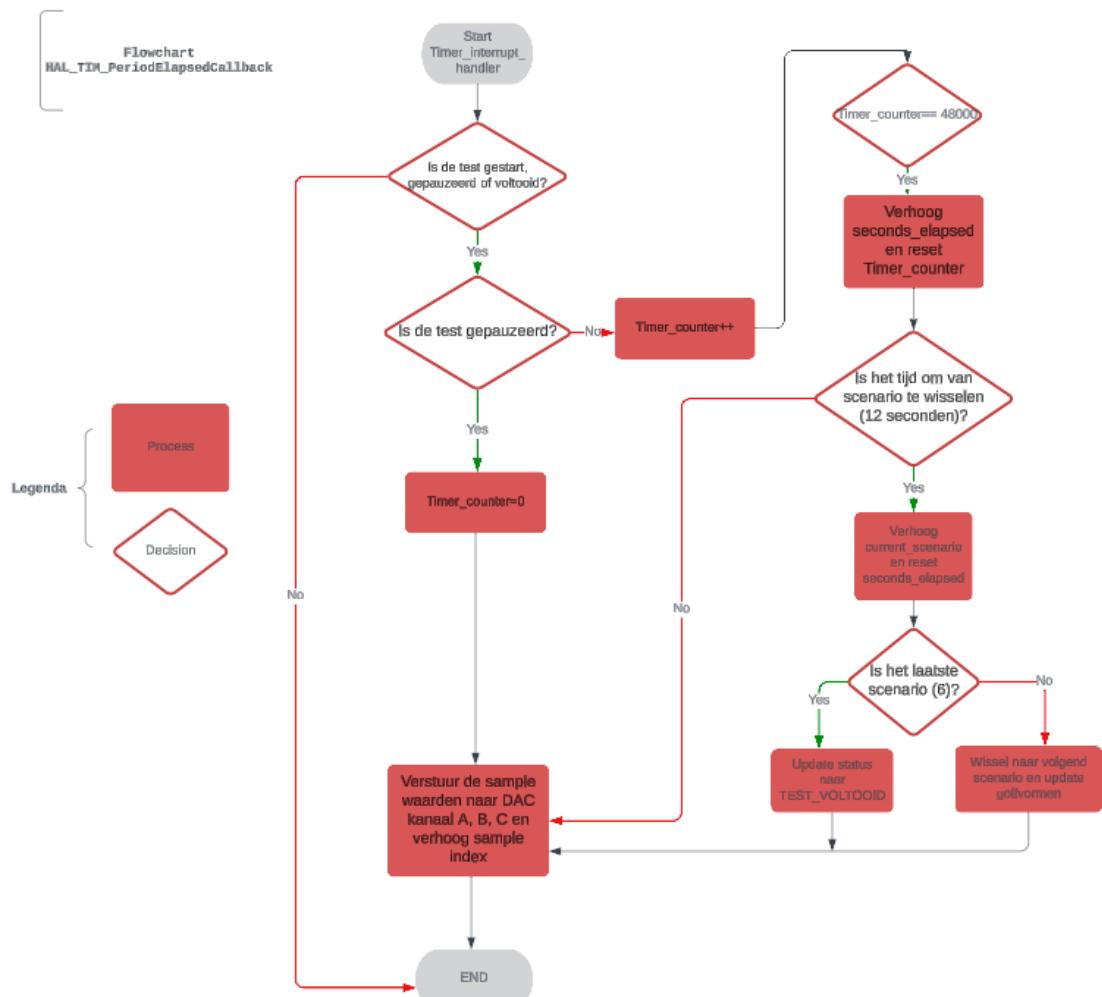


Figuur 27, Flowchart van de Display\_active\_scenario thread

## Figuur 26, Flowchart van de Status thread

Display\_active\_scenario thread

## Interrupt service handler



Figuur 28, flowchart interrupt service handler

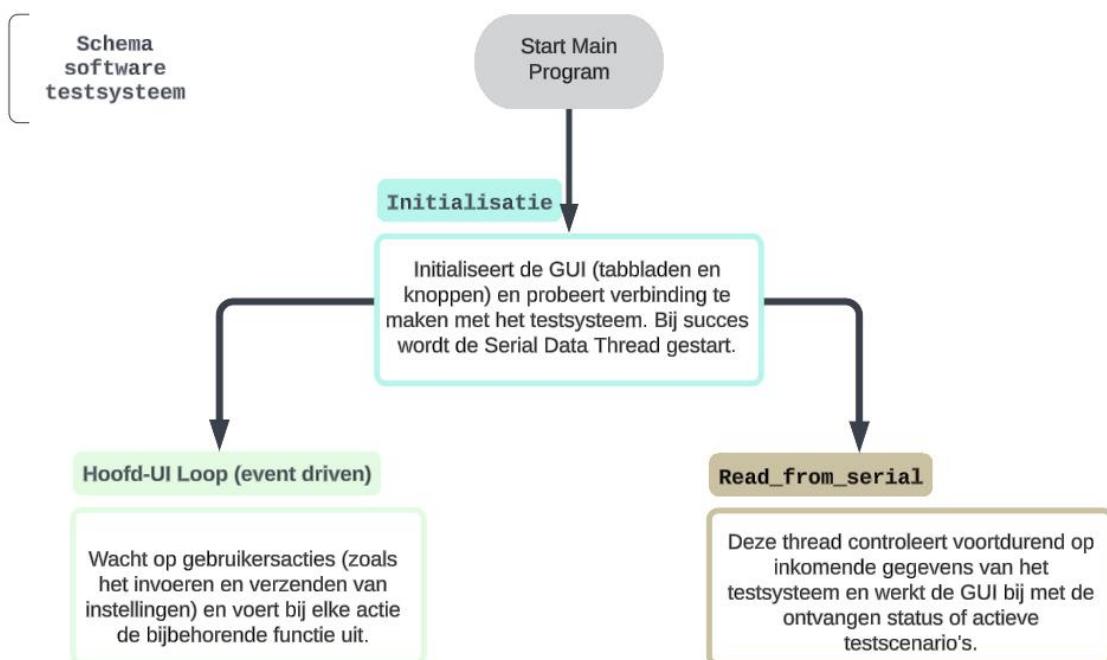
### 1.11.2 GUI software

In dit hoofdstuk wordt het ontwerp van de GUI-software voor het testsysteem besproken. Deze software is ontwikkeld in Python en biedt een grafische gebruikersinterface waarmee de gebruiker testparameters kan instellen, de voortgang van de testprocedure en de status van het testsysteem real-time kan bekijken.

De GUI-software kan worden onderverdeeld in drie hoofdcomponenten:

4. **Initialisatie:** Verantwoordelijk voor het opzetten van de GUI en het tot stand brengen van een seriële verbinding.
5. **Hoofd-UI-loop (Event-driven):** Beheert gebruikersacties en zorgt voor de juiste respons, zoals het verzenden van instellingen of het initiëren van de standaardtestprocedure.
6. **Seriële data-thread:** Voortdurende monitoring van inkomende gegevens van het testsysteem, waarmee de GUI wordt bijgewerkt met de status en het actieve testscenario.

Onderstaand schema toont het softwareontwerp van de GUI en de structuur van de hoofdcomponenten. De flowcharts van het softwareontwerp zijn te vinden in paragraaf **{1.11.2.2}**.



Figuur 29, Schema GUI software

### 1.11.2.1 Belangrijke functies

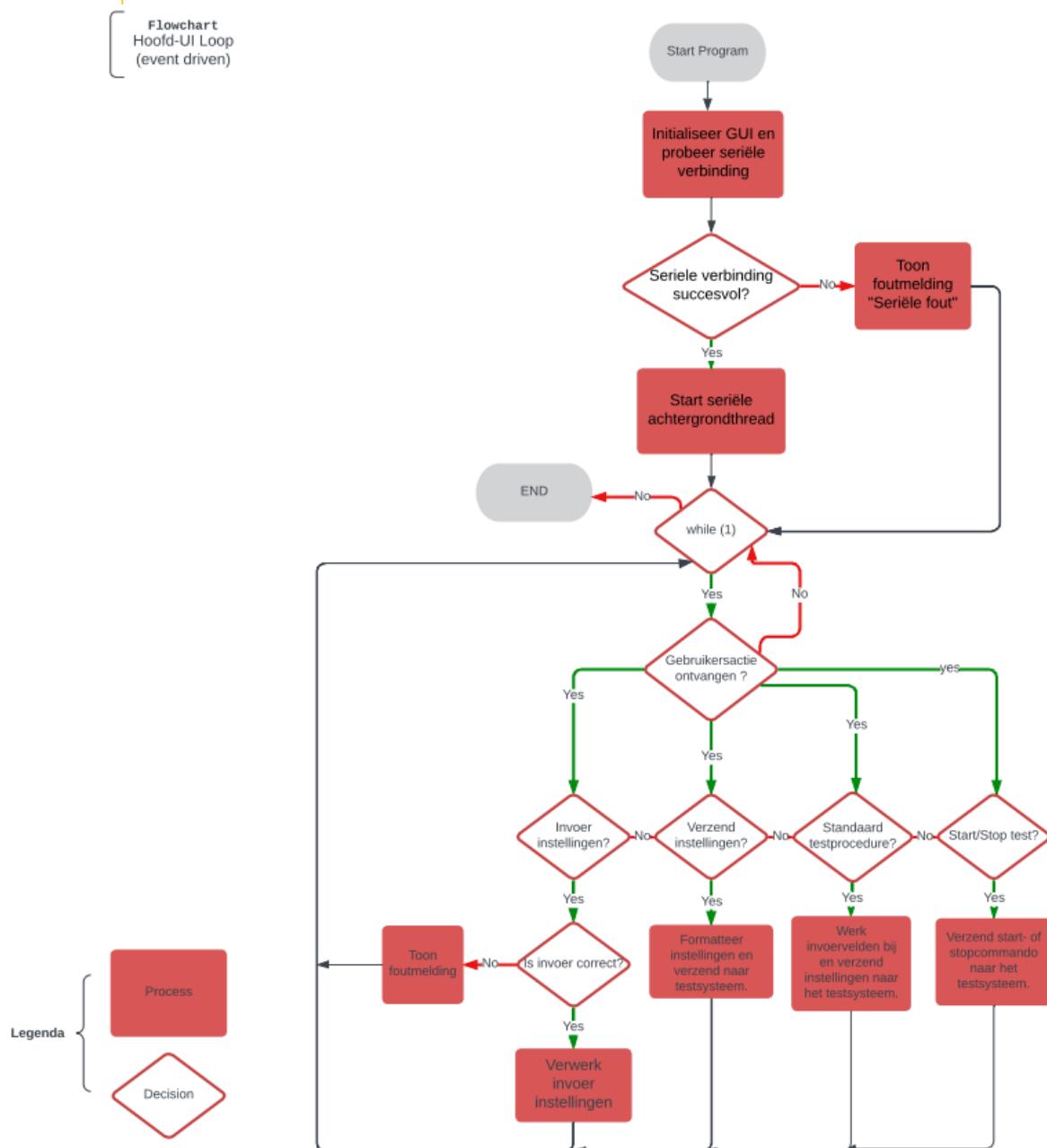
De GUI maakt gebruik van enkele kernfuncties die de interface bedienen en zorgen voor de communicatie met het testsysteem. Hieronder worden de belangrijkste functies beschreven:

- **`__init__` (Initialisatie van de GUI)**  
Deze functie initialiseert de GUI door het maken van de tabbladen en knoppen, en probeert een seriële verbinding te maken met het testsysteem. Als de verbinding succesvol is, start het de seriële data-thread. Bij een verbindingfout toont de GUI een foutmelding aan de gebruiker.
- **`send_settings()`**  
Deze functie verzamelt alle invoerinstellingen van de gebruiker en zet deze om in het juiste dataformaat. Vervolgens verzendt het deze data via de seriële verbinding naar het testsysteem om de testconfiguratie te initiëren.
- **`validate_input()`**  
Controleert of de ingevoerde waarden binnen de toegestane bereik- en formaatvereisten vallen. Voor stroominstellingen is dit bijvoorbeeld een bereik tussen 5 en 500 Ampère, met maximaal drie decimalen. Bij foutieve invoer wordt een foutmelding getoond.
- **`run_standard_test()`**  
Voert automatisch de standaard testinstellingen in en verzendt deze naar het testsysteem. Het stelt de standaardwaarden voor zowel stroom als harmonische vervorming in voor alle drie de THD-scenario's.
- **`update_status()`**  
Ontvangt statusupdates van het testsysteem en past deze toe in de GUI. Het toont de actuele status zoals "Wachten op instellingen", "Gereed", "Bezig met testprocedure", "Gepauzeerd", of "Voltooid" en kleurt de statusbalk overeenkomstig.
- **`update_active_scenario()`**  
Ontvangt het actieve testscenario van het testsysteem en werkt het scenario-label in de GUI bij om de gebruiker te informeren welk scenario momenteel actief is.
- **`read_from_serial()`**  
Deze functie leest continu de inkomende gegevens van het testsysteem. Afhankelijk van de ontvangen data werkt het de status of het actieve testscenario bij in de GUI.

### 1.11.2.2 Threads

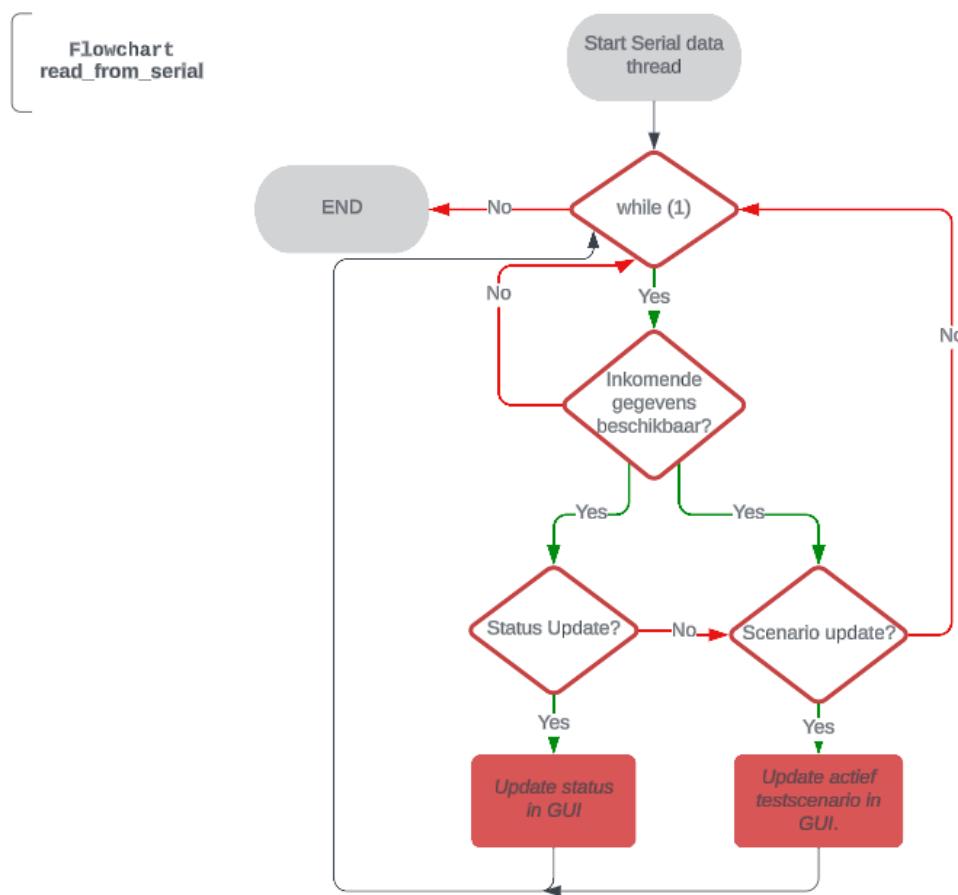
In dit hoofdstuk worden de flowcharts van de belangrijkste taken weergegeven: de hoofd-UI-loop en de seriële data-thread.

#### Hoofd-UI-loop



Figuur 30, Flowchart van de initialisatie en de hoofdtaak van de UI-loop.

## Seriële data-thread

Figuur 31, De flowchart van de `read_from_serial` taak.

## 1.12 Bibliografie

1. Texas Instruments. (2011). 16-Bit, Quad Channel, Ultra-Low glitch, voltage output DIGITAL-TO-ANALOG CONVERTER with 2.5V, 2ppm/°C internal reference (Versie SBAS403D, REVISED) [Technical report; DAC8564]. [https://www.ti.com/lit/ds/symlink/dac8564.pdf?ts=1729502317541&ref\\_url=https%253A%252F%252Fwww.google.com%252F](https://www.ti.com/lit/ds/symlink/dac8564.pdf?ts=1729502317541&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.google.com%252F)
2. Texas Instruments. (2008). DAC8564/65 evaluation Module [User Manual; DAC8564/65 evaluation Module]. In User's Guide. [https://www.ti.com/lit/ug/slau252/slau252.pdf?ts=1729422689979&ref\\_url=https%253A%252F%252Fwww.ti.com%252Ftool%252FDAC8564EVM](https://www.ti.com/lit/ug/slau252/slau252.pdf?ts=1729422689979&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.ti.com%252Ftool%252FDAC8564EVM)
3. Mikronika. (2022). MEM-101 MULTI ENERGY MEASUREMENT UNIT [Dataset]. In USER MANUAL (Versie V3). <https://www.mikronika.pl/en/offer/products/devices/control-measuring-automation/>
4. MCP3914. (n.d.). Microchip Technology. <https://www.microchip.com/en-us/product/mcp3914>
5. STMicroelectronics. (2024). Introduction to USB hardware and PCB guidelines using STM32 MCUs [Application note]. In AN4879 (Rev 7, Rev 7, pp. 1–29). [https://www.st.com/resource/en/application\\_note/an4879-introduction-to-usb-hardware-and-PCb-guidelines-using-stm32-mcus-stmicroelectronics.pdf](https://www.st.com/resource/en/application_note/an4879-introduction-to-usb-hardware-and-PCb-guidelines-using-stm32-mcus-stmicroelectronics.pdf)
6. STMicroelectronics. (2022). ESD protection of STM32 MCUs and MPUs [Dataset]. In AN5612 (Rev 1, pp. 2–34). [https://www.st.com/resource/en/application\\_note/an5612-esd-protection-of-stm32-mcus-and-mpus-stmicroelectronics.pdf](https://www.st.com/resource/en/application_note/an5612-esd-protection-of-stm32-mcus-and-mpus-stmicroelectronics.pdf)
7. STMicroelectronics. (2023). STLINK-V3SET debugger/Programmer for STM8 and STM32 [Manual]. In UM2448 User manual (Rev 8). [https://www.st.com/resource/en/user\\_manual/um2448-stlinkv3set-debuggerprogrammer-for-stm8-and-stm32-stmicroelectronics.pdf](https://www.st.com/resource/en/user_manual/um2448-stlinkv3set-debuggerprogrammer-for-stm8-and-stm32-stmicroelectronics.pdf)
8. STMicroelectronics. (2021). STM32F446XC/E Datasheet (Rev 10) [Datasheet]. <https://nl.mouser.com/datasheet/2/389/stm32f446mc-1760997.pdf>
9. Monolithic Power Systems. (z.d.). Voltage Regulator Types and working Principle. Geraadpleegd op 29 mei 2024, van <https://www.monolithicpower.com/en/voltage-regulator-types>
10. Texas Instruments Incorporated. (2015). LM2776 Switched Capacitor Inverter (B) [Technical documentation]. Texas Instruments. [https://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm2776.pdf?HQS=dis-dk-null-digikeymode-dsf-pf-null-wwe&ts=1717010776379&ref\\_url=https%253A%252F%252Fwww.ti.com%252Fgeneral%252Fdocs%252Fsuppproductinfo.tsp%253FdstoreId%253D10%2526gotoUrl%253Dhttps%253A%252F%252Fwww.ti.com%252Flit%252Fgpn%252Flm2776](https://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm2776.pdf?HQS=dis-dk-null-digikeymode-dsf-pf-null-wwe&ts=1717010776379&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.ti.com%252Fgeneral%252Fdocs%252Fsuppproductinfo.tsp%253FdstoreId%253D10%2526gotoUrl%253Dhttps%253A%252F%252Fwww.ti.com%252Flit%252Fgpn%252Flm2776)
11. Analog Devices. (2021). LT3021/LT3021-1.2/LT3021-1.5/LT3021-1.8 [Dataset]. In 500mA, Low Voltage, Very Low Dropout Linear Regulator (Rev D, Rev.D). [https://nl.mouser.com/datasheet/2/609/LT3021\\_3021\\_1\\_2\\_3021\\_1\\_5\\_3021\\_1\\_8-1504118.pdf](https://nl.mouser.com/datasheet/2/609/LT3021_3021_1_2_3021_1_5_3021_1_8-1504118.pdf)
12. Texas Instruments Incorporated. (2020). LM62460, LM61480, and LM61495 Pin-Compatible 6-A/8-A/10-A Buck converter optimized for power density and low EMI (Rev A) [Dataset]. Texas Instruments. [https://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm61480.pdf?ts=1717079629990&ref\\_url=https%253A%252F%252Fnl.mouser.com%252F](https://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm61480.pdf?ts=1717079629990&ref_url=https%253A%252F%252Fnl.mouser.com%252F)
13. Broadcom. (2023). ASMT-YTD7-0AA02 Data Sheet Tricolor PLCC-6 White Surface LED [Dataset]. [https://nl.mouser.com/datasheet/2/678/AV02\\_3873EN\\_DS\\_ASMT\\_YTD7\\_0AA02\\_2023\\_10\\_18-1828117.pdf](https://nl.mouser.com/datasheet/2/678/AV02_3873EN_DS_ASMT_YTD7_0AA02_2023_10_18-1828117.pdf)
14. Resolution vs. ENOB | Analog Devices. (n.d.). <https://www.analog.com/en/resources/analog-dialogue/raqs/raq-issue-90.html>

15. AD1934 Datasheet and Product Info | Analog Devices. (z.d.).  
<https://www.analog.com/en/products/ad1934.html>

---

# Bijlage F: Unittestfase

DA3-project Stedin

*Realisatiefase testsysteem*

---

Auteur:	Younes Boulmani
Stagedocent:	De heer Fogarty
Bedrijfsbegeleiders:	Mark Burghout en Koen Peelen
Titel:	Unittestfase
Datum van uitgifte:	16-06-2024

## Inhoud

1	Unitestfase.....	182
1.1	Unittestrapport.....	182
1.2	Unittesten DAC .....	183
1.2.1	Unittesten eerste ontwerp.....	183
1.2.1.1	DAC -testcase 1 .....	183
1.2.1.2	Testresultaat en conclusie 1.....	183
	Conclusie .....	183
1.2.1.3	DAC - testcase 2 .....	184
1.2.1.4	Testresultaat en conclusie 2 .....	184
1.2.2	Unittesten nieuw ontwerp .....	186
1.2.2.1	DAC - testcase 1 .....	186
1.2.2.2	Testresultaat en conclusie 1.....	186
	Conclusie .....	186
1.2.2.3	DAC - testcase 2 .....	187
1.2.2.4	Testresultaat en conclusie 2 .....	188
	Conclusie .....	189
1.3	Unittesten microcontroller .....	190
1.3.1	Microcontroller - testcase 1 .....	190
1.3.2	Testresultaat en conclusie 1.....	191
	Conclusie .....	191
1.3.3	Microcontroller -testcase 2 .....	192
1.3.4	Testresultaat en conclusie 2 .....	193
	Conclusie .....	193
1.3.5	Microcontroller – testcase 3 .....	194
1.3.6	Testresultaat en conclusie 3 .....	195
	Conclusie .....	195
1.4	Unittesten Userinterface.....	196
1.4.1	Userinterface- testcase 1 .....	196
1.4.2	Testresultaat en conclusie 1.....	197
	Conslusie .....	197
1.4.3	Userinterface- testcase 2 .....	198
1.4.4	Testresultaat en conclusie 2 .....	199
	Conslusie .....	199
1.5	Unittest RS485-transceiverchip.....	200

1.5.1	RS485-transceiverchip -testcase .....	200
1.5.2	Testresultaat en conclusie.....	200
	Conslusie .....	200
1.6	Unittesten Voeding .....	201
1.6.1	Voeding- testcase 1.....	201
1.6.2	Testresultaat en conclusie 1 .....	202
	Conslusie .....	202
1.6.3	Voeding testcase 2 .....	203

## Versie Historiek

Revisie Datum	Auteur	Omschrijving
1.0	8-06-2024	Younes Boulmani
1.1	10-06-2024	Younes Boulmani
1.2	12-06-2024	Younes Boulmani
1.3	16-06-2024	Younes Boulmani
1.4	1-10-2024	Younes Boulmani

## 1 Unitestfase

In dit hoofdstuk worden alle unittests beschreven en zijn ook de resultaten weergegeven van alle unittests. Daarnaast is er ook een unittestrapport opgenomen.

### 1.1 Unittestrapport

Units	Specificaties	Behaald?
DAC	<b>SPEC 1.1:</b> De DAC heeft een resolutie van 24 bits of hoger.	Niet behaald
	<b>SPEC 1.2:</b> De DAC moet minimaal 3 verschillende signalen te gelijk kunnen genereren.	Behaald
	<b>SPEC 1.3:</b> De DAC is in staat om de drie verschillende signalen elk 8 keer te dupliceren	Behaald
	<b>SPEC 1.4:</b> De DAC moet een samplefrequentie hebben van minimaal het dubbele van de maximale frequentiecomponent (1300 Hz).	Behaald
	<b>SPEC 1.5:</b> De DAC moet in staat zijn om zowel positieve als negatieve signalen te genereren.	Behaald
Microcontroller	<b>SPEC 2.1:</b> De microcontroller kan data doorsturen via het USB-protocol.	Behaald
	<b>SPEC 2.2:</b> De microcontroller kan data doorsturen via het SPI-protocol.	Behaald
	<b>SPEC 2.3:</b> De microcontroller kan pinnen hoog (3.3V) of laag (0V) zetten ten behoeve van het aansturen van de RGB-led.	Behaald
	<b>SPEC 2.4:</b> De microcontroller kan een logisch hoog (3.3V) of laag (0V) signaal registreren.	Behaald
	<b>SPEC 2.5:</b> De microcontroller kan data sturen via de UART-protocol	Niet uitgevoerd
Userinterface	<b>SPEC 3.1:</b> Bij het indrukken van de startknop wordt er een startsignaal (hoog signaal, 3.3V) doorgegeven om de testprocedure te starten.	Behaald
	<b>SPEC 3.2:</b> Bij het indrukken van de pauzeerknop wordt er een pauzeersignaal (hoog signaal, 3.3V) doorgegeven om de testprocedure te pauzeren.	Behaald
	<b>SPEC 3.3:</b> Bij het indrukken van de stopknop wordt er een stopsingaal (hoog signaal, 3.3V) doorgegeven om de testprocedure te stoppen.	Behaald
	<b>SPEC 3.4:</b> De drukknop levert geen denderend signaal bij het indrukken van de knop.	Behaald
	<b>SPEC 3.5:</b> De RGB-led kan een blauw licht uitzenden (gereed).	Behaald
	<b>SPEC 3.6:</b> De RGB-led kan een groen licht uitzenden (testprocedure gestart).	Behaald
	<b>SPEC 3.7:</b> De RGB-led kan een groen knipperend licht uitzenden (testprocedure gepauzeerd).	Behaald
	<b>SPEC 3.8:</b> De RGB-led kan een blauw knipperend licht uitzenden (testprocedure voltooid).	Behaald
	<b>SPEC 3.9:</b> De RGB-led kan een rood licht uitzenden (testprocedure gestopt).	Behaald
RS485-transceiverchip	<b>SPEC 4.1:</b> De RS485-tranceiverchip zet het Modbus-protocol om in een UART-protocol.	Niet uitgevoerd
Voeding	<b>SPEC 5.1:</b> Het deelsysteem voeding moet kunnen werken met een ingangsspanningsbereik van 10-30 Volt.	Behaald
	<b>SPEC 5.2:</b> De voeding levert een gewenste spanning van 3.3 en -3.3 Volt met een maximale afwijking van 5%.	Behaald
	<b>SPEC 5.3:</b> De voeding moet minimaal de benodigde stroom kunnen leveren die het testsysteem verbruikt wanneer het actief is.	Behaald
	<b>SPEC 5.4:</b> Het analoge gedeelte van de DAC moet gevoed worden met een aparte lineaire spanningsregelaar.	Behaald

## 1.2 Unittesten DAC

In deze paragraaf worden de unittesten van de DAC beschreven. Deze zijn onderverdeeld in voor het eerste ontwerp voor het tweede ontwerp

### 1.2.1 Unitesten eerste ontwerp

In deze paragraaf worden alle unittesten en resultaten van het eerste ontwerp beschreven.

#### 1.2.1.1 DAC-testcase 1

Unitest - Microcontroller	Beschrijving
Requirement/ Specificatie:	<b>SPEC 1.1:</b> De DAC heeft een resolutie van 24 bits of hoger. <b>SPEC 1.4:</b> De DAC moet een samplefrequentie hebben van minimaal het dubbele van de maximale frequentiecomponent (1300 Hz).
Voorwaarden:	<ul style="list-style-type: none"> <li>Datasheet van de DAC-chip (<a href="#">de AD1934</a>)</li> </ul>
Testinvoer:	n.v.t.
Testuitvoer:	<ul style="list-style-type: none"> <li>De resolutie van de DAC-chip beschreven in de datasheet.</li> <li>De sample frequentie beschreven in de datasheet.</li> </ul>
Criteria:	De resolutie en de sample frequentie van de DAC-chip beschreven in de datasheet komt overeen met de gewenste specificatie.
Testprocedure:	<ol style="list-style-type: none"> <li>Bekijk de datasheet van de DAC-chip.</li> <li>Controleer of de resolutie en de samplefrequentie van de DAC-chip zoals beschreven in de datasheet overeenkomt met de specificatie.</li> <li>Als de testuitvoer voldoet aan de criteria, is de test geslaagd.</li> </ol>
Testresultaat:	Zie {1.2.1.2}
Test geslaagd:	De test is geslaagd als: <ul style="list-style-type: none"> <li>De testuitvoer voldoet aan de criteria</li> </ul>

#### 1.2.1.2 Testresultaat en conclusie 1

- Testuitvoer

## FEATURES

**PLL generated or direct master clock**

**Low EMI design**

**108 dB DAC dynamic range and SNR**

**-94 dB THD + N**

**Single 3.3 V supply**

**Tolerance for 5 V logic inputs**

**Supports 24 bits and 8 kHz to 192 kHz sample rates**

*Figuur 1, De resolutie beschreven in de datasheet*

### Conclusie

De test is **geslaagd** omdat de testuitvoer voldoet aan de criteria beschreven in de testcase.

## 1.2.1.3 DAC-testcase 2

Unittest - Microcontroller	Beschrijving
Requirement/ Specificatie:	<p><b>SPEC 1.2:</b> De DAC moet minimaal 3 verschillende signalen te gelijk kunnen genereren.</p> <p><b>SPEC 1.3:</b> De DAC is in staat om de drie verschillende signalen elk 8 keer te dupliceren.</p> <p><b>SPEC 1.5:</b> De DAC moet in staat zijn om zowel positieve als negatieve signalen te genereren.</p>
Voorwaarden:	<ul style="list-style-type: none"> <li>PCB van het elektronisch systeem.</li> <li>Voedingsbron (U min. 4 en max. 30V en I min. 100mA).</li> <li>Firmware voor de PCB.</li> <li>Oscilloscoop (minimaal 3 kanalen, 2mV/divisie)</li> <li>STLINK V3 en JTAG-connector kabel.</li> <li>Een PC met de volgende software geïnstalleerd: <ul style="list-style-type: none"> <li>STM32CubeIDE</li> </ul> </li> </ul>
Testinvoer:	De gewenste simulatiesignalen zijn ingesteld in de firmware, waarbij drie verschillende signalen zijn ingesteld die zowel positieve als negatieve spanningen hebben.
Testuitvoer:	<ul style="list-style-type: none"> <li>De output signalen van de DAC gemeten met de oscilloscoop</li> <li>De signalen gemeten bij de 8 poorten met de oscilloscoop.</li> </ul>
Criteria:	De gewenste simulatiesignalen komen overeen met de outputsignalen die gemeten zijn met de oscilloscoop.
Testprocedure:	<ol style="list-style-type: none"> <li>Sluit de PCB aan op de voedingsbron met 30V en een stroombegrenzing van 100mA.</li> <li>Verbind de PCB met de STLINK door middel van de STDC14-connectkabel.</li> <li>Debug het STM32Cube IDE-project "STM32cube_IDE/Unittests/DAC/DAC8564EVM_3_fase_signalen_V1" en voer de code uit.</li> <li>Meet met de oscilloscoop de uitgangen van de DAC.</li> <li>Verifieer of de gemeten waarden van de oscilloscoop voldoen aan de gestelde criteria.</li> </ol>
Testresultaat:	Zie {1.2.1.4}
Test geslaagd:	De test is geslaagd als: <ul style="list-style-type: none"> <li>De testuitvoer voldoet aan de criteria</li> </ul>

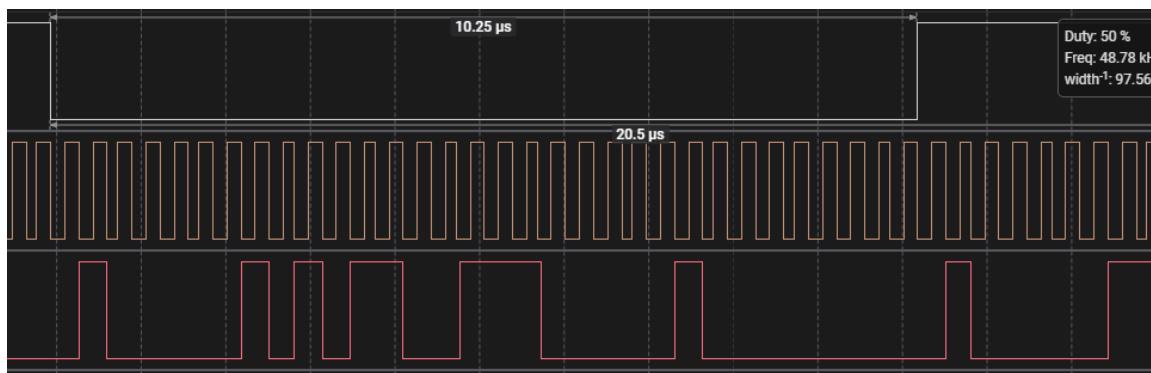
## 1.2.1.4 Testresultaat en conclusie 2

Deze testcase is **niet behaald**. Het deelsysteem DAC gaf geen outputsignaal, ondanks dat er data werd verzonden naar de DAC via het I2S-protocol (zie figuren 2 en 3). Na uitgebreid troubleshooten, zoals het controleren van het kloksignaal en het uitsluiten van hardwarefouten, bleef het probleem onopgelost. Er is contact opgenomen met de fabrikant van de DAC-chip, en ontwerpbestanden en testresultaten zijn gedeeld, maar de oorzaak bleef onduidelijk.

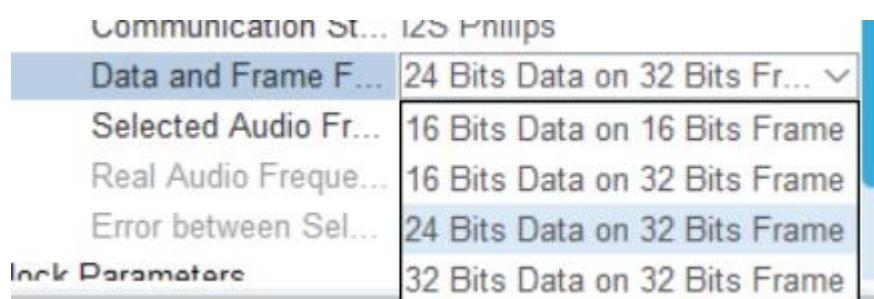
Er wordt vermoed dat de DAC niet functioneert omdat de 24-bits variabele wordt verstuurd in een 32-bits frame. Hierdoor ontvangt de DAC de data niet in het juiste formaat en blijft hij in standby, zonder outputsignaal. Dit probleem komt voort uit een standaardinstelling voor het I2S-protocol bij STM32, zoals weergegeven in figuur 4.

```
Name : sine wave_samples[4]
Details:8477151
Default:8477151
Decimal:8477151
Hex:0x8159df
Binary:100000010101100111011111
Octal:040254737
```

Figuur 2, De 24 bit sample waarde die verstuurd is van de microcontroller



Figuur 3, De data die ontvangen is door de logic analyzer (8477151 de eerste 24 bit 32 bit frame)



Figuur 4, I2S standaardinstellingen via device configuration tool.

## 1.2.2 Unittesten nieuw ontwerp

### 1.2.2.1 DAC-testcase 1

Unittest - Microcontroller	Beschrijving
Requirement/ Specificatie:	<b>SPEC 1.1:</b> De DAC heeft een resolutie van 24 bits of hoger. <b>SPEC 1.4:</b> De DAC moet een samplefrequentie hebben van minimaal het dubbele van de maximale frequentiecomponent (1300 Hz).
Voorwaarden:	<ul style="list-style-type: none"> <li>Datasheet van de DAC-chip (<a href="#">de DAC8564</a>)</li> </ul>
Testinvoer:	n.v.t.
Testuitvoer:	<ul style="list-style-type: none"> <li>De resolutie van de DAC-chip beschreven in de datasheet.</li> <li>De sample frequentie beschreven in de datasheet.</li> </ul>
Criteria:	De resolutie en de sample frequentie van de DAC-chip beschreven in de datasheet komt overeen met de gewenste specificatie.
Testprocedure:	<ol style="list-style-type: none"> <li>Bekijk de datasheet van de DAC-chip.</li> <li>Controleer of de resolutie en de samplefrequentie van de DAC-chip zoals beschreven in de datasheet overeenkomt met de specificatie.</li> <li>Als de testuitvoer voldoet aan de criteria, is de test geslaagd.</li> </ol>
Testresultaat:	Zie {1.2.2.2}
Test geslaagd:	De test is geslaagd als: <ul style="list-style-type: none"> <li>De testuitvoer voldoet aan de criteria</li> </ul>

### 1.2.2.2 Testresultaat en conclusie 1

#### ➤ Testuitvoer

Hieronder is de testuitvoer van de testcase weergegeven. De geel gemarkeerde tekst geeft de resolutie (16 bits) en de kloksnelheid (tot 50 MHz) weer.

### DESCRIPTION

The DAC8564 is a low-power, voltage-output, four-channel, 16-bit digital-to-analog converter (DAC). The device includes a 2.5V, 2ppm/°C internal reference (enabled by default), giving a full-scale output voltage range of 2.5V. The internal reference has an initial accuracy of 0.004% and can source up to 20mA at the V<sub>REFH</sub>/V<sub>REFOUT</sub> pin. The device is monotonic, provides very good linearity, and minimizes undesired code-to-code transient voltages (glitch). The DAC8564 uses a versatile 3-wire serial interface that operates at clock rates up to 50MHz. The interface is compatible with standard SPI™, QSPI™, Microwire™, and digital signal processor (DSP) interfaces.

Figuur 5, de resolutie en kloksnelheid beschreven in de datasheet

#### Conclusie

De test is gedeeltelijk behaald. **SPEC 1.4** is behaald, omdat het voldoet aan de criteria, maar **SPEC 1.1 niet**, aangezien de DAC een resolutie van 16 bits heeft. De afstudeerde heeft echter bewust de ontwerpkeuze gemaakt om over te stappen naar een 16-bits DAC en daarmee niet aan deze specificatie te voldoen.

## 1.2.2.3 DAC -testcase 2

Unittest - Microcontroller	Beschrijving
Requirement/ Specificatie:	<p><b>SPEC 1.2:</b> De DAC moet minimaal 3 verschillende signalen te gelijk kunnen genereren.</p> <p><b>SPEC 1.3:</b> De DAC is in staat om de drie verschillende signalen elk 8 keer te dupliceren.</p> <p><b>SPEC 1.5:</b> De DAC moet in staat zijn om zowel positieve als negatieve signalen te genereren.</p>
Voorwaarden:	<ul style="list-style-type: none"> <li>PCB van het elektronisch systeem.</li> <li>Voedingsbron (U min. 4 en max. 30V en I min. 100mA).</li> <li>Firmware voor de PCB.</li> <li>Oscilloscoop (minimaal 3 kanalen, 2mV/divisie)</li> <li>STLINK V3 en JTAG-connector kabel.</li> <li>Een PC met de volgende software geïnstalleerd: <ul style="list-style-type: none"> <li>STM32CubeIDE</li> </ul> </li> </ul>
Testinvoer:	De gewenste simulatiesignalen zijn ingesteld in de firmware, waarbij drie verschillende signalen zijn ingesteld die zowel positieve als negatieve spanningen hebben.
Testuitvoer:	<ul style="list-style-type: none"> <li>De output signalen van de DAC gemeten met de oscilloscoop</li> <li>De signalen gemeten bij de 8 poorten met de oscilloscoop.</li> </ul>
Criteria:	De gewenste simulatiesignalen komen overeen met de outputsignalen die gemeten zijn met de oscilloscoop.
Testprocedure:	<ol style="list-style-type: none"> <li>Sluit de PCB aan op de voedingsbron met 30V en een stroombegrenzing van 100mA.</li> <li>Verbind de PCB met de STLINK door middel van de STDC14-connectkabel.</li> <li>Debug het STM32Cube IDE-project "<a href="#">DAC8564EVM 3 fase signalen V1</a>"<sup>3</sup> en voer de code uit.</li> <li>Meet met de oscilloscoop de uitgangen van de DAC.</li> <li>Verifieer of de gemeten waarden van de oscilloscoop voldoen aan de gestelde criteria.</li> </ol>
Testresultaat:	Zie {}
Test geslaagd:	De test is geslaagd als: <ul style="list-style-type: none"> <li>De testuitvoer voldoet aan de criteria</li> </ul>

<sup>3</sup> Deze STM32 Cube IDE-project kun je terugvinden in de Git-repository AFS30\_testsysteem\_Stedin onder het pad: STM32cube\_IDE/Unitests/DAC

### 1.2.2.4 Testresultaat en conclusie 2

➤ **Testinvoer**

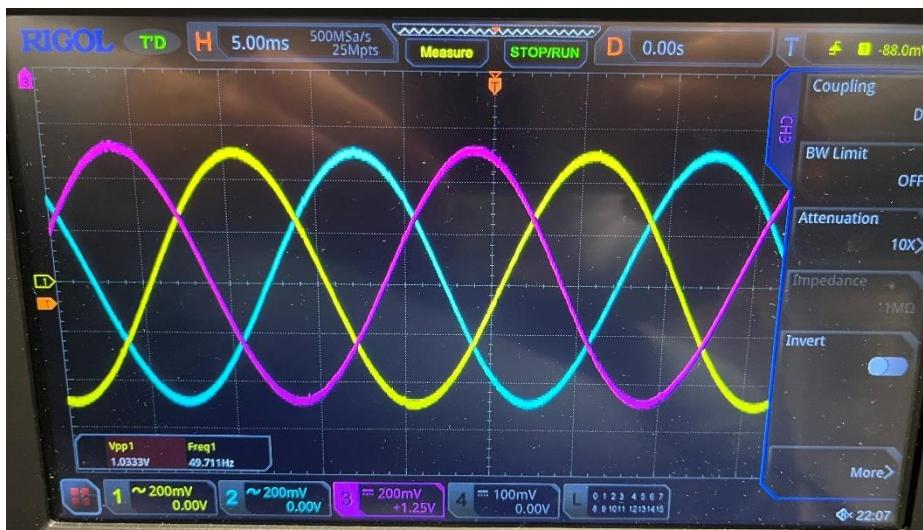
```
/* ----- */
/* USER CODE BEGIN PD */
#define SPI_TIMEOUT 1000
#define DAC8564_SEQUENTIANALY_WRITE_UPDATE 0x10
#define VREF 2.5
#define AMPLITUDE 0.5
#define OFFSET (VREF / 2)
#define PI 3.14159265
#define SAMPLE_RATE 48000
#define FREQUENCY 50
#define NUM_SAMPLES (SAMPLE_RATE / FREQUENCY)
#define PHASE_SHIFT_120_DEG (2.0 * PI / 3.0) // 120-degree phase shift
#define PHASE_SHIFT_240_DEG (4.0 * PI / 3.0)
/* USER CODE END PD */

```

*Figuur 6, het gewenste simulatie signaal (Vpiek 0.5V) ingesteld in de firmware*

➤ **Testuitvoer**

In figuur 7 is het uitgangssignaal van de DAC gemeten met de oscilloscoop (**SPEC 1.2 en SPEC 1.5**). In figuur 8 is het uitgangssignaal te zien gemeten op poort 8 (**SPEC 1.3**).



*Figuur 7, uitgangssignaal gemeten met de oscilloscoop (1,03Vpp).*



*Figuur 8, uitgangssignaal, gemeten op poort 8 met de oscilloscoop (1,02 Vpp).*

### Conclusie

Uit de testuitvoer blijkt dat er drie verschillende signalen worden gegenereerd met zowel positieve als negatieve spanning. Het uitgangssignaal op poort 1 en poort 8 komt overeen met het ingestelde signaal in de firmware en voldoet aan de criteria. De test is daarmee behaald.

### 1.3 Unittesten microcontroller

De specificatie dat de microcontroller kan communiceren via het UART-protocol (SPEC 2.6) is niet getest, omdat de afstudeerde zich heeft gericht op het realiseren van de belangrijkste eisen.

#### 1.3.1 Microcontroller- testcase 1

Unittest - Microcontroller	Beschrijving
Requirement/ Specificatie:	<b>SPEC 2.2:</b> De microcontroller kan communiceren via het SPI-protocol.
Voorwaarden:	<ul style="list-style-type: none"> <li>PCB van het elektronisch systeem.</li> <li>Voedingsbron (U min. 4 en max. 30V en I min. 100mA).</li> <li>Firmware voor de PCB.</li> <li>Een PC met de volgende software geïnstalleerd:           <ul style="list-style-type: none"> <li>STM32CubeIDE</li> </ul> </li> <li>Logic analyzer en bijbehorende softwareprogramma.</li> <li>STLINK V3 en JTAG-connector kabel.</li> </ul>
Testinvoer:	Data die wordt verstuurd van de microcontroller.
Testuitvoer:	<ul style="list-style-type: none"> <li>De data die wordt afgelezen door de logic analyzer.</li> </ul>
Criteria:	De data die is afgelezen op de logic analyzer komt overeen met de data die is verstuurd door de microcontroller en voldoet aan het bijbehorende dataprotocol.
Testprocedure <b>SPEC 2.2:</b>	<ol style="list-style-type: none"> <li>Sluit de PCB aan op de voedingsbron met 30V en een stroombegrenzing van 100mA.</li> <li>Verbind de PCB met de STLINK door middel van de STDC14-connectorkabel.</li> <li>Debug het STM32Cube IDE-project "<a href="#">DAC8564EVM 3 fase signalen V1</a>" en zet een breakpoint op regel 138.</li> <li>Open vervolgens het Logic Analyzer-programma en verbind alle SPI-connectorpinnen met de logic analyzer. Start het softwareprogramma en zet een trigger op de neergaande flank.</li> <li>Voer daarna de code uit in STM32Cube IDE.</li> <li>Wanneer het programma is gepauzeerd, bekijk de data die via SPI verstuurd zal worden in de array "data []".</li> <li>Start de code opnieuw.</li> <li>Controleer de resultaten van de logic analyzer en verifieer of de verstuurde data van de microcontroller overeenkomt met het resultaat in de logic analyzer.</li> </ol>
Testresultaat:	Zie { 1.3.2}
Test geslaagd:	<p>De test is geslaagd als:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>De testuitvoer voldoet aan de criteria</li> </ul>

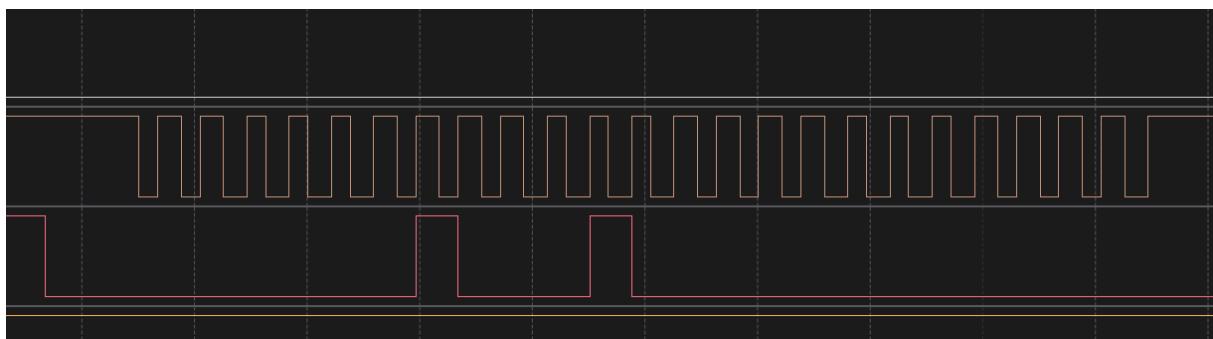
### 1.3.2 Testresultaat en conclusie 1

#### ➤ Testinvoer

data	uint8_t [3]	0x2001ffec
(x)= data[0]	uint8_t	1 '\001'
(x)= data[1]	uint8_t	16 '\020'
(x)= data[2]	uint8_t	0 '\0'
<b>Add new expression</b>		

Figuur 9, De data die wordt verstuurd via SPI (binaire representatie: 0000 0001 0001 0000 0000 0000).

#### ➤ Testuitvoer



Figuur 10, De data die gemeten is door de logic analyzer (binaire representatie: 0000 0001 0001 0000 0000 0000).

#### Conclusie

De test is geslaagd omdat de testuitvoer voldoet aan de criteria beschreven in de testcase.

### 1.3.3 Microcontroller-testcase 2

Unitest - Microcontroller	Beschrijving
Requirement/ Specificatie:	<b>SPEC 2.1:</b> De microcontroller kan communiceren via het USB-protocol. <b>SPEC 2.6:</b> De microcontroller kan communiceren via het UART-protocol <sup>4</sup> .
Voorwaarden:	<ul style="list-style-type: none"> <li>PCB van het elektronisch systeem.</li> <li>Voedingsbron (U min. 4 en max. 30V en I min. 100mA).</li> <li>Firmware voor de PCB.</li> <li>Micro USB B-kabel.</li> <li>STLINK V3 en JTAG-connector kabel.</li> <li>Een PC met de volgende software geïnstalleerd:           <ul style="list-style-type: none"> <li>STM32CubeIDE</li> <li>Tera term</li> </ul> </li> </ul>
Testinvoer:	Data die wordt verstuurd van de microcontroller en data die wordt verstuurd vanaf de PC.
Testuitvoer:	<ul style="list-style-type: none"> <li>De data die wordt afgelezen op de seriële monitor en de data ontvangen op de microcontroller.</li> </ul>
Criteria:	De data die wordt verstuurd en ontvangen op de seriële monitor komt overeen met de data die is ontvangen en verstuurd door de microcontroller en voldoet aan het bijbehorende dataprotocol.
Testprocedure:	<ol style="list-style-type: none"> <li>Sluit de PCB aan op de voedingsbron met 30V en een stroombegrenzing van 100mA.</li> <li>Verbind de PCB met de STLINK door middel van de STDC14-connectkabel.</li> <li>Verbind de PC met de PCB door middel van de Micro USB B-kabel.</li> <li>Debug het STM32Cube IDE-project " <a href="#">AFS_30_USB_CODE_V2</a>"<sup>5</sup> en zet een breakpoint op regel 80 voor <b>SPEC 2.1</b></li> <li>Open Tera Term.</li> <li>Run de code.</li> <li>Verifieer of de tekststring verstuurd door de microcontroller te zien is op de seriële monitor.</li> <li>Typ een stuk tekststring en druk op enter.</li> <li>Verifieer of de code is gepauzeerd en de ingetypte tekststring is ontvangen door de microcontroller.</li> <li>Voor SPEC 2.6 dient dezelfde testprocedure uitgevoerd te worden, maar in stap 4 moet het STM32Cube IDE-project " AFS_30_UART_CODE_V2" gedebugged worden.</li> </ol>
Testresultaat:	Zie <a href="#">{1.3.4}</a> .
Test geslaagd:	De test is geslaagd als: <ul style="list-style-type: none"> <li>De testuitvoer voldoet aan de criteria</li> </ul>

<sup>4</sup> Deze specificatie is niet getest.

<sup>5</sup> Deze STM32 Cube IDE-project kun je terugvinden in de Git-repository AFS30\_testsysteem\_Stedin onder het pad: STM32cube\_IDE/Unitests/USB

### 1.3.4 Testresultaat en conclusie 2

#### ➤ Testinvoer

```
char *data= "Hello world, USB is working \r\n";
```

Figuur 11, Tekststring verzonden vanuit de microcontroller.

De USB communicatie is gelukt Younes!

Figuur 12, Tekststring verzonden vanaf de seriële monitor.

#### ➤ Testuitvoer

Hello world, USB is working

Figuur 13, Tekststring ontvangen op de seriële monitor.

(*)= receivedData[0]	char	68 'D'
(*)= receivedData[1]	char	101 'e'
(*)= receivedData[2]	char	32 ''
(*)= receivedData[3]	char	85 'U'
(*)= receivedData[4]	char	83 'S'
(*)= receivedData[5]	char	66 'B'
(*)= receivedData[6]	char	32 ''
(*)= receivedData[7]	char	99 'c'
(*)= receivedData[8]	char	111 'o'
(*)= receivedData[9]	char	109 'm'
(*)= receivedData[10]	char	109 'm'
(*)= receivedData[11]	char	117 'u'
(*)= receivedData[12]	char	110 'n'
(*)= receivedData[13]	char	105 'i'
(*)= receivedData[14]	char	99 'c'
(*)= receivedData[15]	char	97 'a'
(*)= receivedData[16]	char	116 't'
(*)= receivedData[17]	char	105 'i'
(*)= receivedData[18]	char	101 'e'
(*)= receivedData[19]	char	32 ''
(*)= receivedData[20]	char	105 'i'
(*)= receivedData[21]	char	115 's'
(*)= receivedData[22]	char	32 ''
(*)= receivedData[23]	char	103 'g'
(*)= receivedData[24]	char	101 'e'
(*)= receivedData[25]	char	108 'l'
(*)= receivedData[26]	char	117 'u'
(*)= receivedData[27]	char	107 'k'
(*)= receivedData[28]	char	116 't'
(*)= receivedData[29]	char	32 ''
(*)= receivedData[30]	char	89 'Y'
(*)= receivedData[31]	char	111 'o'
(*)= receivedData[32]	char	117 'u'
(*)= receivedData[33]	char	110 'n'
(*)= receivedData[34]	char	101 'e'
(*)= receivedData[35]	char	115 's'
(*)= receivedData[36]	char	33 '!'
(*)= receivedData[37]	char	13 '\r'
(*)= receivedData[38]	char	10 '\n'

Figuur 14, Tekststring ontvangen op de microcontroller.

#### Conclusie

Uit de testuitvoer blijkt dat de microcontroller succesvol kan communiceren via het USB-protocol en voldoet aan de criteria, waarmee **SPEC 2.1** is behaald. **SPEC 2.6** is, zoals eerder beschreven in dit hoofdstuk, niet getest {1.3}.

## 1.3.5 Microcontroller – testcase 3

Unittest - Microcontroller	Beschrijving
Requirement/ Specificatie:	<b>SPEC 2.3:</b> De microcontroller kan pinnen hoog (3.3V) of laag (0V) zetten ten behoeve van het aansturen van de RGB-led. <b>SPEC 2.4:</b> De microcontroller kan een logisch hoog (3.3V) of laag (0V) signaal registreren.
Voorwaarden:	<ul style="list-style-type: none"> <li>PCB van het elektronisch systeem.</li> <li>Voedingsbron (U min. 4 en max. 30V en I min. 100mA).</li> <li>Firmware voor de PCB.</li> <li>Oscilloscoop met probe kabels.</li> <li>STLINK V3 en JTAG-connector kabel.</li> <li>Een PC met de volgende software geïnstalleerd:           <ul style="list-style-type: none"> <li>STM32CubeIDE</li> </ul> </li> </ul>
Testinvoer:	Firmware die een pin hoog of laag zet <b>SPEC 2.3</b> . Een laag (0V) signaal en een hoog signaal (3.3V) op een microcontroller Input pin <b>SPEC 2.4</b> .
Testuitvoer:	<ul style="list-style-type: none"> <li>Het uitgangssignaal gemeten met de oscilloscoop <b>SPEC 2.3</b>.</li> <li>Het signaal dat geregistreerd is door de microcontroller <b>SPEC 2.4</b>.</li> </ul>
Criteria:	Het uitgangssignaal op de outputpin moet overeenkomen met het ingestelde signaal <b>SPEC 2.3</b> . Het signaal dat geregistreerd is door de microcontroller moet overeenkomen met het signaal dat op de input pin is gezet <b>SPEC 2.4</b> .
Testprocedure:	<ol style="list-style-type: none"> <li>Sluit de PCB aan op de voedingsbron met 30V en een stroombegrenzing van 100mA.</li> <li>Verbind de PCB met de STLINK via de STDC14-connectorkabel.</li> <li>Debug het STM32CubeIDE-project "<a href="#">AFS 30 User interface</a>"<sup>6</sup> en plaats breakpoints op regel 119 en 535. Start vervolgens de code.</li> <li>Wanneer de code pauzeert op regel 119, plaats de oscilloscoop-probe bij de R58-werstand van de RGB LED. Stel de oscilloscoop in op single rising edge en start de code.</li> <li>Verifieer het gemeten resultaat op de oscilloscoop en controleer of dit aan de criteria voldoet.</li> <li>Plaats vervolgens de oscilloscoop-probe bij de output van de startknop, stel de oscilloscoop in op falling edge trigger mode, en druk op de startknop.</li> <li>Controleer of een laag signaal op de oscilloscoop verschijnt en verifieer of de microcontroller de code pauzeert en het lage signaal heeft geregistreerd.</li> </ol>
Testresultaat:	Zie <b>{1.3.6}</b>
Test geslaagd:	De test is geslaagd als: <ul style="list-style-type: none"> <li>De testuitvoer voldoet aan de criteria</li> </ul>

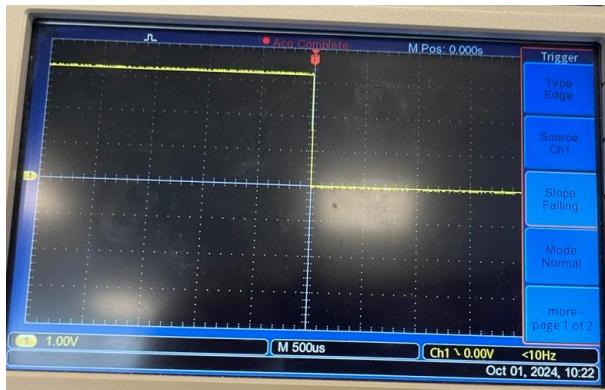
<sup>6</sup> Deze STM32 Cube IDE-project kun je terugvinden in de Git-repository AFS30\_testsysteem\_Stedin onder het pad: STM32cube\_IDE/Unitests/Userinterface

### 1.3.6 Testresultaat en conclusie 3

#### ➤ Testinvoer

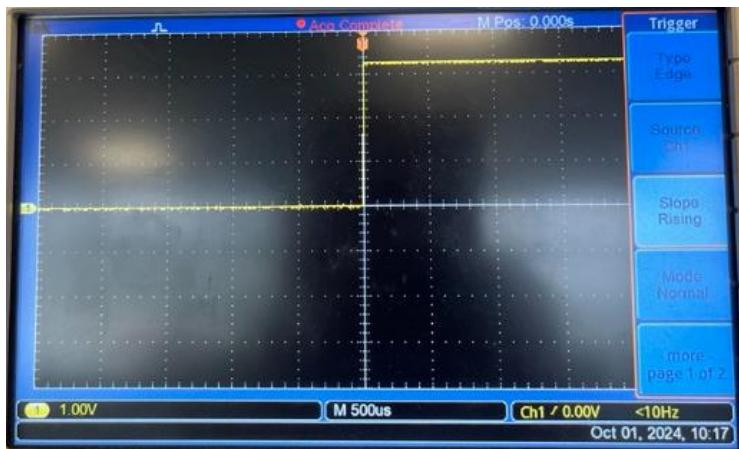
```
118 void zet_blaauw_licht_aan() {
119     HAL_GPIO_WritePin(BLAUWE_LED_PORT, BLAUWE_LED_PIN, GPIO_PIN_SET);
```

Figuur 15, Stuk code die een pin hoog zet 3.3V, testinvoer **SPEC 2.3.**



Figuur 16, Een laag signaal (0V) ingesteld op de startknop-inputpin van de microcontroller testinvoer **SPEC 2.4.**

#### ➤ Testuitvoer



Figuur 18, Het uitgangssignaal gemeten met de oscilloscoop (hoog signaal, 3.3V) **SPEC 2.3.**

```
531 /* Infinite loop */
532
533 for(;;) {
534     if (HAL_GPIO_ReadPin(START_KNOP_PORT, START_KNOP_PIN) == GPIO_PIN_RESET) {
535         update_status(STATUS_TEST_GESTART);
536     } else if (HAL_GPIO_ReadPin(PAUZEER_KNOP_PORT, PAUZEER_KNOP_PIN) == GPIO_PIN_RESET) {
537         update status(STATUS TEST GEPAUZEERD);
```

Figuur 17, Het signaal geregistreerd door de microcontroller bij de startknop-pin (een laag signaal van 0V geregistreerd). **SPEC 2.4.**

#### Conclusie

De test is **geslaagd** omdat de testuitvoer voldoet aan de criteria beschreven in de testcase.

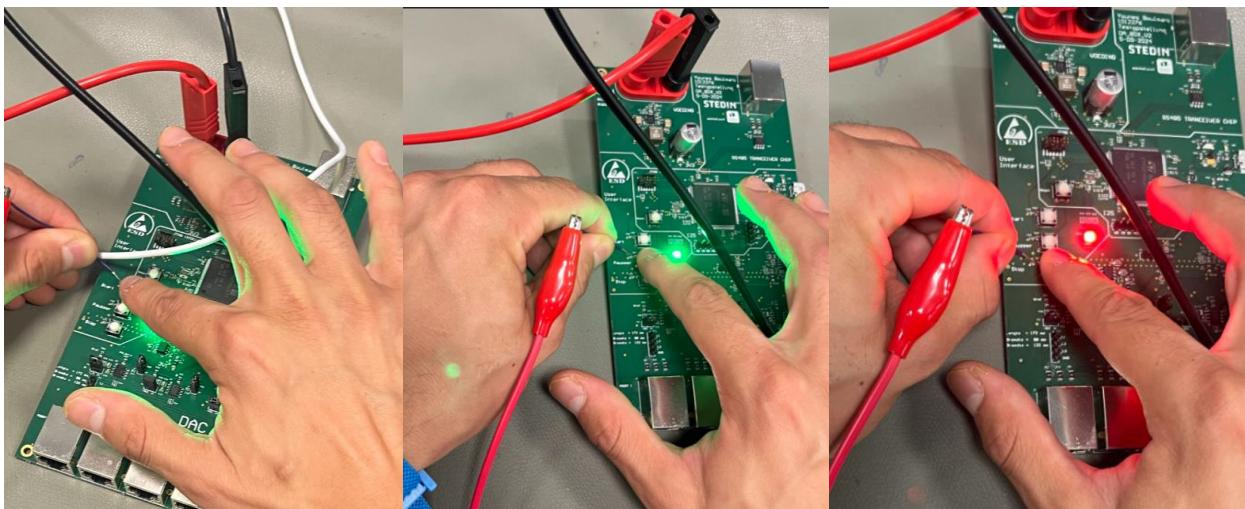
## 1.4 Unittesten Userinterface

### 1.4.1 Userinterface- testcase 1

Unitest - Microcontroller	Beschrijving
Requirement/ Specificatie:	<p><b>SPEC 3.1:</b> Bij het indrukken van de startknop wordt er een startsignaal (laag signaal, 0V) doorgegeven om de testprocedure te starten.</p> <p><b>SPEC 3.2:</b> Bij het indrukken van de pauzeerknop wordt er een pauzeersignaal (laag signaal, 0V) doorgegeven om de testprocedure te pauzeren.</p> <p><b>SPEC 3.3:</b> Bij het indrukken van de stopknop wordt er een stopsignaal (laag signaal, 0V) doorgegeven om de testprocedure te stoppen.</p> <p><b>SPEC 3.4:</b> De drukknop levert geen denderend signaal bij het indrukken van de knop.</p>
Voorwaarden:	<ul style="list-style-type: none"> <li>• PCB van het elektronisch systeem.</li> <li>• Voedingsbron (U min. 4 en max. 30V en I min. 100mA).</li> <li>• Firmware voor de PCB.</li> <li>• Oscilloscoop met probe kabels.</li> <li>• STLINK V3 en JTAG-connector kabel.</li> <li>• Een PC met de volgende software geïnstalleerd: <ul style="list-style-type: none"> <li>◦ STM32CubeIDE</li> </ul> </li> </ul>
Testinvoer:	Het indrukken van de start-, pauzeer- en stopknop.
Testuitvoer:	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Het gemeten signaal op de uitgang van de drukknop door de oscilloscoop.</li> </ul>
Criteria:	Bij het indrukken van de knop is er een laag signaal te zien van 0V, en er is geen dendering te zien in het signaal.
Testprocedure:	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Sluit de PCB aan op de voedingsbron met 30V en een stroombegrenzing van 100mA.</li> <li>2. Verbind de PCB met de STLINK via de STDC14-connectorkabel.</li> <li>3. Debug het STM32CubeIDE-project "<a href="#">AFS_30_User_interface</a>" en voer de code uit.</li> <li>4. Zet de oscilloscoop probe op de uitgang van de drukknop en stel de oscilloscoop trigger in op de falling edge.</li> <li>5. Druk op een van de drie drukknoppen van de Userinterface op de PCB.</li> <li>6. Verifieer of er een laag signaal te zien is op de oscilloscoop dat niet denderend is.</li> <li>7. Herhaal stap 4 en 5 tot alle drukknoppen zijn getest.</li> </ol>
Testresultaat:	Zie <b>{1.4.2}</b>
Test geslaagd:	<p>De test is geslaagd als:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• De testuitvoer voldoet aan de criteria</li> </ul>

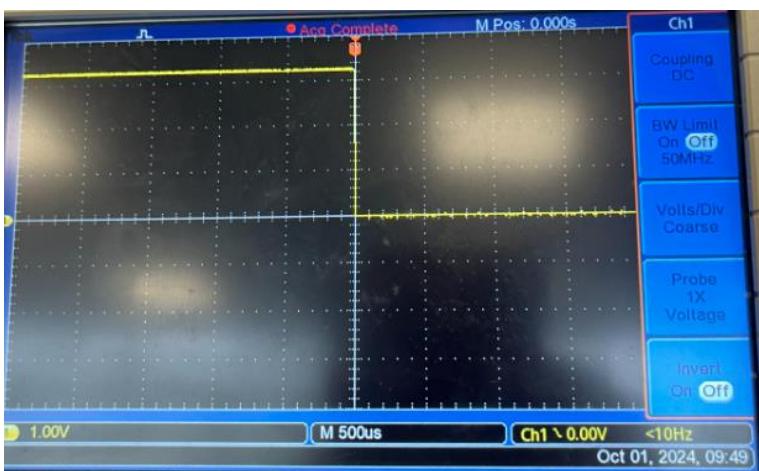
#### 1.4.2 Testresultaat en conclusie 1

##### ➤ Testinvoer



Figuur 19, Het indrukken van de start-, pauzeer- en stopknop.

##### ➤ Testuitvoer



Figuur 20, Het gemeten signaal op de oscilloscoop (een laag signaal van 0V).

##### Conclusie

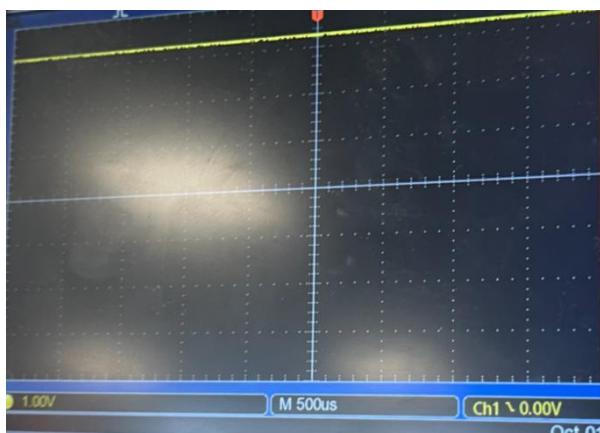
De test is **geslaagd** omdat de testuitvoer voldoet aan de criteria beschreven in de testcase.

## 1.4.3 Userinterface- testcase 2

Unitest - Microcontroller	Beschrijving
Requirement/ Specificatie:	<p><b>SPEC 3.5:</b> De RGB-led kan een blauw licht uitzenden (gereed).</p> <p><b>SPEC 3.6:</b> De RGB-led kan een groen licht uitzenden (testprocedure gestart).</p> <p><b>SPEC 3.7:</b> De RGB-led kan een groen knipperend licht uitzenden (testprocedure gepauzeerd).</p> <p><b>SPEC 3.8:</b> De RGB-led kan een blauw knipperend licht uitzenden (testprocedure voltooid).</p> <p><b>SPEC 3.9:</b> De RGB-led kan een rood licht uitzenden (testprocedure gestopt).</p>
Voorwaarden:	<ul style="list-style-type: none"> <li>• PCB van het elektronisch systeem.</li> <li>• Voedingsbron (U min. 4 en max. 30V en I min. 100mA).</li> <li>• Firmware voor de PCB.</li> <li>• STLINK V3 en JTAG-connector kabel.</li> <li>• Een PC met de volgende software geïnstalleerd: <ul style="list-style-type: none"> <li>◦ STM32CubelDE</li> </ul> </li> </ul>
Testinvoer:	Hoge (3.3V) en lage (0V) signalen als input voor de RGB led.
Testuitvoer:	<ul style="list-style-type: none"> <li>• De lichtstatus van de RGB-LED</li> </ul>
Criteria:	De RGB-led kan alle verschillende lichtsignalen uitzenden zoals gespecificeerd in de specs.
Testprocedure:	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Sluit de PCB aan op de voedingsbron met 30V en een stroombegrenzing van 100mA.</li> <li>2. Verbind de PCB met de STLINK via de STDC14-connectorkabel.</li> <li>3. Debug het STM32CubelDE-project "<a href="#">AFS_30_User_interface</a>" en run de code.</li> <li>4. Verifieer of de RGB-LED de verschillende lichtsignalen kan uitzenden zoals gespecificeerd in de specs.</li> </ol>
Testresultaat:	Zie <b>{1.4.4}</b>
Test geslaagd:	<p>De test is geslaagd als:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• De testuitvoer voldoet aan de criteria</li> </ul>

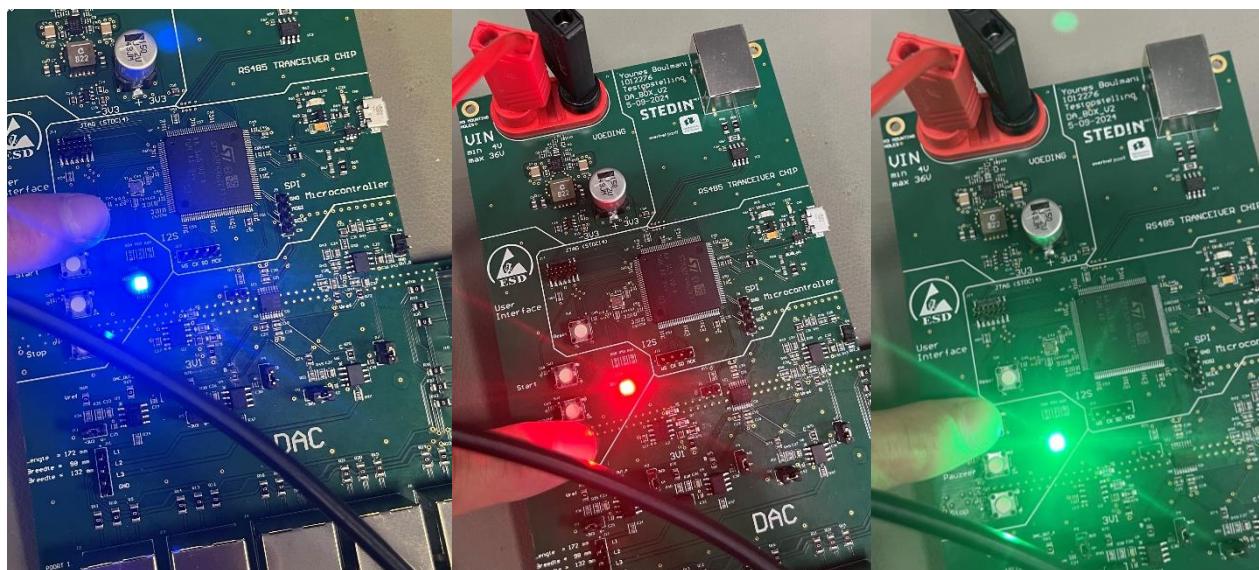
#### 1.4.4 Testresultaat en conclusie 2

##### ➤ Testinvoer



Figuur 21, een hoog signaal(0V) als input voor de RGB-LED

##### ➤ Testuitvoer



Figuur 22, De lichtstatus van de RGB LED

#### Conclusie

De test is geslaagd, omdat de testuitvoer voldoet aan de criteria beschreven in de testcase.

## 1.5 Unittest RS485-transceiverchip

### 1.5.1 RS485-transceiverchip-testcase

Unittest - Microcontroller	Beschrijving
Requirement/ Specificatie:	<b>SPEC 4.1:</b> De RS485-tranceiverchip zet het Modbus-protocol om in een UART- protocol.
Voorwaarden:	<ul style="list-style-type: none"> <li>• PCB van het elektronisch systeem.</li> <li>• Voedingsbron (U min. 4 en max. 30V en I min. 100mA).</li> <li>• Firmware voor de PCB.</li> <li>• Oscilloscoop met kabel.</li> <li>• STLINK V3 en JTAG-connector kabel.</li> <li>• Een PC met de volgende software geïnstalleerd:           <ul style="list-style-type: none"> <li>◦ STM32CubeIDE</li> </ul> </li> </ul>
Testinvoer:	Data verstuurd in UART- protocol.
Testuitvoer:	<ul style="list-style-type: none"> <li>• De data afgelezen op de oscilloscoop.</li> </ul>
Criteria:	De data verstuurd in UART- protocol is omgezet in het Modbus-protocol.
Testprocedure:	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Sluit de PCB aan op de voedingsbron met 30V en een stroombegrenzing van 100mA.</li> <li>2. Verbind de PCB met de STLINK via de STDC14-connectorkabel.</li> <li>3. Zet de oscilloscoop probe op de output pin van de RS485-tranceiverchip en stel de oscilloscoop trigger in op de falling edge.</li> <li>4. Debug het STM32CubeIDE-project "AFS_30_RS485-tranceiverchip" en voer de code uit.</li> <li>5. Verifieer of het resultaat op de oscilloscoop voldoet aan de criteria.</li> </ol>
Testresultaat:	Zie <b>{1.5.2}</b>
Test geslaagd:	De test is geslaagd als: <ul style="list-style-type: none"> <li>• De testuitvoer voldoet aan de criteria</li> </ul>

### 1.5.2 Testresultaat en conclusie

➤ **Testinvoer**

➤ **Testuitvoer**

#### Conclusie

Deze unittest is niet uitgevoerd, omdat de afstudeerde zich heeft gericht op het realiseren van de belangrijkste eisen.

## 1.6 Unittesten Voeding

### 1.6.1 Voeding- testcase 1

Unittest - Microcontroller	Beschrijving
Requirement/ Specificatie:	<p><b>SPEC 5.1:</b> Het deelsysteem voeding moet kunnen werken met een ingangsspanningsbereik van 10-30 Volt.</p> <p><b>SPEC 5.2:</b> De voeding levert een gewenste spanning van 3.3 en -3.3Volt met een maximale afwijking van 5%.</p>
Voorwaarden:	<ul style="list-style-type: none"> <li>• PCB van het elektronisch systeem.</li> <li>• Voedingsbron (U min. 10 en max. 30V en I min. 100mA).</li> <li>• Firmware voor de PCB.</li> <li>• Multimeter (die spanningen kan meten tot 30V).</li> <li>• STLINK V3 en JTAG-connector kabel.</li> <li>• Een PC met de volgende software geïnstalleerd: <ul style="list-style-type: none"> <li>◦ STM32CubeIDE</li> </ul> </li> </ul>
Testinvoer:	Spanning van 10V en 30V.
Testuitvoer:	<ul style="list-style-type: none"> <li>• De spanning gemeten door de multimeter.</li> </ul>
Criteria:	De waarde gemeten door de multimeter voldoet aan de specificatie.
Testprocedure:	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Sluit de PCB aan op de voedingsbron met 10V en een stroombegrenzing van 100mA.</li> <li>2. Zet de voeding aan en meet met de multimeter op de 3.3V uitgang.</li> <li>3. Controleer of de testuitvoer voldoet aan de criteria.</li> <li>4. Zet vervolgens de voeding op 30V.</li> <li>5. Controleer of de testuitvoer voldoet aan de criteria.</li> </ol>
Testresultaat:	Zie testresultaat
Test geslaagd:	De test is geslaagd als: <ul style="list-style-type: none"> <li>• De testuitvoer voldoet aan de criteria</li> </ul>

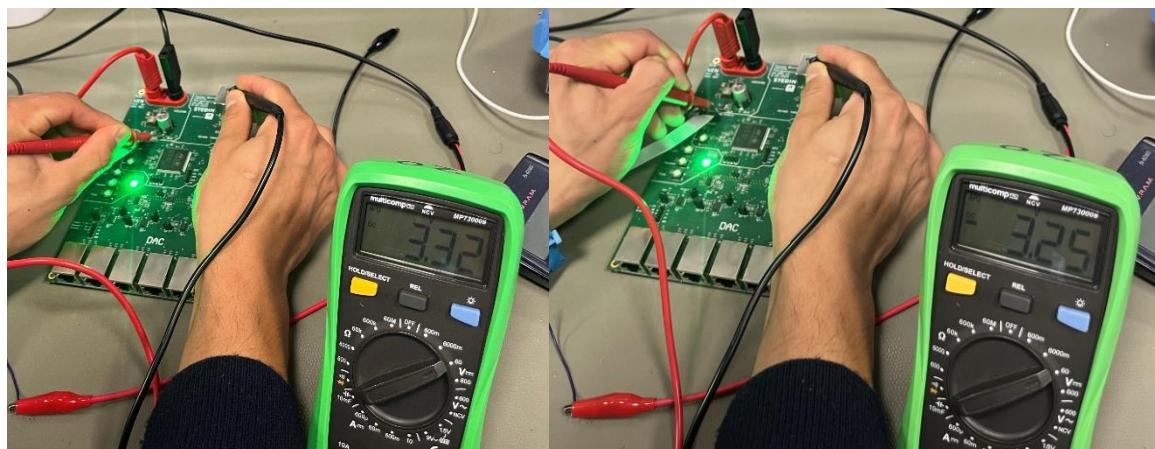
### 1.6.2 Testresultaat en conclusie 1

#### ➤ Testinvoer..



Figuur 23, een spanning van 10V als testinvoer en een spanning van 30V.

#### ➤ Testuitvoer



Figuur 24, De uitgangsspanning gemeten op de 3,3V-uitgang en de -3,25V-uitgang.

#### Conclusie

De test is geslaagd, omdat de testuitvoer voldoet aan de criteria beschreven in de testcase.

## 1.6.3 Voeding testcase 2

Unitest - Microcontroller	Beschrijving
Requirement/ Specificatie:	<p><b>SPEC 5.3:</b> De voeding moet minimaal de benodigde stroom kunnen leveren die het testsysteem verbruikt wanneer het actief is.</p> <p><b>SPEC 5.4:</b> Het analoge gedeelte van de DAC moet gevoed worden met een aparte lineaire spanningsregelaar.</p>
Voorwaarden:	<ul style="list-style-type: none"> <li>• PCB van het elektronisch systeem.</li> <li>• Voedingsbron (U min. 10 en max. 30V en I min. 100mA).</li> <li>• Firmware voor de PCB.</li> <li>• Multimeter (die spanningen kan meten tot 30V).</li> <li>• STLINK V3 en JTAG-connector kabel.</li> <li>• Een PC met de volgende software geïnstalleerd: <ul style="list-style-type: none"> <li>◦ STM32CubeIDE</li> </ul> </li> </ul>
Testinvoer:	Spanning tussen 10V en 30V.
Testuitvoer:	<ul style="list-style-type: none"> <li>• De spanning gemeten door de multimeter bij de lineaire spanningsregelaar <b>SPEC 5.4</b>.</li> </ul>
Criteria:	<p>De door de multimeter gemeten waarde voldoet aan de voedingsspecificaties van de DAC-chip en heeft een spanning van 3,1V met een maximale afwijking van 5% <b>SPEC 5.4</b></p> <p>De voedingschip gaan niet kapot bij de normal operation van het elektronisch systeem. <b>SPEC 5.3</b></p>
Testprocedure:	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Sluit de PCB aan op de voedingsbron met 30V en een stroombegrenzing van 100mA.</li> <li>2. Zet de voeding aan en meet met de multimeter op de 3.1V uitgang van de lineaire spanningsregelaar.</li> <li>3. Controleer of de testuitvoer voldoet aan de criteria.</li> <li>4. Verrifieer of alle voedingschips de gewenste spanningen nog kunnen genereren bij normal- operation.</li> </ol>
Testresultaat:	Zie testresultaat
Test geslaagd:	<p>De test is geslaagd als:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• De testuitvoer voldoet aan de criteria</li> </ul>

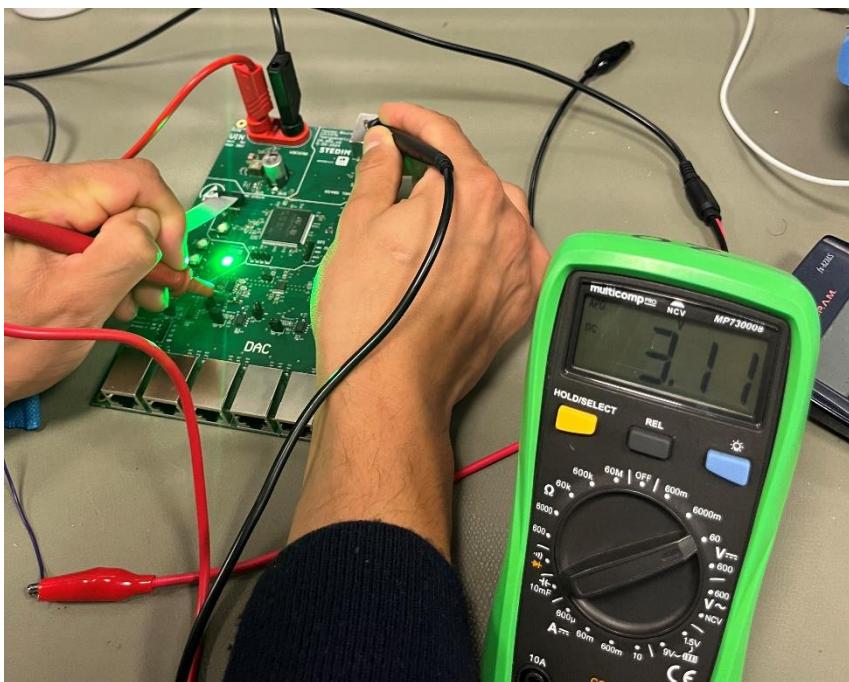
### 1.6.4 Testresultaat en conclusie 2

#### ➤ Testinvoer



Figuur 25, testinvoer van testcase 2

#### ➤ Testuitvoer



Figuur 26 De spanning gemeten op de uitgang van de lineaire spanningsregelaar (3,11V).

#### Conclusie

De test is **geslaagd**, omdat de testuitvoer voldoet aan de criteria beschreven in de testcase

---

# Bijlage G: Integratie testfase

DA3-project Stedin

---

*Realisatiefase testsysteem*

<b>Auteur:</b>	Younes Boulmani
<b>Stagedocent:</b>	De heer Fogarty
<b>Bedrijfsbegeleiders:</b>	Mark Burghout en Koen Peelen
<b>Titel:</b>	Integratie testfase
<b>Datum van uitgifte:</b>	15-06-2024

## Inhoud

1	Integratie testfase .....	207
1.1	Integratietestrapport .....	207
1.2	Integratietest Voeding en alle deelsystemen .....	208
1.2.1	Testcase .....	208
1.2.2	Testresultaat en conclusie 1 .....	209
	Conclusie .....	209
1.3	Integratietest Microcontroller en DAC (SPI) .....	210
1.3.1	Testcase .....	210
1.3.2	Testresultaat en conclusie 1 .....	211
	Conclusie .....	211
1.4	Integratietest Userinterface en Microcontroller .....	212
1.4.1	Testcase .....	212
1.4.2	Testresultaat en conclusie 1 .....	214
	Conclusie .....	214
1.5	Integratietest microcontroller en RS485-transceiverchip .....	215
1.5.1	Testcase .....	215
1.5.2	Testresultaat en conclusie 1 .....	216
	Conclusie .....	216

## Versie Historiek

Revisie	Datum	Auteur	Omschrijving
1.0	14-06-2024	Younes Boulmani	Eerste opzet integratietestfase
1.1	15-06-2024	Younes Boulmani	Integratietestcases beschreven
1.2	31-10-2024	Younes Boulmani	Integratietestresultaten toegevoegd

## 1 Integratie testfase

In dit hoofdstuk worden alle integratie testen beschreven en zijn ook de resultaten weergegeven van alle integratietests. Daarnaast is er ook een integratietestrapport opgenomen.

### 1.1 Integratietestrapport

Integratietest↓	Specificaties	Behaald?
Voeding en alle deelsystemen	<b>ISPEC 1.1:</b> De voeding voorziet de microcontroller met een spanning van 3.3 Volt.	Behaald
	<b>ISPEC 1.2:</b> De voeding voorziet de DAC met een spanning van 3.3, -3.3Volt en 3.1Volt.	Behaald
	<b>ISPEC 1.3:</b> De voeding voorziet de RS485- tranceiverchip met een spanning van 3.3 Volt.	Behaald
Integratietest Microcontroller en DAC (SPI)	<b>ISPEC 2.1:</b> Het berekende gewenste signaal wordt omgezet naar een analoog signaal.	Behaald
Integratietest Userinterface en Microcontroller	<b>ISPEC 3.1:</b> De userinterface stuurt een laag signaal van 0 volt naar de microcontroller als startsignaal.	Behaald
	<b>ISPEC 3.2:</b> De userinterface stuurt een laag signaal van 0 volt naar de microcontroller als stopsignaal.	Behaald
	<b>ISPEC 3.3:</b> De userinterface stuurt een laag signaal van 0 volt naar de microcontroller als pauzeersignaal.	Behaald
	<b>ISPEC 3.4:</b> De userinterface zendt blauw licht als de status van het testsysteem "gereed" is.	Behaald
	<b>ISPEC 3.5:</b> De userinterface zendt groen licht uit als de status van het testsysteem "testprocedure gestart" is.	Behaald
	<b>ISPEC 3.6:</b> De userinterface zendt groen knipperend licht uit als de status van het testsysteem "testprocedure gepauzeerd" is.	Behaald
	<b>SPEC 3.7:</b> De userinterface zendt blauw knipperend licht uit als de status van het testsysteem "testprocedure voltooid" is.	Behaald
	<b>ISPEC 3.8:</b> De userinterface zendt rood licht uit als de status van het testsysteem "testprocedure gestopt" is.	Behaald
Integratietest - Microcontroller en RS485-transceiverchip	<b>ISPEC 4.1:</b> De microcontroller kan data verzenden via het Modbus-protocol.	Niet uitgevoerd
	<b>ISPEC 4.2:</b> De microcontroller kan data ontvangen via het Modbus-protocol.	Niet uitgevoerd

## 1.2 Integratietest Voeding en alle deelsystemen

### 1.2.1 Testcase

Integratietest Voeding en alle deelsystemen	Beschrijving
Requirement/ Specificatie:	<p><b>ISPEC 1.1:</b> De voeding voorziet de microcontroller met een spanning van 3.3 Volt.</p> <p><b>ISPEC 1.2:</b> De voeding voorziet de DAC met een spanning van 3.3, -3.3Volt en 3.1Volt.</p> <p><b>ISPEC 1.3:</b> De voeding voorziet de RS485- tranceiverchip met een spanning van 3.3 Volt.</p>
Voorwaarden:	<ul style="list-style-type: none"> <li>• PCB van het elektronisch systeem.</li> <li>• Voedingsbron (U min. 10 en max. 30V en I min. 100mA).</li> <li>• Multimeter (die spanningen kan meten tot 30V).</li> </ul>
Testinvoer:	Spanning van 10V en 30V.
Testuitvoer:	<ul style="list-style-type: none"> <li>• De waarden gemeten door de multimeter bij verschillende deelsystemen</li> </ul>
Criteria:	De gemeten waarden door de multimeter voldoen aan de specificaties van de betreffende deelsystemen +- 5%.
Testprocedure:	<ol style="list-style-type: none"> <li>4. Sluit de PCB aan op de voedingsbron met 10V en een stroombegrenzing van 100mA.</li> <li>5. Zet de voeding aan en meet met de multimeter de spanning op de volgende punten:           <ul style="list-style-type: none"> <li>○ Microcontroller</li> <li>○ DAC (3.3V, -3.3V, 3.1V)</li> <li>○ RS485-transceiverchip</li> </ul> </li> <li>6. Controleer of de gemeten waarden voldoen aan de criteria voor elk deelsysteem.</li> <li>7. Zet de voeding vervolgens op 30V.</li> <li>8. Herhaal de metingen met de multimeter op dezelfde punten.</li> <li>9. Controleer opnieuw of de gemeten waarden voldoen aan de criteria voor elk deelsysteem.</li> </ol>
Testresultaat:	Zie {1.2.2}
Test geslaagd:	<p>De test is geslaagd als:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• De testuitvoer voldoet aan de criteria</li> </ul>

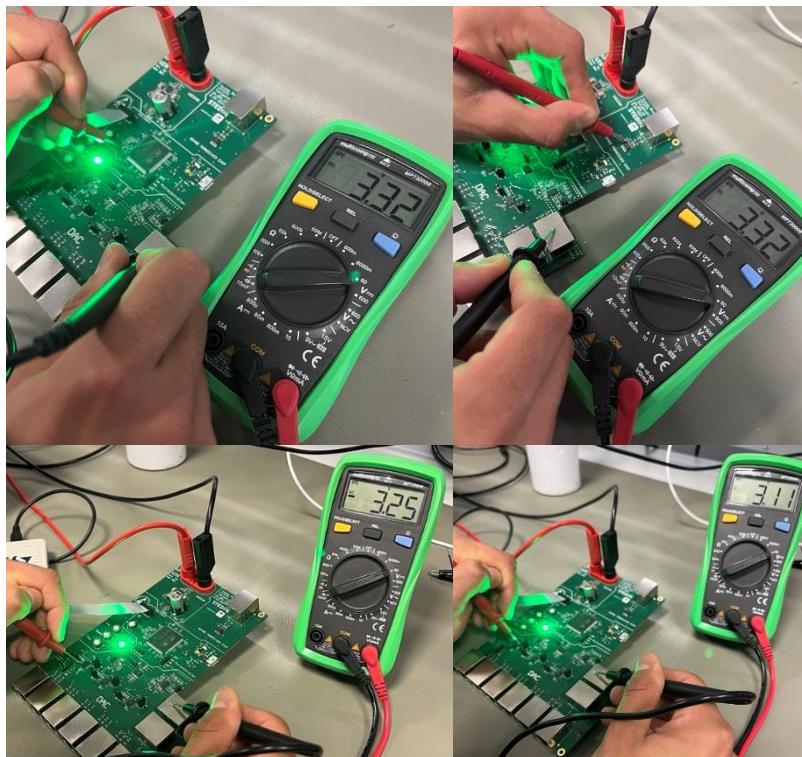
## 1.2.2 Testresultaat en conclusie 1

### ➤ Testinvoer



Figuur 1, een spanning van 10V als testinvoer en een spanning van 30V.

### ➤ Testuitvoer



Figuur 2, De gemeten spanningen bij de deelsystemen

### Conclusie

De test is **geslaagd**, omdat de testuitvoer voldoet aan de criteria beschreven in de testcase.

### 1.3 Integratietest Microcontroller en DAC (SPI)

#### 1.3.1 Testcase

Integratietest Microcontroller en DAC (SPI)	Beschrijving
<b>Requirement/ Specificatie:</b>	<b>ISPEC 2.1:</b> Het berekende gewenste signaal wordt omgezet naar een analog signaal.
<b>Voorwaarden:</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>PCB van het elektronisch systeem.</li> <li>Voedingsbron (U min. 10 en max. 30V en I min. 100mA).</li> <li>Firmware voor de PCB, "DAC8564_3_FASE_V2"<sup>7</sup>.</li> <li>STLINK V3 en JTAG-connector kabel.</li> <li>Oscilloscoop (minimaal 3 kanaals) met probekabels.</li> <li>Seriële monitor.</li> <li>Een PC met de volgende software geïnstalleerd:           <ul style="list-style-type: none"> <li>STM32CubeIDE</li> </ul> </li> </ul>
<b>Testinvoer:</b>	- Het berekende gewenste signaal
<b>Testuitvoer:</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Analoog signaal gemeten door de oscilloscoop.</li> </ul>
<b>Criteria:</b>	Het gemeten analoge signaal voldoet aan de specificaties van het berekende gewenste signaal +- 6%.
<b>Testprocedure:</b>	<ol style="list-style-type: none"> <li>Sluit de PCB aan op de voedingsbron met 10V en een stroombegrenzing van 100mA.</li> <li>Verbind de PCB met de STLINK door middel van de STDC14-connectkabel.</li> <li>In het STM32Cube IDE-project "DAC8564_3_FASE_V2" wordt een stroomscenario gesimuleerd van 10.000 Ampère RMS. Het berekende gewenste signaal voor het eerste scenario (de eerste 15 seconden) is een sinusgolf van 1 Vrms, 2,83 Vpp (50 Hz). Noteer deze waarde om later te vergelijken met de gemeten waarde van de oscilloscoop.</li> <li>Zet de oscilloscoop aan en stel deze in op 500mV per divisie en de tijdschaal op 5 ms per divisie.</li> <li>Debug het STM32Cube IDE-project DAC8564_3_FASE_V2 en run de code.</li> <li>Meet het analoge signaal op de DAC-uitgangsterminal met de oscilloscoop.</li> <li>Controleer of de gemeten waarde van de oscilloscoop overeenkomt met het berekende gewenste signaal.</li> </ol>
<b>Testresultaat:</b>	Zie {1.3.2}
<b>Test geslaagd:</b>	<p>De test is geslaagd als:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>De testuitvoer voldoet aan de criteria</li> </ul>

<sup>7</sup> Deze STM32 Cube IDE-project kun je terugvinden in de Git-repository onder het pad: STM32cube\_IDE/Unitests/DAC/DAC8564\_3\_FASE\_V2.

### 1.3.2 Testresultaat en conclusie 1

#### ➤ Testinvoer

```
) #define SPI_TIMEOUT 1000
) #define DAC8564_SEQUENTIANLY_WRITE_UPDATE 0x10
) #define VREF 2.5
) #define AMPLITUDE 0.5
) #define OFFSET (VREF / 2)
) #define PI 3.14159265
) #define SAMPLE_RATE 48000
) #define FREQUENCY 50
) #define NUM_SAMPLES (SAMPLE_RATE / FREQUENCY)
) #define PHASE_SHIFT_120_DEG (2.0 * PI / 3.0) // 120-degree phase shift
) #define PHASE_SHIFT_240_DEG (4.0 * PI / 3.0)
/* USER CODE END PD */
```

Figuur 3, het gewenste signaal heeft een amplitude van 0.5V en dus (1 Vpp)

#### ➤ Testuitvoer



Figuur 4, Het gemeten analoge signaal (1,03 Vpp)

### Conclusie

De test is geslaagd, omdat de testuitvoer voldoet aan de criteria beschreven in de testcase.

## 1.4 Integratietest Userinterface en Microcontroller

### 1.4.1 Testcase

Integratietest Userinterface en Microcontroller	Beschrijving
Requirement/ Specificatie:	<p><b>ISPEC 3.1:</b> De userinterface stuurt een laag signaal van 0 volt naar de microcontroller als startsignaal.</p> <p><b>ISPEC 3.2:</b> De userinterface stuurt een laag signaal van 0 volt naar de microcontroller als stopsignaal.</p> <p><b>ISPEC 3.3:</b> De userinterface stuurt een laag signaal van 0 volt naar de microcontroller als pauzeersignaal.</p> <p><b>ISPEC 3.4:</b> De userinterface zendt blauw licht uit als de status van het testsysteem “gereed” is.</p> <p><b>ISPEC 3.5:</b> De userinterface zendt groen licht uit als de status van het testsysteem “testprocedure gestart” is.</p> <p><b>ISPEC 3.6:</b> De userinterface zendt groen knipperend licht uit als de status van het testsysteem “testprocedure gepauzeerd” is.</p> <p><b>SPEC 3.7:</b> De userinterface zendt blauw knipperend licht uit als de status van het testsysteem “testprocedure voltooid” is.</p> <p><b>ISPEC 3.8:</b> De userinterface zendt rood licht uit als de status van het testsysteem “testprocedure gestopt” is.</p>
Voorwaarden:	<ul style="list-style-type: none"> <li>• PCB van het elektronisch systeem.</li> <li>• Voedingsbron (U min. 10 en max. 30V en I min. 100mA).</li> <li>• Firmware voor de PCB.</li> <li>• STLINK V3 en JTAG-connector kabel.</li> <li>• Oscilloscoop met probekabels.</li> <li>• Seriële monitor.</li> <li>• Een PC met de volgende software geïnstalleerd: <ul style="list-style-type: none"> <li>◦ STM32CubeIDE</li> </ul> </li> </ul>
Testinvoer:	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Starts, pauzeer en stopsignalen via de userinterface.</li> <li>- De status van het systeem.</li> </ul>
Testuitvoer:	<ul style="list-style-type: none"> <li>• De waarde van het signaal gemeten door de oscilloscoop.</li> <li>• De status van het licht van de RGB LED.</li> </ul>
Criteria:	<p>Het gemeten signaal gemeten door de oscilloscoop komt overeen met de verwachte starts, pauzeer en stopsignalen <b>ISPEC 3.1 t/m ISPEC 3.3</b>.</p> <p>De kleur van het licht van de RGB LED komt overeen met de status van het testsysteem <b>ISPEC 3.4 t/m ISPEC 3.8</b>.</p>
Testprocedure:	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Sluit de PCB aan op de voedingsbron met 10V en een stroombegrenzing van 100mA.</li> <li>2. Verbind de PCB met de STLINK door middel van de STDC14-connectkabel.</li> <li>3. Debug het STM32Cube IDE-project “integratie_test_userinterface” en run de code.</li> <li>4. Als de code geïnitialiseerd is en de status “gereed” is, controleer of de RGB-LED het juiste lichtsignaal uitzendt (blauw licht).</li> <li>5. Zet de oscilloscoop op trigger mode en falling edge.</li> <li>6. Leg de probe tussen de uitgang van de startknop en GND, druk op de startknop en verifieer of het resultaat op de oscilloscoop voldoet aan de criteria.</li> <li>7. Controleer of de RGB-LED de juiste lichtstatus uitzendt (groen licht).</li> </ol>

	<ol style="list-style-type: none"><li>8. Herhaal stap 6 en 7 voor de pauzeerknop (groen knipperend licht) en de stopknop (rood licht).</li><li>9. Als de status voltooid is controleer of de RGB de juiste lichtstatus uitzendt (blauw knipperend)</li></ol>
<b>Testresultaat:</b>	Zie {1.4.2}
<b>Test geslaagd:</b>	De test is geslaagd als: <ul style="list-style-type: none"><li>• De testuitvoer voldoet aan de criteria</li></ul>

#### 1.4.2 Testresultaat en conclusie 1

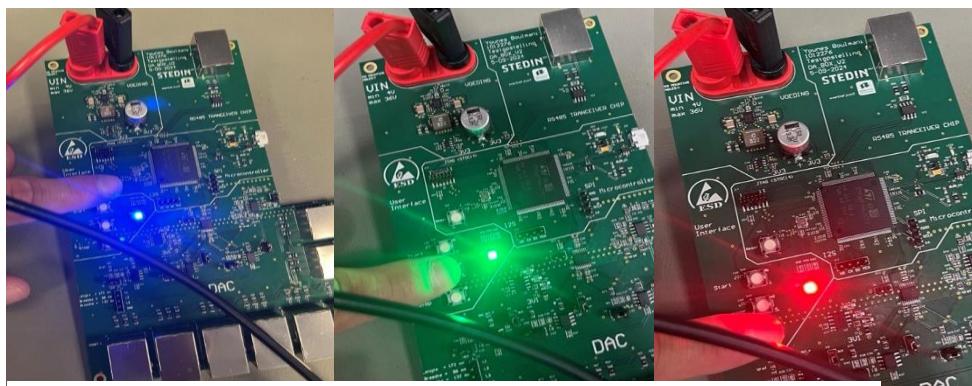
##### ➤ Testinvoer

In figuur 6 is de status te zien van elke systeem en in figuur 5 is de testinvoer te zien waarbij de testengineer op de start-, pauzeer- en stopknop drukt.

```

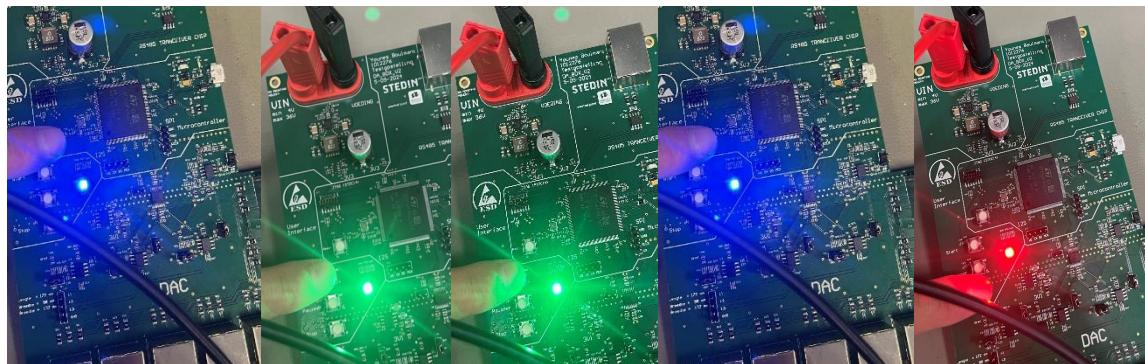
vv
09     STATUS (initial_Status, i
10         case STATUS_GEREED:
11             zet_blaauw_licht_aan();
12             break;
13             break;
14         case STATUS_TEST_GEPAUZEERD:
15             groen_knipperend();
16             break;
17         case STATUS_TEST_GESTOPT:
18             zet_rood_licht_aan();
19             break;
20
21     case STATUS_TEST_GESTART:
22         zet_groen_licht_aan();
23         break;
24         ...
25     case STATUS_TEST_VOLTOOID:
26         blauw_knipperend();
27         break;
28
29 
```

Figuur 6, de status van het systeem.



Figuur 5, Starts, pauzeer en stopsignalen via de userinterface

##### ➤ Testuitvoer



Figuur 7, De lichtstatus van de RGB LED bij elke status



Figuur 8, de testuitvoer bij het indrukken van de start-, pauzeer- en stopknop (een laag signaal 0V)

#### Conclusie

De test is geslaagd, omdat de testuitvoer voldoet aan de criteria beschreven in de testcase.

## 1.5 Integratietest microcontroller en RS485-transceiverchip

Deze integratietest is **niet uitgevoerd**, omdat de afstudeerde zich heeft gericht op het realiseren van de belangrijkste eisen.

### 1.5.1 Testcase

Integratietest - Microcontroller en RS485-transceiverchip	Beschrijving
Requirement/ Specificatie:	<b>ISPEC 4.1:</b> De microcontroller kan data verzenden via het Modbus-protocol. <b>ISPEC 4.2:</b> De microcontroller kan data ontvangen via het Modbus-protocol.
Voorwaarden:	<ul style="list-style-type: none"> <li>PCB van het elektronisch systeem.</li> <li>Voedingsbron (U min. 10 en max. 30V en I min. 100mA).</li> <li>Firmware voor de PCB.</li> <li>Logic analyzer en bijbehorend softwareprogramma.</li> <li>STLINK V3 en JTAG-connector kabel.</li> <li>Seriële monitor.</li> <li>Een PC met de volgende software geïnstalleerd:           <ul style="list-style-type: none"> <li>STM32CubeIDE</li> <li>Modbus software voor testen</li> </ul> </li> </ul>
Testinvoer:	<ul style="list-style-type: none"> <li>Data verzonden van de microcontroller via het Modbus-protocol.</li> <li>Data ontvangen door de microcontroller via het Modbus-protocol.</li> </ul>
Testuitvoer:	<ul style="list-style-type: none"> <li>De waarde van het signaal gemeten door de logic analyzer.</li> <li>De ontvangen data gemeten door de seriële monitor.</li> </ul>
Criteria:	De gemeten data door de logic analyzer komt overeen met de verzonden data. De ontvangen data via de seriële monitor komt overeen met de verwachte data.
Testprocedure:	<ol style="list-style-type: none"> <li>Sluit de PCB aan op de voedingsbron met 10V en een stroombegrenzing van 100mA.</li> <li>Verbind de PCB met de STLINK door middel van de STDC14-connectkabel.</li> <li>Debug het STM32Cube IDE-project en stel de firmware in voor het verzenden en ontvangen van data via het Modbus-protocol.</li> <li>Verbind de UART_TX- en RX-lijnen van de microcontroller met de RS485-transceiverchip.</li> <li>Open het Logic Analyzer-programma en zet een trigger op de UART-lijnen.</li> <li>Voer de firmware uit en verstuur data van de microcontroller via het Modbus-protocol.</li> <li>Meet de verzonden data met de logic analyzer en controleer of deze overeenkomt met de verwachte data.</li> <li>Gebruik de Modbus-software om data naar de microcontroller te sturen via het Modbus-protocol.</li> <li>Verifieer de ontvangen data met de seriële monitor en controleer of deze overeenkomt met de verwachte data.</li> </ol>
Testresultaat:	Zie <b>{1.5.2}</b> .
Test geslaagd:	De test is geslaagd als: <ul style="list-style-type: none"> <li>De testuitvoer voldoet aan de criteria</li> </ul>

## 1.5.2 Testresultaat en conclusie 1

➤ **Testinvoer**➤ **Testuitvoer****Conclusie**

Deze integratietest is **niet uitgevoerd**, omdat de afstudeerde zich heeft gericht op het realiseren van de belangrijkste eisen.

---

# Bijlage H: Acceptatie testfase

DA3-project Stedin

---

*Realisatiefase testsysteem*

<b>Auteur:</b>	Younes Boulmani
<b>Stagedocent:</b>	De heer Fogarty
<b>Bedrijfsbegeleiders:</b>	Mark Burghout en Koen Peelen
<b>Titel:</b>	Acceptatie testfase
<b>Datum van uitgifte:</b>	17-10-2024

## Inhoud

1	Acceptatie testfase .....	220
1.1	Testomgeving.....	220
1.2	Hardware .....	220
1.3	Firmware.....	220
1.4	Acceptatietest 1: Interface met testengineer .....	221
1.4.1	Testcase 1.....	221
1.4.2	Testcase rapport 1.....	223
1.4.3	Testresultaat en conclusie.....	224
1.4.3.1	Testresultaat en conclusie 1 .....	224
	Conclusie .....	225
1.4.3.2	Testresultaat en conclusie 2 .....	226
	Conclusie .....	227
1.4.3.3	Testresultaat en conclusie 3 .....	227
	Conclusie .....	228
1.5	Acceptatie test 2 : Communicatie en Rapportage.....	229
1.5.1	Testcase 2.....	229
1.5.2	Testcase rapport 2.....	230
1.5.3	Testresultaat en conclusie.....	231
	Conclusie .....	233
1.6	Acceptatie test 3: Testscenario instellingen en simulatienuwkeurigheid .....	233
1.6.1	Testcase 3.....	233
1.6.2	Testcase rapport 3.....	235
1.6.3	Testresultaat en conclusie.....	236
	Conclusie .....	238
1.6.4	Testcase 4.....	239
1.6.5	Testcase rapport 4.....	240
1.6.6	Testresultaat en conclusie.....	241
	Conclusie .....	242
1.7	Acceptatietest 5: Niet-functionele Eisen .....	243
1.7.1	Testcase 5.....	243
1.7.2	Testcase rapport 5.....	244
1.7.3	Testresultaat en conclusie.....	245
	Conclusie .....	246
1.8	Acceptatietest rapport.....	247

## Versie Historiek

Revisie Datum	Auteur	Omschrijving
1.0	15-06-2024	Younes Boulmani
1.1	17-06-2024	Younes Boulmani
1.2	1-10-2024	Younes Boulmani
1.3	17-10-2024	Younes Boulmani

## 1 Acceptatie testfase

In dit hoofdstuk worden alle acceptatie testen beschreven en zijn ook de resultaten weergegeven van alle acceptatietesten.

### 1.1 Testomgeving

De testen wordt uitgevoerd in het testlab van het Smart Device Team van Stedin in Delft. Hier is de volgende apparatuur aanwezig:

- Labvoeding (0-30Vdc)
- Oscilloscoop
- Smart Devices

### 1.2 Hardware

De test uitvoerder heeft de volgende hardware nodig om de testcases uit te voeren:

- PCB van het testsysteem
- Voeding (min. 4V, max. 30V, min. 100mA)
- Oscilloscoop (minimaal 3 kanalen, 2mV/divisie)
- Smart Device
- USB A naar micro B-kabel
- 9 ethernet Kabels (UTP).
- STLINK V3 en JTAG-connector
- PC
- Stopwatch/ Klok
- Dali BOX display (voor uitlezen van de MEM101)
- Meetlint
- Weegschaal

### 1.3 Firmware

De test uitvoerder heeft de volgende firmware nodig om de testcases uit te voeren.

- STM32CubeIDE
- Python versie 3
- Het STM32CubeIDE project “Testopstelling\_DA\_BOX\_STEDIN\_V2” [[LINK REPOSITORY](#)]
- Het GUI python bestand “Test\_GUI\_Code” [[LINK REPOSITORY](#)]

## 1.4 Acceptatietest 1: Interface met testengineer

In deze paragraaf wordt de acceptatietest, resultaat en conclusie beschreven voor de requirements die gerelateerd zijn met de interface tussen de testengineer.

### 1.4.1 Testcase 1

Acceptatietest 1: Testprocedure Bediening	Beschrijving
Requirement/ Specificatie:	<b>REQ-1.1[MH]:</b> De testengineer kan na het instellen van alle gewenste testscenario's de testprocedure laten starten. <b>REQ-1.2[MH]:</b> De testengineer kan de testprocedure op een willekeurig moment laten stoppen. <b>REQ-1.3[MH]:</b> De testengineer kan de testprocedure op een willekeurig moment laten pauzeren. <b>REQ-1.4[SH]:</b> De standaard default testprocedure mag niet langer duren dan een kwartier. <b>REQ-2.5 [CH]:</b> De testengineer kan een standaardtestprocedure initiëren, waarbij alle testscenario's en bijbehorende instellingen uit tabel 1 automatisch worden verzonden. <b>REQ-4.1[CH]:</b> Het testsysteem geeft een visuele indicatie wanneer het testsysteem gereed is voor gebruik. <b>REQ-4.2[CH]:</b> Het testsysteem geeft een visuele indicatie wanneer het gestart is met de testprocedure. <b>REQ-4.3[CH]:</b> Het testsysteem geeft een visuele indicatie wanneer de testprocedure voltooid is. <b>REQ-4.4[CH]:</b> Het testsysteem geeft een visuele indicatie wanneer de testprocedure gepauzeerd is. <b>REQ-4.5[CH]:</b> Het testsysteem geeft een visuele indicatie wanneer het gestopt is met de testprocedure. <b>REQ-5.1[MH]:</b> Het testsysteem geeft het actieve testscenario weer aan de gebruiker.
Voorwaarden:	<ul style="list-style-type: none"> <li>• PCB van het systeem</li> <li>• Voeding (min. 4V, max. 30V, min. 100mA)</li> <li>• Oscilloscoop (minimaal 3 kanalen, 2mV/divisie)</li> <li>• Firmware voor de PCB, "Testopstelling_DA_BOX_STEDIN_V2"<sup>8</sup></li> <li>• Het GUI python bestand opgeslagen in de PC.</li> <li>• Een PC met de volgende software geïnstalleerd:           <ul style="list-style-type: none"> <li>◦ STM32CubeIDE.</li> <li>◦ Python</li> </ul> </li> <li>• STLINK V3 en JTAG-connector</li> <li>• USB A naar micro B-kabel</li> <li>• Stopwatch/ Klok</li> </ul>
Testinvoer:	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Standaardtestprocedure.</li> <li>- Starts-, pauzeer- en stopsignalen via de userinterface.</li> <li>- Actieve testscenario's tijdens de procedure.</li> </ul>
Testuitvoer:	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Reactie van het testsysteem na de initiatie van de standaardtestprocedure.</li> </ul>

<sup>8</sup> Deze STM32 Cube IDE-project kun je terugvinden in de Git-repository AFS30\_testsysteem\_Stedin onder het pad: STM32cube\_IDE/Final code

	<ul style="list-style-type: none"> <li>De simulatierespons van het testsysteem op start-, pauzeer- en stopsignalen.</li> <li>Visuele indicaties op het systeem.</li> <li>Actief testscenario weergegeven aan de gebruiker.</li> <li>Tijdsduur van de standaard testprocedure.</li> </ul>
<b>Criteria:</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Na de initiatie door de testengineer worden de instellingen automatisch verstuurd, en het testsysteem gaat in de status "Gereed". <b>REQ-2.5 [CH]</b></li> <li>- De standaardtestprocedure wordt uitgevoerd binnen 15 minuten (<b>REQ-1.4[SH]</b>)</li> <li>- Het systeem reageert correct op: <ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Start:</b> De testprocedure begint (<b>REQ-1.1[MH]</b>).</li> <li>• <b>Pauzeer:</b> De testprocedure pauzeert (<b>REQ-1.3[MH]</b>)</li> <li>• <b>Stop:</b> De testprocedure stopt volledig (<b>REQ-1.2[MH]</b>).</li> </ul> </li> <li>- De visuele indicaties worden correct weergeven op basis van elke status. <ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Gereed:</b> blauw licht (<b>REQ-4.1[CH]</b>).</li> <li>• <b>Start:</b> groen licht. (<b>REQ-4.2[CH]</b>).</li> <li>• <b>Voltooid:</b> knipperend blauw licht (<b>REQ-4.3[CH]</b>).</li> <li>• <b>Pauzeer:</b> groen knipperend licht (<b>REQ-4.4[CH]</b>).</li> <li>• <b>Gestopt:</b> rood licht (<b>REQ-4.5[CH]</b>).</li> </ul> </li> <li>- Het actieve testscenario komt overeen met de GUI-indicatie (<b>REQ-5.1[MH]</b>).</li> </ul>
<b>Testprocedure</b>	<ol style="list-style-type: none"> <li>Verbind de PCB met de voeding (10V, 100mA).</li> <li>Verbind de PCB met STLINK via de STDC14-connector.</li> <li>Sluit oscilloscoop aan op de DAC-uitgangen (instellen op 2mV/divisie, 5ms/divisie).</li> <li>Debug en run het STM32Cube IDE-project "Testopstelling_DA_BOX_STEDIN_V2".</li> <li>Verbind de PCB met de PC via een micro USB-kabel.</li> <li>Open het Python-bestand op de PC en start de GUI.</li> <li>Initieer de standaardtestprocedure via de GUI.</li> <li>Controleer of het systeem de visuele indicatie geeft dat het klaar is voor de test (blauw licht) en start de test door op "Start" te klikken en verifieer de correcte reactie (groen licht).</li> <li>Controleer of het actieve testscenario gemeten met de oscilloscoop overeenkomt met het actieve scenario weergeven op de GUI. Herhaal deze stap bij elke testscenario.</li> <li>Pauzeer de test en verifieer de correcte reactie (knipperend groen licht).</li> <li>Hervat de test en wacht totdat alle scenario's zijn uitgevoerd (6x20 seconden).</li> <li>Controleer of de test is voltooid en of de tijdsduur binnen 15 minuten ligt.</li> <li>Test het stoppen van de procedure en controleer of het systeem het juiste stopsingaal geeft (rood licht).</li> </ol>
<b>Testresultaat:</b>	<p>Zie testresultaat {Testresultaat en conclusie 1} voor de volgende requirements:  <b>REQ-1.4[SH] REQ-2.5 [CH] REQ-4.1[CH] REQ-4.3[CH]</b></p> <p>Zie testresultaat {Testresultaat en conclusie 2} voor de volgende requirements:</p>

	<p>REQ-1.1[MH] REQ-1.2[MH] REQ-1.3[MH] REQ-4.2[CH] REQ-4.4[CH] REQ-4.5[CH].</p> <p>Zie testresultaat {Testresultaat en conclusie 3} voor de volgende requirement: <b>REQ-5.1[MH]</b></p>
<b>Test geslaagd:</b>	De test is geslaagd als: <ul style="list-style-type: none"><li>• De testuitvoer voldoet aan de criteria</li></ul>

#### 1.4.2 Testcase rapport 1

Hieronder is het testrapport van testcase 1 te zien.

↓Eis	Behaald?
REQ-1.1[MH]	Behaald
REQ-1.2[MH]	Behaald
REQ-1.3[MH]	Behaald
REQ-1.4[SH]	Behaald
REQ-2.5 [CH]	Behaald
REQ-4.1[CH]	Behaald
REQ-4.2[CH]	Behaald
REQ-4.3[CH]	Behaald
REQ-4.4[CH]	Behaald
REQ-4.5[CH]	Behaald
REQ-5.1[MH]	Behaald

Tabel 4, De testcase rapport van test case 1.

### 1.4.3 Testresultaat en conclusie

In deze paragraaf worden alle testresultaten weergegeven van de acceptatietest en wordt een conclusie getrokken over de bijbehorende requirements, of deze behaald zijn.

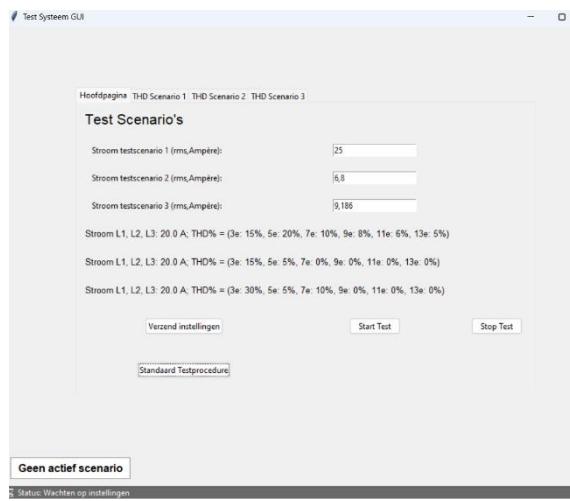
#### 1.4.3.1 Testresultaat en conclusie 1

In deze paragraaf worden de resultaten en de conclusie gegeven voor de requirements: **REQ-1.4[SH]**

**REQ-2.5 [CH] REQ-4.1[CH] REQ-4.3[CH]**

##### ➤ Testinvoer:

De standaard testprocedure is geïnitieerd **REQ-2.5 [CH] REQ-4.1[CH]**.



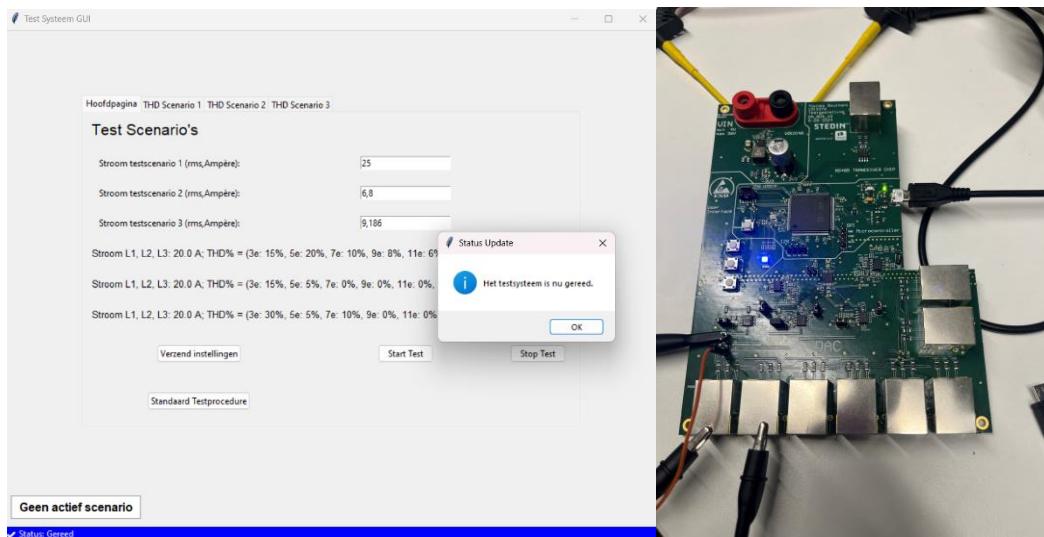
Figuur 1, Testinvoer van **REQ 2.5 en 4.1**

De standaard testprocedure loopt en de begintijd is 13:24:17 **REQ-1.4[SH]**.

Figuur 2 , Testinvoer van **REQ 1.4**

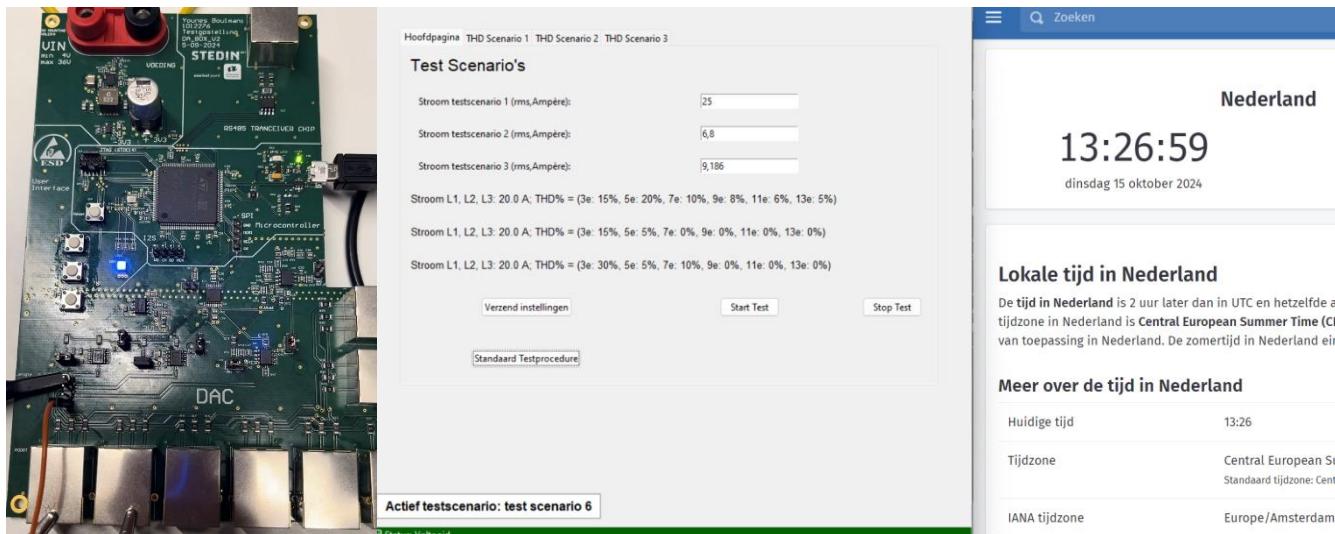
##### ➤ Testuitvoer:

De reactie van het testsysteem na de initiatie van de standaardtestprocedure: de testprocedure is in de status "gereed" gekomen en het testsysteem zendt blauw knipperend licht uit **REQ-2.5 [CH] REQ-4.1[CH]**.



*Figuur 3, De testuitvoer van REQ 2.5 en 4.1*

De standaard testprocedure is voltooid en de eindtijd is 13:26:17. De testprocedure duurde dus 2 minuten en 42 seconden en het testsysteem zendt knipperend blauw licht uit **REQ-1.4[SH] REQ-4.3[CH]**.



*Figuur 4, De testuitvoer van REQ 1.4 en 4.3*

### Conclusie

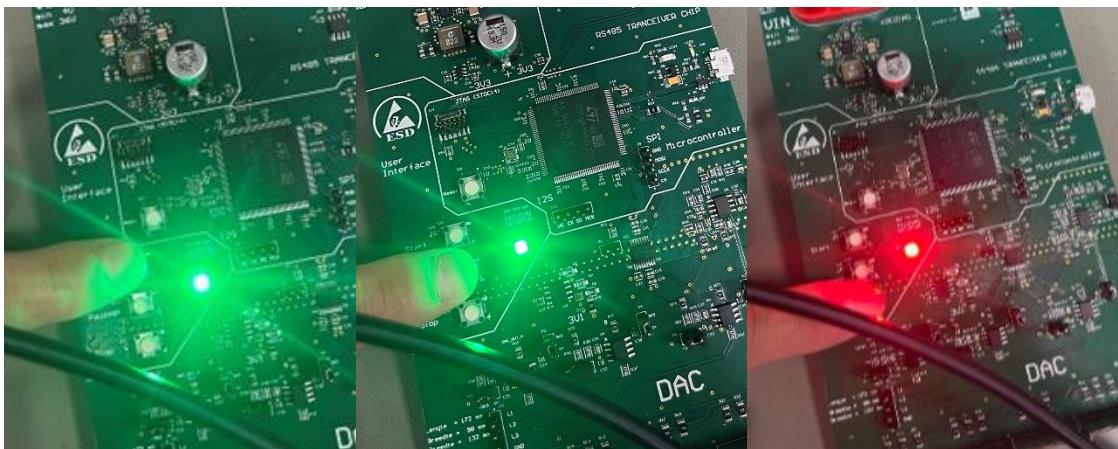
De testprocedure startte na initiatie door de testengineer en duurde minder dan 15 minuten. Dit voldoet aan de criteria voor **REQ-1.4[SH] REQ-2.5 [CH] REQ-4.1[CH] REQ-4.3[CH]**, waardoor beide eisen zijn behaald.

#### 1.4.3.2 Testresultaat en conclusie 2

In deze paragraaf worden de resultaten en de conclusie gegeven voor de requirements: **REQ-1.1[MH]** **REQ-1.2[MH]** **REQ-1.3[MH]** **REQ-4.2[CH]** **REQ-4.4[CH]** **REQ-4.5[CH]**.

##### ➤ Testinvoer:

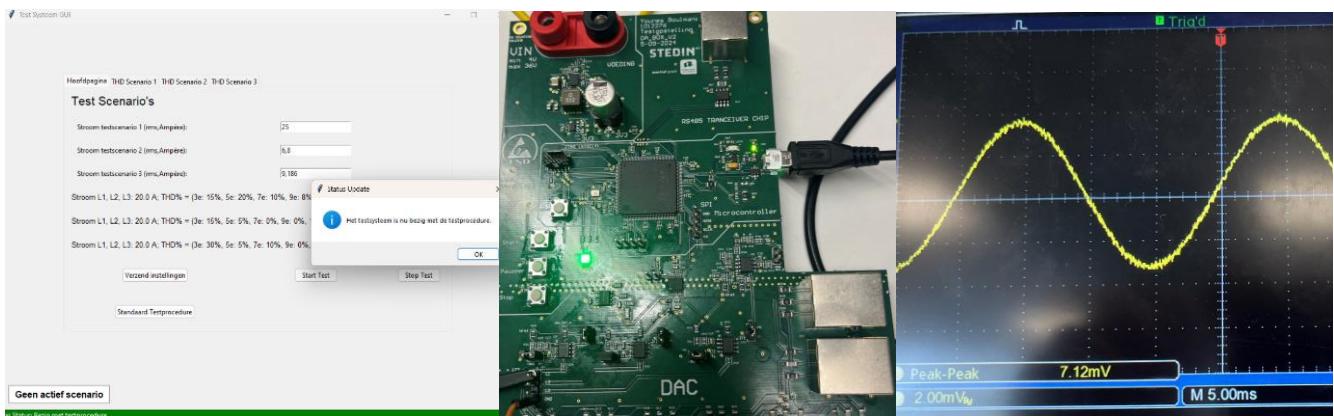
De start-, pauzeer- en stopsignalen zijn afgegeven via de userinterface door de testengineer.



Figuur 5, Testinvoer van **REQ-1.1[MH]** **REQ-1.2[MH]** **REQ-1.3[MH]** **REQ-4.2[CH]** **REQ-4.4[CH]** **REQ-4.5[CH]**.

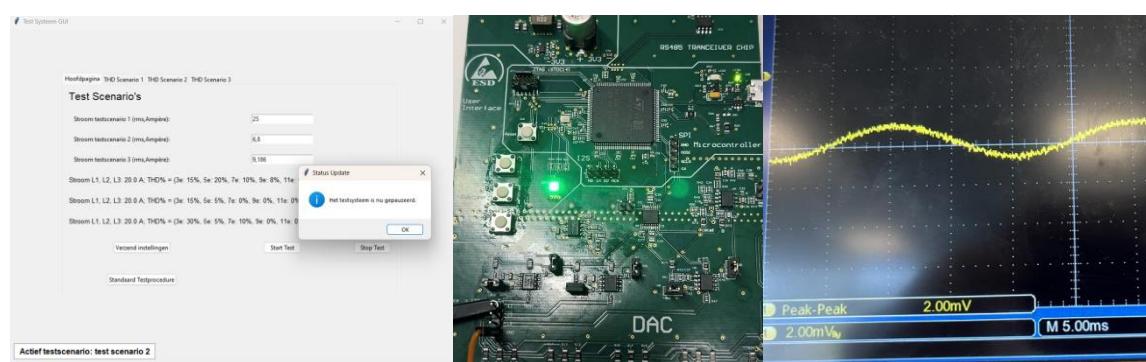
##### ➤ Testuitvoer:

Hieronder zie je de simulatierespons en de visuele indicatie van het testsysteem na het startsignaal **REQ-1.1[MH]** **REQ-4.2[CH]**:



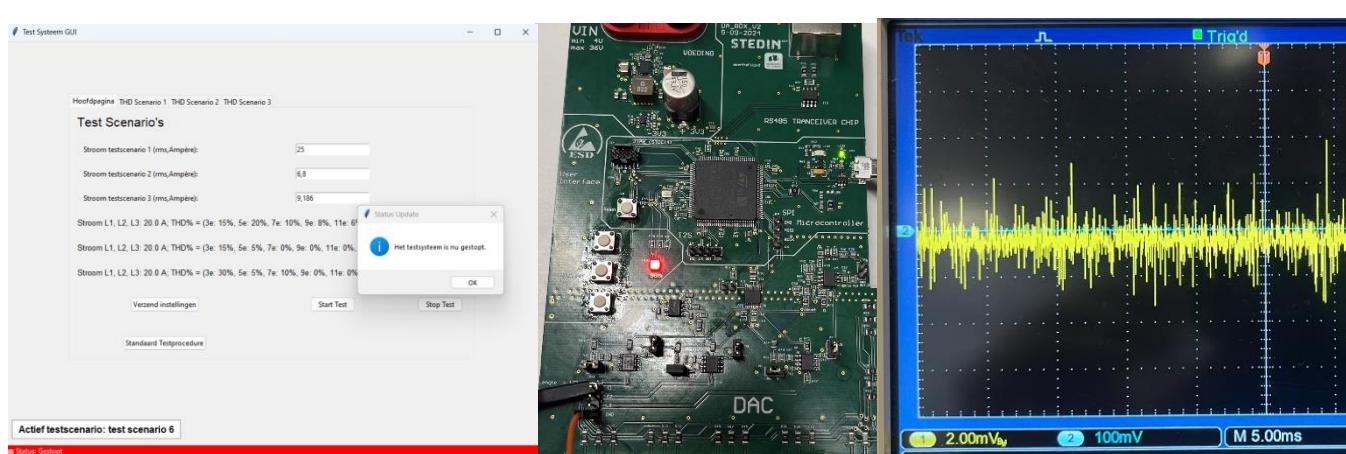
Figuur 6, De testuitvoer van **REQ-1.1** en **4.2**

Hieronder zie je de simulatierespons en de visuele indicatie van het testsysteem na het pauzeersignaal **REQ-1.3[MH]** **REQ-4.4[CH]**:



Figuur 7, De testuitvoer van **REQ-1.3** en **4.4**

Hieronder zie je de simulatierespons en de visuele indicatie van het testsysteem na het stopsignaal **REQ-1.2[MH] REQ-4.5[CH]**:



*Figuur 8, De testuitvoer van REQ- 1.2 en 4.5*

### Conclusie

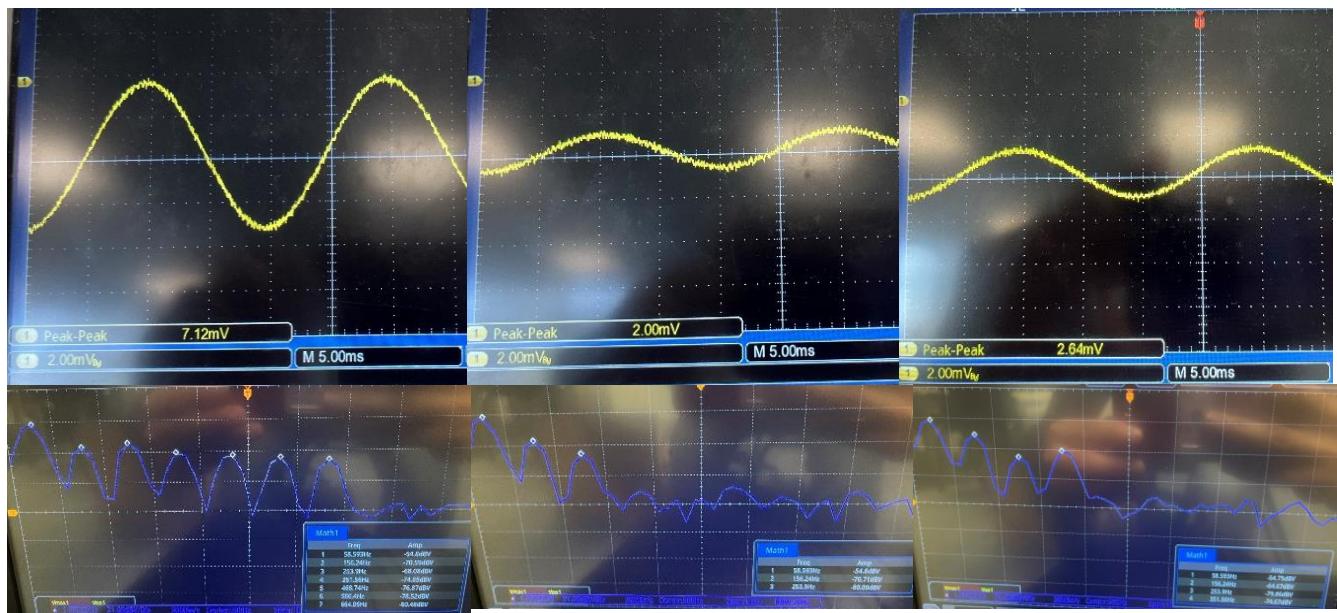
De testuitvoeren van alle requirements voldoen aan de criteria, waardoor alle requirements behaald zijn behaald zijn.

#### 1.4.3.3 Testresultaat en conclusie 3

In deze paragraaf worden de resultaten en de conclusie gegeven voor de requirement: **REQ-5.1[MH]**

##### ➤ Testinvoer

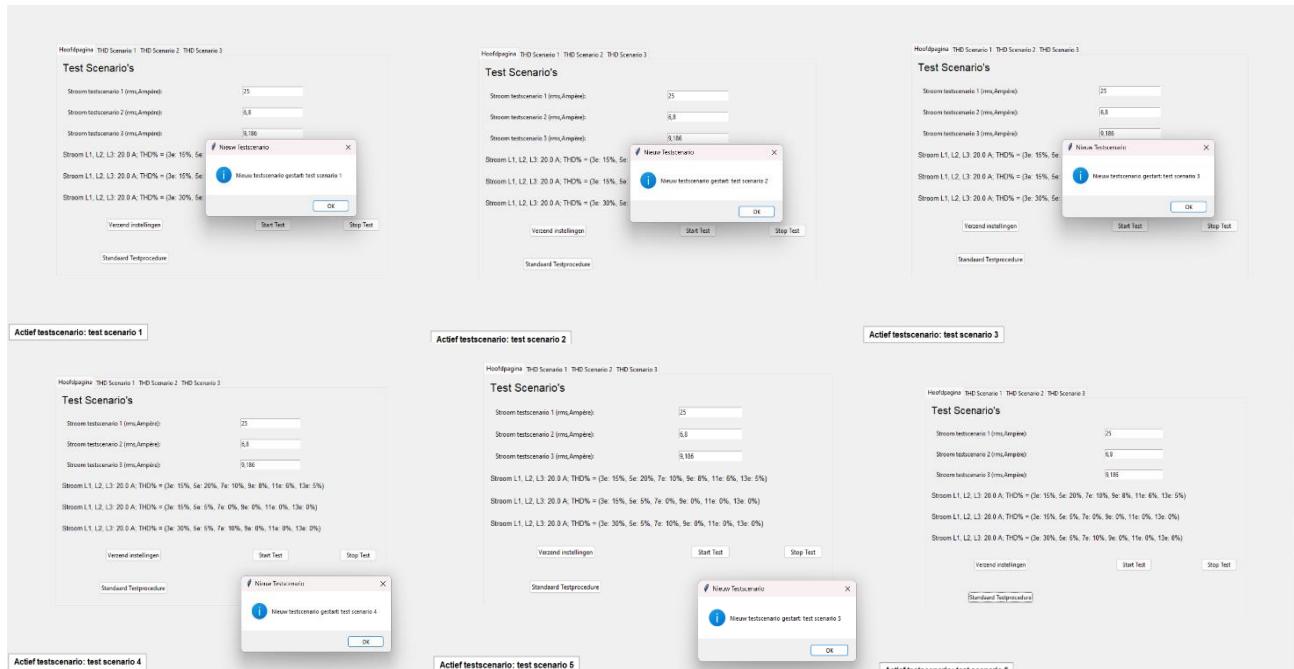
In Figuur 9 worden de actieve testscenario's weergegeven, gemeten met behulp van de oscilloscoop. Van scenario 1 linksboven tot en met scenario 6 rechtsboven **REQ-5.1[MH]**:



*Figuur 9, Testinvoer van REQ 5.1*

➤ **Testuitvoer:**

In Figuur 10 worden de actieve testscenario's van de GUI weergegeven **REQ-5.1[MH]**:



*Figuur 10, De testuitvoer van REQ 5.1*

### Conclusie

De actieve scenario's die tijdens de testprocedure lopen, komen overeen met het testscenario dat wordt weergegeven in de GUI. Elke keer dat het testsysteem van testscenario verandert, ontvangt de testengineer een melding en wordt het actieve testscenario weergegeven. De testuitvoer voldoet aan de criteria, waardoor **REQ-5.1[MH] behaald** is.

## 1.5 Acceptatie test 2 : Communicatie en Rapportage

In deze paragraaf worden de acceptatietest, het testresultaat en de conclusie beschreven voor de requirements die gerelateerd zijn aan de interface tussen het testsysteem en de PC, evenals tussen het testsysteem en het Smart Device.

### 1.5.1 Testcase 2

Communicatie en Rapportage	Beschrijving
Requirement/ Specificatie:	<p><b>REQ-1.5[MH]:</b> Het testsysteem communiceert met de PC volgens het USB-protocol.</p> <p><b>REQ-1.6[CH]:</b> Het testsysteem communiceert met het Smart Device via het Modbus-protocol.</p> <p><b>REQ-3.7[MH]:</b> Het testsysteem is in staat om op 1 poort van de MEM101 de testscenario's te simuleren.</p> <p><b>REQ-3.8[CH]:</b> Het testsysteem is in staat om op 8 poorten van de MEM101 tegelijkertijd de testscenario's te simuleren.</p> <p><b>REQ-6.1[CH]:</b> Het testsysteem genereert een testrapport na afloop van elk testprocedure en stuurt deze door naar de PC.</p> <p><b>REQ-NF2[MH]:</b> Het testsysteem kan verbonden worden met het Smart Device doormiddel van een UTP-kabel.</p>
Voorwaarden:	<ul style="list-style-type: none"> <li>PCB van het systeem</li> <li>Voeding (min. 4V, max. 30V, min. 100mA)</li> <li>Oscilloscoop (minimaal 3 kanalen, 2mV/divisie)</li> <li>Firmware voor de PCB, "Testopstelling_DA_BOX_STEDIN_V2"</li> <li>Het GUI python bestand opgeslagen in de PC.</li> <li>Een PC met de volgende software geïnstalleerd: <ul style="list-style-type: none"> <li>STM32CubeIDE.</li> <li>Python</li> </ul> </li> <li>STLINK V3 en JTAG-connector</li> <li>USB A naar micro B-kabel</li> <li>Smart Device (MEM101)</li> <li>Dali BOX display (voor uitlezen van de MEM101)</li> <li>9 ethernet Kabels (UTP).</li> </ul>
Testinvoer:	- Invoer van testscenario's via de PC (bijvoorbeeld stroom- en THD%-scenario's) voor simulatie op de MEM101.
Testuitvoer:	<ul style="list-style-type: none"> <li>Het uitgelezen testscenario op poort 1 van de MEM101.</li> <li>De uitgelezen testscenario's op alle 8 poorten van de MEM101.</li> <li>Het gegenereerde testrapport na voltooiing van de testprocedure.</li> <li>De reactie van het testsysteem na het verzenden van de testprocedure-instellingen via een USB-kabel.</li> <li>De verbinding tussen het testsysteem en het Smart Device (via UTP-kabel).</li> </ul>
Criteria:	<ul style="list-style-type: none"> <li>De communicatie met de PC en het Smart Device verloopt correct via de respectieve protocollen. <b>REQ-1.5[MH] REQ-1.6[CH].</b></li> <li>Het testscenario op poort 1 van de MEM101 komt overeen met het ingestelde testscenario <b>REQ-3.7[MH]</b>.</li> <li>De testscenario's op alle 8 poorten van de MEM101 komen overeen met de ingestelde testscenario's <b>REQ-3.8[CH]</b>.</li> <li>Testrapporten worden correct gegenereerd en doorgestuurd naar de PC <b>REQ-6.1[CH]</b>.</li> </ul>

	<ul style="list-style-type: none"> <li>De verbinding tussen het testsysteem en het Smart Device is correct via de UTP-kabel <b>REQ-NF2[MH]</b>.</li> </ul>
<b>Testprocedure SPEC 2.2:</b>	<ol style="list-style-type: none"> <li>Sluit de PCB aan op de voedingsbron (10V, 100mA).</li> <li>Verbind de 8 uitgangspoorten van het testsysteem met de ingangspoorten van het Smart Device (MEM101) via UTP-kabels.</li> <li>Verbind de RS485-connector van het testsysteem met de Modbus-poort van het Smart Device met een ethernetkabel.</li> <li>Verbind het Dali BOX-display met het Smart Device om de uitgelezen scenario's weer te geven.</li> <li>Verbind de PCB met de STLINK via de STDC14-connectorkabel.</li> <li>Debug en run het STM32Cube IDE-project "Testopstelling_DA_BOX_STEDIN_V2".</li> <li>Verbind de PCB met de PC via een micro USB-kabel.</li> <li>Open het Python-bestand op de PC en start de GUI.</li> <li>Voer de testscenario's in en klik op "Verzend instellingen".</li> <li>Controleer de reactie van het testsysteem na het verzenden van de instellingen via de USB-kabel en verifieer of dit aan de criteria voldoet.</li> <li>Zodra het testsysteem gereed is, klik op "Start". Lees de testscenario's uit op poort 1 en poort 8 en controleer of deze voldoen aan de criteria. Gebruik de "Pauzeer"-optie indien nodig om meer tijd te hebben voor het uitlezen van alle waarden.</li> <li>Wacht tot de testprocedure voltooid is en controleer of er een testrapport wordt gegenereerd en doorgestuurd naar de PC.</li> </ol>
<b>Testresultaat:</b>	Zie testresultaat <b>{1.5.3}</b> voor de testresultaten en de conclusie met betrekking tot de requirements van deze testcase.
<b>Test geslaagd:</b>	De test is geslaagd als: <ul style="list-style-type: none"> <li>De testuitvoer voldoet aan de criteria</li> </ul>

### 1.5.2 Testcase rapport 2

Hieronder is het testrapport van testcase 2 te zien.

↓Eis	Behaald?
REQ-1.5[MH].	Behaald
REQ-1.6[CH]	Niet Behaald
REQ-3.7[MH]	Behaald
REQ-3.8[CH]	Behaald
REQ-6.1[CH]	Niet Behaald
REQ-NF2[MH]	Behaald

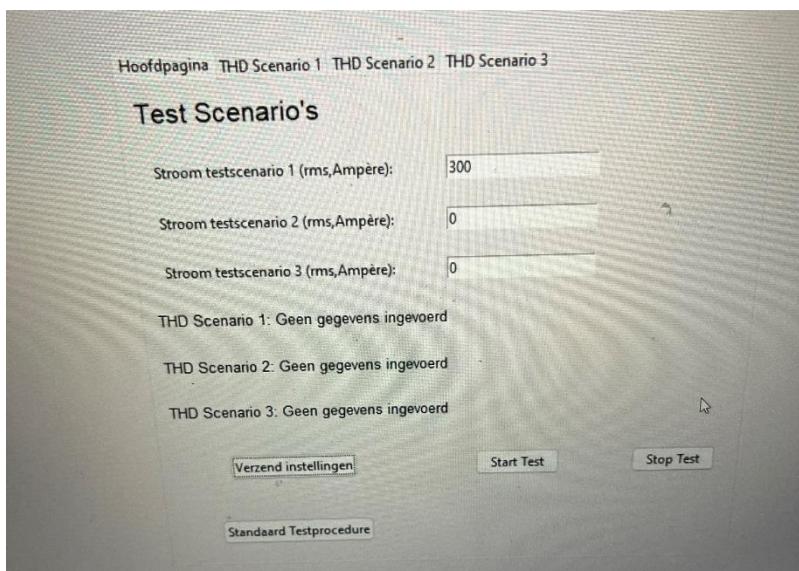
Tabel 5, het testrapport van testcase 2

### 1.5.3 Testresultaat en conclusie

In deze paragraaf worden alle testresultaten van de acceptatietest weergegeven, en wordt een conclusie getrokken over de bijbehorende requirements, waarin wordt bepaald of deze zijn behaald.

#### ➤ Testinvoer

In figuur is de testinvoer te zien. De testengineer heeft hierbij een stroomtestscenario ingevoerd van 300 Ampère.



Figuur 11, testinvoer van testcase

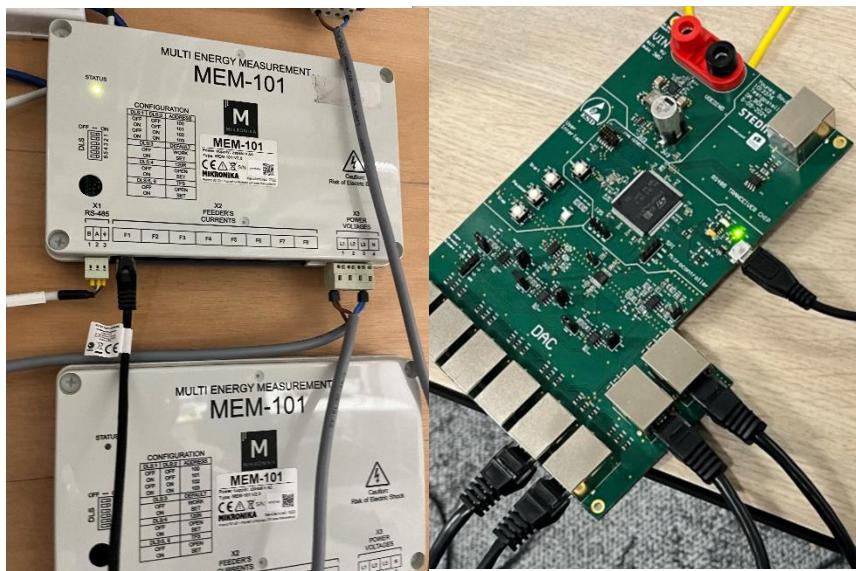
#### ➤ Testuitvoer

Hieronder is de reactie van het testsysteem te zien na het verzenden van de testscenario-instellingen. Het testsysteem heeft de instellingen correct ontvangen en verwerkt, en zendt blauw licht uit als indicatie **REQ-1.5[MH]**.

Hieronder is de verbinding te zien met het Smart Device en het testsysteem **REQ-NF2[MH]**.



Figuur 12, Testuitvoer van REQ 1.5



Figuur 13, testuitvoer van REQ-NF

Hieronder zijn de gemeten testscenario's op alle 8 poorten van de MEM101 te zien, met Feeder 9 als poort 1 en Feeder 16 als poort 8 **REQ-3.7[MH] REQ-3.8[CH]**.



Figuur 14, testuitvoer van REQ 3.7 en 3.8

### Conclusie

De communicatie tussen het testsysteem en de PC verloopt soepel via het USB-protocol en de data wordt correct verwerkt. Het Smart Device is verbonden via UTP-kabels en alle testscenario's voor 300 Ampère zijn succesvol gesimuleerd. De eisen **REQ-1.5[MH]**, **REQ-3.7[MH]**, **REQ-3.8[CH]**, **REQ-NF2[MH]** voldoen aan de criteria en zijn hiermee behaald. Omdat **REQ-1.6[CH]** en **REQ-6.1[CH]** optionele klanteneisen waren en de afstudeerde beperkte tijd had, heeft hij zich gericht op het realiseren van de andere eisen. Hierdoor zijn **REQ-1.6[CH]** en **REQ-6.1[CH]** niet behaald.

### 1.6 Acceptatie test 3: Testscenario instellingen en simulatienuwkeurigheid

In deze paragraaf worden de acceptatietest, het testresultaat en de conclusie beschreven voor de requirements die gerelateerd zijn aan het instellen van de testscenario's van het testsysteem en de nauwkeurigheid van de simulatie.

#### 1.6.1 Testcase 3

Testscenario simulatie	Beschrijving
Requirement/ Specificatie:	<p><b>REQ-2.2[CH]:</b> De testengineer kan de gewenste stroomtestscenario's instellen binnen een bereik van 5 tot 500 Ampère RMS, met stapgroottes van één duizendste.</p> <p><b>REQ-2.3[SH]:</b> De testengineer kan de 3e, 5e en 7e harmonischen van de THD% testscenario's instellen binnen een bereik van 5 tot 50% van de amplitude van de grondharmonische 50 Hz, met een stapgrootte van 1%.</p> <p><b>REQ-2.4[CH]:</b> De testengineer is in staat om alle oneven harmonischen tot en met de 13e in te stellen binnen een bereik van 5 tot 50%, met een stapgrootte van 1%.</p> <p><b>REQ-3.3[CH]:</b> Het testsysteem is in staat om alle stroomtestscenario's te simuleren volgens REQ-2.2 met de maximale afwijking van 6%.</p> <p><b>REQ-3.4[CH]:</b> Het testsysteem is in staat om het gewenste stroom testscenario te simuleren met een maximale afwijking van 3% ten opzichte van het gewenste simulatie signaal.</p> <p><b>REQ-3.5[SH]:</b> Het testsysteem is in staat om het gewenste THD% testscenario's te simuleren met een maximale afwijking van 6% ten opzichte van het ingestelde THD% door de testengineer.</p> <p><b>REQ-3.6[CH]:</b> Het testsysteem is in staat om het gewenste THD% testscenario's te simuleren met een maximale afwijking van 3% ten opzichte van het ingestelde THD% door de testengineer.</p>
Voorwaarden:	<ul style="list-style-type: none"> <li>• PCB van het systeem</li> <li>• Voeding (min. 4V, max. 30V, min. 100mA)</li> <li>• Oscilloscoop (minimaal 3 kanalen, 2mV/divisie)</li> <li>• Firmware voor de PCB, "Testopstelling_DA_BOX_STEDIN_V2"</li> <li>• Het GUI python bestand opgeslagen in de PC.</li> <li>• Een PC met de volgende software geïnstalleerd: <ul style="list-style-type: none"> <li>◦ STM32CubelIDE.</li> <li>◦ Python</li> </ul> </li> <li>• STLINK V3 en JTAG-connector</li> <li>• USB A naar micro B-kabel</li> </ul>
Testinvoer:	<p>Invoer van 6 testscenario's</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Stroomtestscenario's: <ul style="list-style-type: none"> <li>- 500 Ampere (maximum)</li> </ul> </li> </ul>

	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 5 Ampere (minimum)</li> <li>- 250,678 (met duizendste precisie)</li> </ul> <ul style="list-style-type: none"> <li>• THD testscenario's:       <ul style="list-style-type: none"> <li>- I=500 (A) Harmonische 3<sup>e</sup> = 10%, 5<sup>e</sup> = 15%, 7<sup>e</sup> = 12%, 9<sup>e</sup> = 0%, 11<sup>e</sup> = 5%, 13<sup>e</sup> = 8% THD% = 23,62%</li> <li>- I=5 (A) Harmonische 3<sup>e</sup> = 20%, 5<sup>e</sup> = 15%, 7<sup>e</sup> = 17%, 9<sup>e</sup> = 0%, 11<sup>e</sup> = 0%, 13<sup>e</sup> = 0% THD% = 30,23%</li> <li>- I=300 (A) Harmonische 3<sup>e</sup> = 5%, 5<sup>e</sup> = 50%, 7<sup>e</sup> = 0%, 9<sup>e</sup> = 0%, 11<sup>e</sup> = 0%, 13<sup>e</sup> = 0% THD% = 50,25%</li> </ul> </li> </ul>
<b>Testuitvoer:</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• De gemeten test scenario's:       <ul style="list-style-type: none"> <li>- Het sinussignaal gemeten door de oscilloscoop (voor de stroom testscenario's)</li> <li>- De THD% gemeten door de oscilloscoop (voor de THD testscenario's)</li> </ul> </li> </ul>
<b>Criteria:</b>	<p><b>Invoercriteria:</b> De gebruiker is in staat om alle testscenario's correct in te stellen binnen de gespecificeerde bereiken (<b>REQ-2.2[CH]</b>, <b>REQ-2.3[SH]</b>, <b>REQ-2.4[CH]</b>).</p> <p><b>Stroomtestscenario criteria:</b> Het gemeten stroomsignaal komt overeen met het gewenste signaal met een maximale afwijking van 6% (<b>REQ-3.3[CH]</b>) en 3% (<b>REQ-3.4[CH]</b>).</p> <p><b>THD-testscenario criteria:</b> Het gemeten FFT-signaal komt overeen met het gewenste signaal met een maximale afwijking van 6% (<b>REQ-3.5[SH]</b>) en 3% (<b>REQ-3.6[CH]</b>).</p>
<b>Testprocedure</b>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Verbind de PCB met de voeding (10V, 100mA).</li> <li>2. Verbind de PCB met de STLINK via de STDC14-connector.</li> <li>3. Sluit de oscilloscoop aan op de uitgangen van de PCB (kanalen 1, 2 en 3 voor respectievelijk L1, L2 en L3). Stel de oscilloscoop in op 2mV/divisie en 5ms/divisie. Zet de MATH functie aan voor FFT en zet de Span op 1kHz.</li> <li>4. Debug en run het STM32Cube IDE-project "Testopstelling_DA_BOX_STEDIN_V2".</li> <li>5. Verbind de PCB met de PC via een micro USB-kabel.</li> <li>6. Open het Python-bestand op de PC en start de GUI.</li> <li>7. Voer de testinstellingen in zoals beschreven onder "Testinvoer" en klik op "Verzend instellingen".</li> <li>8. Controleer of het systeem een visuele indicatie geeft dat het klaar is voor de test (blauw licht). Start de test door op "Start" te klikken.</li> <li>9. Controleer het gemeten sinussignaal (voor stroomtestscenario's) en de FFT-analyse (voor THD%-scenario's) met behulp van de oscilloscoop. Pauzeer de testprocedure indien nodig om het meetresultaat te controleren, en hervat de test indien klaar.</li> <li>10. Herhaal stap 9 voor alle testscenario's.</li> </ol>

	11. Nadat de testprocedure is voltooid, stop de testprocedure en controleer de meetresultaten om te verifiëren of de gestelde eisen zijn behaald op basis van de criteria.
<b>Testresultaat:</b>	Zie testresultaat {1.6.3} voor de testresultaten en de conclusie met betrekking tot de requirements van deze testcase.
<b>Test geslaagd:</b>	De test is geslaagd als: <ul style="list-style-type: none"><li>• De testuitvoer voldoet aan de criteria</li></ul>

### 1.6.2 Testcase rapport 3

Hieronder is het testrapport van testcase 3 te zien.

↓Eis	Behaald?
REQ-2.2[CH]	Behaald
REQ-2.3[SH]	Behaald
REQ-2.4[CH]	Behaald
REQ-3.3[CH]	Behaald
REQ-3.4[CH]	Behaald
REQ-3.5[SH]	Gedeeltelijk behaald
REQ-3.6[CH]	Gedeeltelijk behaald

Tabel 6, Het testrapport van testcase 3

### 1.6.3 Testresultaat en conclusie

In deze paragraaf worden alle testresultaten van de acceptatietest weergegeven, en wordt een conclusie getrokken over de bijbehorende requirements, waarin wordt bepaald of deze zijn behaald.

#### ➤ Testinvoer

In Figuur 15 zie je de testinvoer van deze testcase en de gewenste scenario's die zijn ingesteld.

Hoofdpagina THD Scenario 1 THD Scenario 2 THD Scenario 3

**Test Scenario's**

Stroom testscenario 1 (rms,Ampère):

Stroom testscenario 2 (rms,Ampère):

Stroom testscenario 3 (rms,Ampère):

Stroom L1, L2, L3: 500.0 A; THD% = (3e: 10%, 5e: 15%, 7e: 12%, 9e: 0%, 11e: 5%, 13e: 8%)

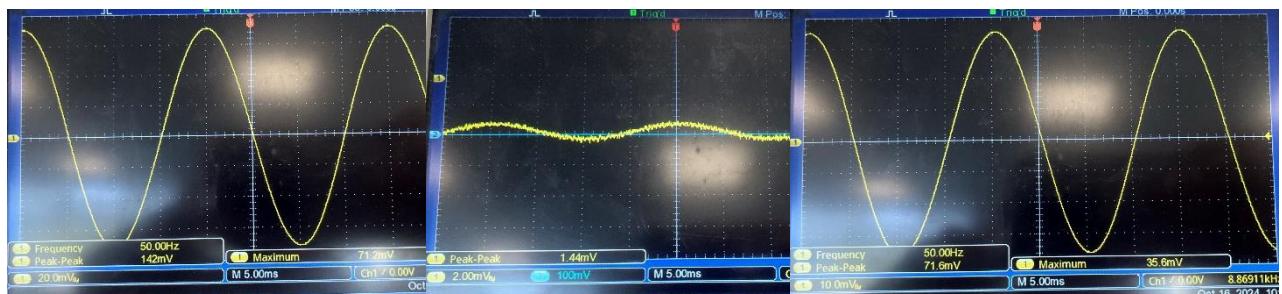
Stroom L1, L2, L3: 5.0 A; THD% = (3e: 20%, 5e: 15%, 7e: 17%, 9e: 0%, 11e: 0%, 13e: 0%)

Stroom L1, L2, L3: 300.0 A; THD% = (3e: 5%, 5e: 50%, 7e: 0%, 9e: 0%, 11e: 0%, 13e: 0%)

Figuur 15, testinvoer van testcase 3

#### ➤ Testuitvoer

Hieronder zie je de meetresultaten van de stroomtestscenario's, gemeten met de oscilloscoop (zie Figuur 16), en het meetresultaat van de MEM101, uitgelezen via de DALI-display (zie Figuur 17). In tabel Tabel 4 en Tabel 5 zijn alle meetresultaten weergegeven **REQ-3.3[CH]** **REQ-3.4[CH]**.



Figuur 16, Het meetresultaat van de eerste 3 stroomtestscenario's



Figuur 17, Het meetresultaat van de MEM101 van de stroomtestscenario's

In Tabel 4 zijn alle meetresultaten van de stroomtestscenario's weergegeven, gemeten met de oscilloscoop, inclusief de maximale afwijking. In Tabel 5 zijn de meetresultaten van de MEM101 weergegeven, samen met de maximale afwijking (afwijking van het testsysteem + de afwijking van de MEM101, 0,5%).

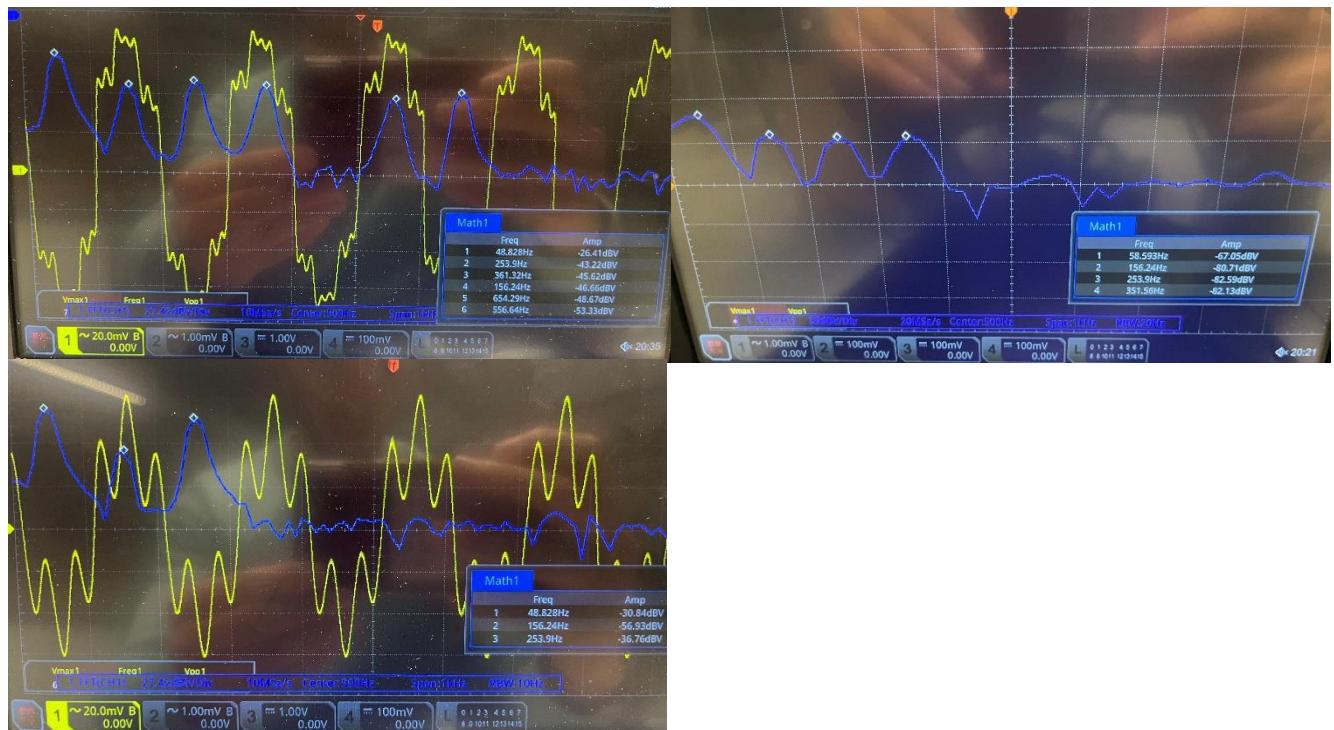
Stroomtestscenario (A)	Gewenste simulatie signaal (mVpp)	Maximale afwijking 6% (mVpp) REQ- 3.3[CH]	Maximale afwijking 3% (mVpp) REQ- 3.4[CH]	Gemeten signaal (mVpp)
500	141,42	± 8,49	± 4,24	142
5	1,41	± 0,08	± 0,04	1,44
250,678	70,72	± 4,24	± 2,12	71,6

Tabel 7, Meetresultaten van stroomtestscenario's gemeten met de oscilloscoop

Stroomtestscenario (A)	Gewenste meetresultaat Smart Device (A)	Maximale afwijking 6% + 0,5% (A)	Maximale afwijking 3% + 0,5% (A)	Gemeten meetresultaat (A)
500	500,00	± 32,50	± 17,50	505,48
5	5,00	± 0,33	± 0,18	5,11
250,678	250,68	± 15,79	± 8,02	-

Tabel 8, Meetresultaten van de stroomtestscenario's gemeten met de MEM101

Hieronder zijn de meetresultaten weergegeven van de THD-testscenario's gemeten met de oscilloscoop. In Tabel 6 zijn de waardes de meetresultaten terug te vinden.



Figuur 18, Meetresultaten van de THD-testscenario's.

THD% testscenario's	Gewenste THD%	Gemeten THD%.	Maximale afwijking 6%. REQ-3.5[SH]	Maximale afwijking 3%. REQ-3.6[CH]
1	Harmonische $3^e = 10\%$ $5^e = 15\%$ $7^e = 12\%$ $9^e = 0\%$ $11^e = 5\%$ $13^e = 8\%$ <b>THD% = 23,62</b>	Harmonische $3^e = 9,75\%$ $5^e = 14,62\%$ $7^e = 11,14\%$ $9^e = 0\%$ $11^e = 4,56\%$ $13^e = 7,74\%$ <b>THD% = 22,66%</b>	$\pm 1,41\%$	$\pm 0,70\%$
2	Harmonische $3^e = 20\%$ $5^e = 15\%$ $7^e = 17\%$ $9^e = 0\%$ $11^e = 0\%$ $13^e = 0\%$ <b>THD% = 30,23%</b>	Harmonische $3^e = 20,75\%$ $5^e = 16,71\%$ $7^e = 17,62\%$ $9^e = 0\%$ $11^e = 0\%$ $13^e = 0\%$ <b>THD% = 31,94%</b>	$\pm 1,81\%$	$\pm 0,90\%$
3	Harmonische $3^e = 5\%$ $5^e = 50\%$ $7^e = 0\%$ $9^e = 0\%$ $11^e = 0\%$ $13^e = 0\%$ <b>THD% = 50,25%</b>	$3^e = 4,94\%$ $5^e = 50,58\%$ $7^e = 0\%$ $9^e = 0\%$ $11^e = 0\%$ $13^e = 0\%$ <b>THD% = 50,82%</b>	$\pm 3,01\%$	$\pm 1,51\%$

Tabel 9, Meetresultaten van de THD-testscenario's

De meetresultaten van de MEM101 voor de THD-testscenario's zijn niet opgenomen in het verslag. De metingen lagen echter buiten de gespecificeerde afwijkingen; zo mat de MEM101 10% voor de 5e harmonische, terwijl de ingestelde waarde 50% was.

#### Conclusie

Uit deze testcase kan geconcludeerd worden dat de gebruiker in staat was om alle testscenario's correct in te stellen binnen de gespecificeerde bereiken (**REQ-2.2[CH]**, **REQ-2.3[SH]**,**REQ-2.4[CH]**). Daarnaast waren alle stroomtestscenario's correct gesimuleerd binnen de maximale gespecifieerde afwijking van 6% (**REQ-3.3[CH]**) en 3% (**REQ-3.4[CH]**). De eisen voldoen hiermee aan de criteria en zijn dus behaald.

Uit de resultaten van de THD-testscenario's blijkt dat het testsysteem de THD% over het algemeen correct simuleert binnen de gespecificeerde afwijkingen van 6% en 3%. Bij THD-testscenario 2 was er echter een afwijking van 0,81% meer dan de gestelde waarde, dit is waarschijnlijk veroorzaakt door de meetonzekerheid van de oscilloscoop.

De meetresultaten van de MEM101 weken enkele procenten af van de verwachte waarden. Hoewel het testsysteem de THD% nauwkeurig simuleert, kunnen de afwijkingen bij de MEM101 mogelijk worden verklaard door kleine frequentieafwijkingen, zoals 48,8 Hz in plaats van 50 Hz, waardoor het Smart Device andere meetresultaten geeft. De exacte oorzaak vereist verder onderzoek, samen met de engineers van Mikronika, die het Smart Device produceren. Aangezien er geen specifieke eisen zijn gesteld voor de nauwkeurigheid van de gesimuleerde frequentie en de THD% binnen de toegestane afwijkingen valt, zijn deze eisen gedeeltelijk behaald (**REQ-3.5[SH]**, **REQ-3.6[CH]**).

## 1.6.4 Testcase 4

Testscenario simulatie	Beschrijving
Requirement/ Specificatie:	<p><b>REQ-3.1[MH]</b>: Het testsysteem is in staat om stroomtestscenario 1 (zie tabel 1) te simuleren met de maximale afwijking van 6% ten opzichte van het gewenste simulatie signaal.</p> <p><b>REQ-3.2[SH]</b>: Het testsysteem is in staat om alle stroomtestscenario's weergeven in tabel 1 te simuleren met de maximale afwijking van 6% ten opzichte van het gewenste simulatie signaal.</p>
Voorwaarden:	<ul style="list-style-type: none"> <li>• PCB van het systeem</li> <li>• Voeding (min. 4V, max. 30V, min. 100mA)</li> <li>• Oscilloscoop (minimaal 3 kanalen, 2mV/divisie)</li> <li>• Firmware voor de PCB, "Testopstelling_DA_BOX_STEDIN_V2"</li> <li>• Het GUI python bestand opgeslagen in de PC.</li> <li>• Een PC met de volgende software geïnstalleerd:           <ul style="list-style-type: none"> <li>◦ STM32CubeIDE.</li> <li>◦ Python</li> </ul> </li> <li>• STLINK V3 en JTAG-connector</li> <li>• USB A naar micro B-kabel</li> </ul>
Testinvoer:	Standaard testprocedure (stroomtestscenario's weergeven in tabel 1)
Testuitvoer:	<ul style="list-style-type: none"> <li>• De gemeten test scenario's:           <ul style="list-style-type: none"> <li>- Het sinussignaal gemeten door de oscilloscoop (voor de stroom testscenario's).</li> </ul> </li> </ul>
Criteria:	<p>Het gemeten resultaat voor stroomtestscenario 1 komt overeen met het ingestelde testscenario, met een maximale afwijking van 6%.</p> <p>Alle stroomtestscenario's in tabel 1 komen overeen met de ingestelde testscenario's, met een maximale afwijking van 6%.</p>
Testprocedure	<ol style="list-style-type: none"> <li>12. Verbind de PCB met de voeding (10V, 100mA).</li> <li>13. Verbind de PCB met de STLINK via de STDC14-connector.</li> <li>14. Sluit de oscilloscoop aan op de uitgangen van de PCB (kanalen 1, 2 en 3 voor respectievelijk L1, L2 en L3). Stel de oscilloscoop in op 2mV/divisie en 5ms/divisie.</li> <li>15. Debug en run het STM32Cube IDE-project "Testopstelling_DA_BOX_STEDIN_V2".</li> <li>16. Verbind de PCB met de PC via een micro USB-kabel.</li> <li>17. Open het Python-bestand op de PC en start de GUI.</li> <li>18. Initieer de standaard testprocedure door op "standaard testprocedure" te klikken.</li> <li>19. Controleer of het systeem een visuele indicatie geeft dat het klaar is voor de test (blauw licht). Start de test door op "Start" te klikken.</li> <li>20. Controleer het gemeten sinussignaal (voor de stroomtestscenario's) en controleer of deze voldoet aan de criteria</li> <li>21. Herhaal stap 9 voor alle stroomtestscenario's.</li> <li>22. Nadat de testprocedure is voltooid, stop de testprocedure en controleer de meetresultaten om te verifiëren of de gestelde eisen zijn behaald op basis van de criteria.</li> </ol>
Testresultaat:	Zie testresultaat {1.6.6} voor de testresultaten en de conclusie met betrekking tot de requirements van deze testcase.

<b>Test geslaagd:</b>	De test is geslaagd als: <ul style="list-style-type: none"><li>• De testuitvoer voldoet aan de criteria</li></ul>
-----------------------	---

### 1.6.5 Testcase rapport 4

Hieronder is het testrapport van testcase 4 te zien.

↓Eis	Behaald?
REQ-3.1[MH]	Behaald
REQ-3.2[SH]	Behaald

Tabel 10, Het testrapport van testcase 4

### 1.6.6 Testresultaat en conclusie

In deze paragraaf worden alle testresultaten van de testcase weergegeven, en wordt een conclusie getrokken over de bijbehorende requirements **REQ-3.1[MH]**, **REQ-3.2[SH]**, waarin wordt bepaald of deze zijn behaald.

#### ➤ Testinvoer

The screenshot shows a software interface for testing. At the top, there are three tabs: 'Hoofdpagina', 'THD Scenario 1', 'THD Scenario 2', and 'THD Scenario 3'. Below the tabs, there is a section titled 'Test Scenario's' with three input fields:

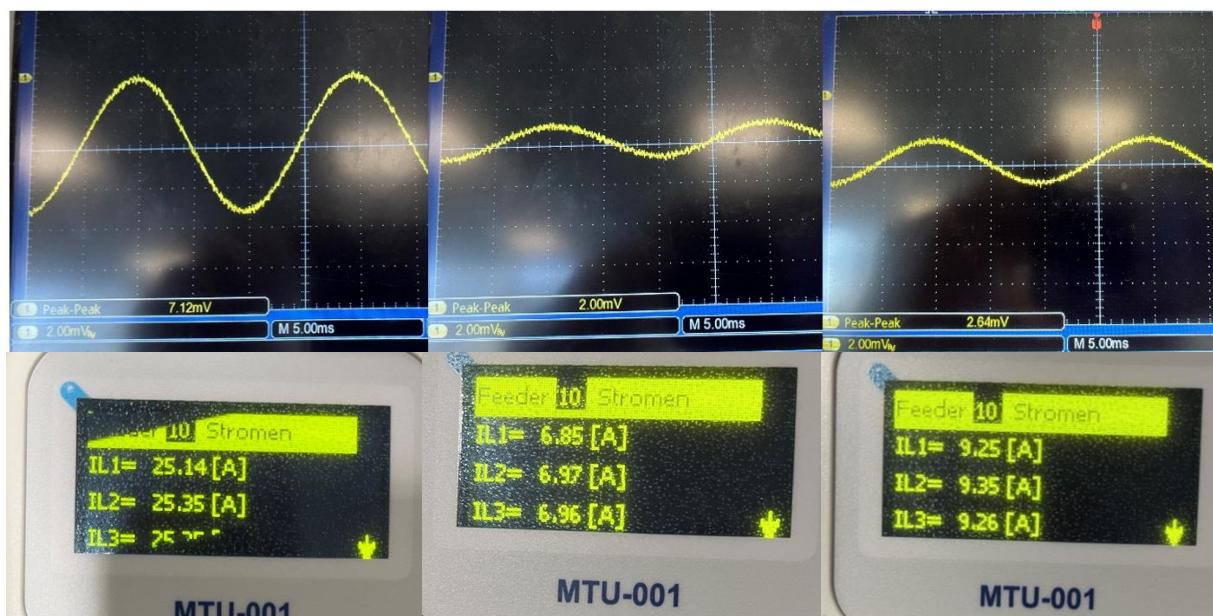
- 'Stroom testsenario 1 (rms,Ampère)': 25
- 'Stroom testsenario 2 (rms,Ampère)': 6,8
- 'Stroom testsenario 3 (rms,Ampère)': 9,186

Below these fields, there are three lines of text providing THD percentages for different phases (3e, 5e, 7e, 9e, 11e, 13e) for each scenario. At the bottom of the interface are three buttons: 'Verzend instellingen', 'Start Test', and 'Stop Test', followed by a link 'Standaard Testprocedure'.

Figuur 19, Testinvoer van testcase 4

#### ➤ Testuitvoer

In Figuur 20 zijn het meetresultaat, gemeten met de oscilloscoop, en het meetresultaat van de MEM101 te zien. In tabel Tabel 8 en Tabel 9 zijn de meetresultaten weergeven.



Figuur 20, Meetresultaten van de stroomtestscenario's, gemeten met de oscilloscoop en de MEM101.

<u>Stroomtestscenario's (A)</u>	<u>Gewenste simulatie signaal (mVpp)</u>	<u>Maximale afwijking 6%. (mVpp)</u>	<u>Gemeten signaal (mVpp)</u>	<u>Nauwkeurigheid (%)</u>
25	7,07	± 4,24	7,12	99,3%
6,8	1,92	± 1,15	2	95,8%
9,186	2,60	± 1,56	2,64	98,5%

Tabel 11, meetresultaten gemeten door de oscilloscoop

<u>Stroomtestscenario (A)</u>	<u>Gewenste meetresultaat Smart Device (A)</u>	<u>Maximale afwijking 6% + 0,5% (A)</u>	<u>Gemeten meetresultaat (A)</u>	<u>Nauwkeurigheid (%)</u>
25	25,00	± 1,62	25,35	98,6%
6,8	6,80	± 0,44	6,96	97,6%
9,186	9,19	± 0,60	9,35	98,2%

Tabel 12, meetresultaten gemeten door de MEM101

### Conclusie

De gemeten stroomtestscenario's vallen binnen de gespecificeerde afwijking van 6%. Dit betekent dat het testsysteem in staat is om de stroomtestscenario's van de standaardtestprocedure correct te simuleren. De testresultaten voldoen daarmee aan de gestelde criteria, waardoor de eisen succesvol zijn behaald. (**REQ-3.1[MH]**, **REQ-3.2[SH]**).

## 1.7 Acceptatietest 5: Niet-functionele Eisen

In deze paragraaf worden de acceptatietest, het testresultaat en de conclusie beschreven voor de niet-functionele requirements die betrekking hebben op het vermogensverbruik van het testsysteem en het ingangsspanningsbereik. Daarnaast worden ook de afmetingen en het gewicht van het testsysteem behandeld.

### 1.7.1 Testcase 5

Functionele en Niet-functionele Eisen	Beschrijving
<b>Requirement/ Specificatie:</b>	<p><b>REQ-NF1[MH]:</b> Het testsysteem functioneert met een voeding die een ingangsspanningsbereik van 10 tot 30 VDC heeft.</p> <p><b>REQ-NF3[SH]:</b> Het testsysteem verbruikt tijdens de testprocedure niet meer dan 15 watt aan vermogen.</p> <p><b>REQ-NF4[CH]:</b> Het testsysteem weegt maximaal 5 kg.</p> <p><b>REQ-NF5[CH]:</b> De afmetingen van het testsysteem zijn maximaal 200x175x50 mm.</p>
<b>Voorwaarden:</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>PCB van het elektronisch systeem.</li> <li>Voedingsbron (U min. 10 en max. 30V en I min. 100mA).</li> <li>Firmware voor de PCB.</li> <li>Weegschaal.</li> <li>Meetinstrumenten voor afmetingen.</li> <li>STLINK V3 en JTAG-connector kabel.</li> <li>Seriële monitor.</li> <li>Een PC met de volgende software geïnstalleerd:           <ul style="list-style-type: none"> <li>STM32CubeIDE</li> </ul> </li> </ul>
<b>Testinvoer:</b>	Voeding van 10V tot 30V. Testprocedure uitvoeren.
<b>Testuitvoer:</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Gemeten verbruik, gewicht en afmetingen.</li> </ul>
<b>Criteria:</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Het testsysteem functioneert correct binnen het opgegeven voedingsbereik.</li> <li>Het verbruik is niet meer dan 15 watt tijdens de testprocedure.</li> <li>Het gewicht is maximaal 5 kg.</li> <li>De afmetingen zijn maximaal 200x175x50 mm.</li> </ul>
<b>Testprocedure</b>	<ol style="list-style-type: none"> <li>Sluit de PCB aan op de voedingsbron met 10V en een stroombegrenzing van 100mA.</li> <li>Verbind de PCB met de STLINK door middel van de STDC14-connectkabel.</li> <li>Debug het STM32Cube IDE-project en run de code.</li> <li>Meet het vermogen dat het testsysteem verbruikt tijdens de testprocedure en controleer of het niet meer dan 15 watt is.</li> <li>Weeg het testsysteem en controleer of het maximaal 5 kg is.</li> <li>Meet de afmetingen van het testsysteem en controleer of deze maximaal 200x175x50 mm zijn.</li> <li>Verhoog de voedingsspanning naar 30V en controleer of het testsysteem nog steeds correct functioneert.</li> </ol>
<b>Testresultaat:</b>	Zie testresultaat {1.7.2} voor de testresultaten en de conclusie met betrekking tot de requirements van deze testcase.
<b>Test geslaagd:</b>	De test is geslaagd als:

- De testuitvoer voldoet aan de criteria

### 1.7.2 Testcase rapport 5

Hieronder is het testrapport van testcase 5 te zien.

↓Eis	Behaald?
REQ-NF1[ <b>MH</b> ]	Behaald
REQ-NF3[ <b>SH</b> ]	Behaald
REQ-NF4[ <b>CH</b> ]	Behaald
REQ-NF5[ <b>CH</b> ]	Behaald

### 1.7.3 Testresultaat en conclusie

In deze paragraaf worden alle testresultaten van de acceptatietest weergegeven, en wordt een conclusie getrokken over de bijbehorende requirements, waarin wordt bepaald of deze zijn behaald.

#### ➤ Testinvoer

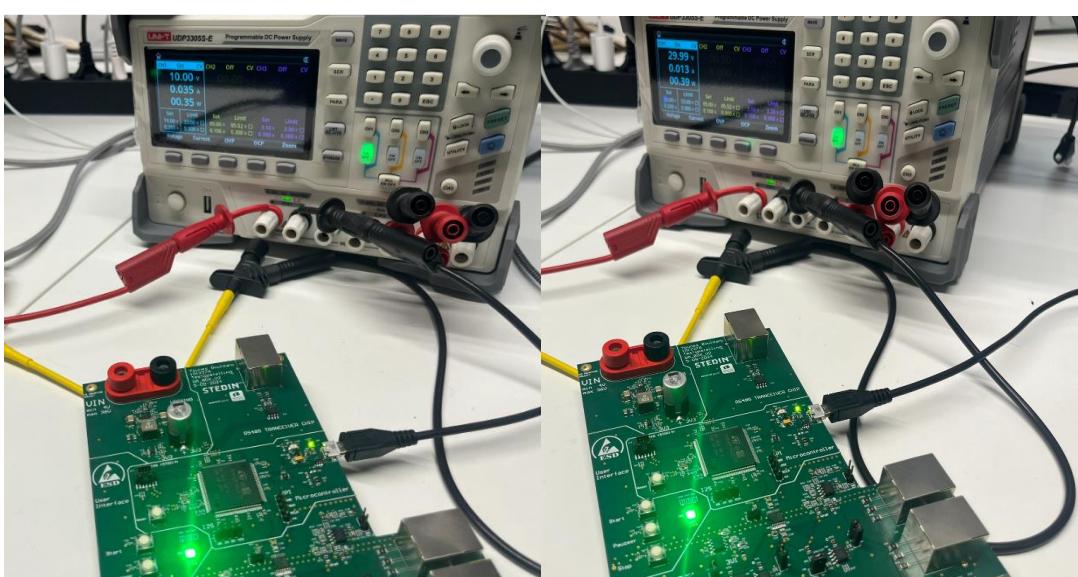
Hieronder is de testinvoer te zien. Er is een spanning van 10 tot 30 V aangelegd.



Figuur 21, De testinvoer van de testcase

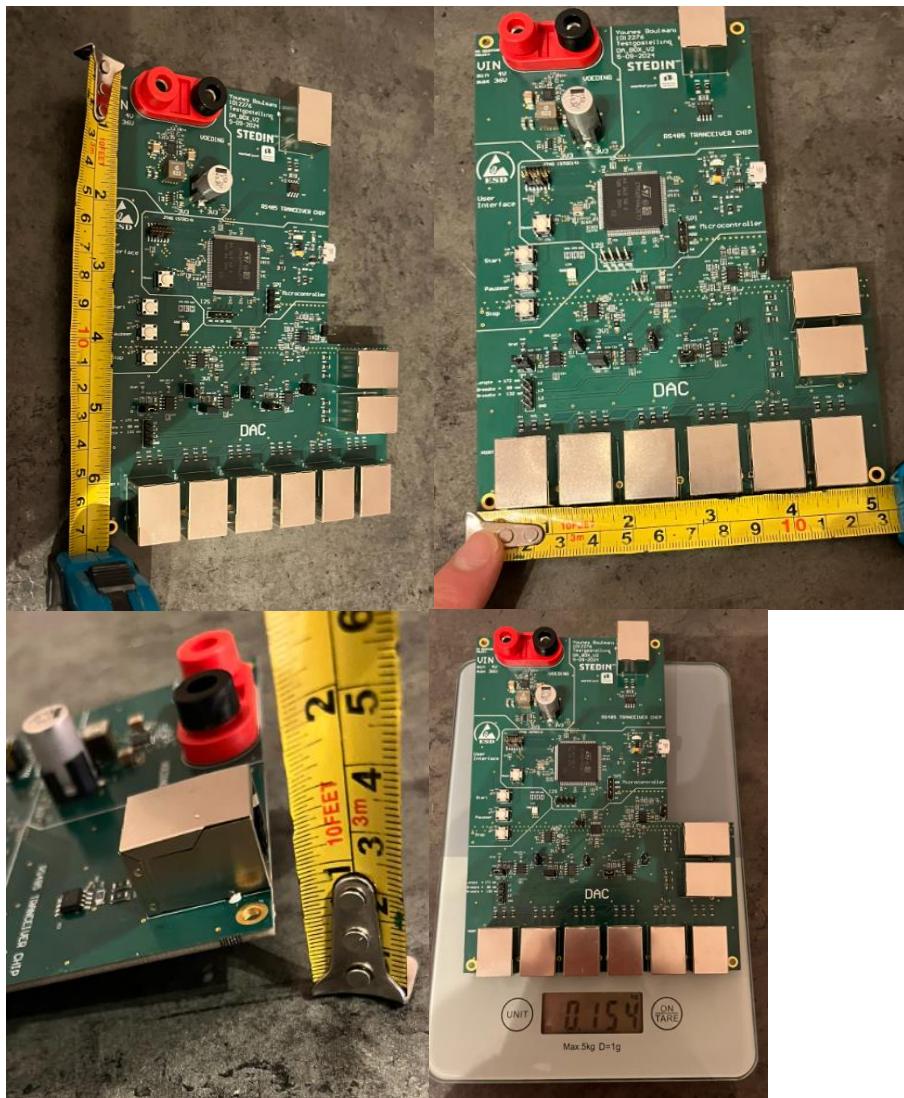
#### ➤ Testuitvoer

Hieronder zie je dat het testsysteem ook functioneert bij een voltage-invoer van 10 V (links) en 30 V (rechts). Daarnaast is het maximaal verbruikte vermogen tijdens de testprocedure 390 mW (**REQ-NF1[MH]**, **REQ-NF3[SH]**).



Figuur 22, De testuitvoer van **REQ-NF1** en **NF3**

In Figuur 23 zijn de afmetingen en het gewicht van het testsysteem te zien. Het testsysteem heeft afmetingen van 17x13x4 cm (lxbxh) en weegt 150 gram (**REQ-NF4[CH]**, **REQ-NF5[CH]**).



Figuur 23, De afmetingen en het gewicht van het testsysteem

### Conclusie

De testuitvoeren voor de requirements voldoen aan de criteria, zoals beschreven in testcase 5. Alle requirements zijn hiermee behaald.

## 1.8 Acceptatietest rapport

In deze paragraaf is het acceptatietestrapport te zien. Hierin wordt weergegeven welke eisen volledig, gedeeltelijk of niet zijn behaald.

Requirements	Behaald?
<b>REQ-1.1[MH]:</b> De testengineer kan na het instellen van alle gewenste testscenario's de testprocedure laten starten.	Behaald
<b>REQ-1.2[MH]:</b> De testengineer kan de testprocedure laten stoppen.	Behaald
<b>REQ-1.3[MH]:</b> De testengineer kan de testprocedure laten pauzeren.	Behaald
<b>REQ-1.4[SH]:</b> De standaard default testprocedure mag niet langer duren dan een kwartier.	Behaald
<b>REQ-1.5[MH]:</b> Het testsysteem communiceert met de PC volgens het USB-protocol.	Behaald
<b>REQ-1.6[CH]:</b> Het testsysteem communiceert met het Smart Device via het Modbus-protocol.	Niet Behaald
<b>REQ-2.1[MH]:</b> Het testsysteem biedt de mogelijkheid om 6 testscenario's uit te voeren voor de testprocedure, zoals weergegeven in tabel 1.	Behaald
<b>REQ-2.2[CH]:</b> De testengineer kan de gewenste stroomtestscenario's instellen binnen een bereik van 5 tot 500 Ampère RMS, met stapgroottes van één duizendste.	Behaald
<b>REQ-2.3[SH]:</b> De testengineer kan de 3e, 5e en 7e harmonischen van de THD% testscenario's instellen binnen een bereik van 5 tot 50% van de amplitude van de grondharmonische 50 Hz, met een stapgrootte van 1%.	Behaald
<b>REQ-2.4 [CH]:</b> De testengineer is in staat om alle oneven harmonischen tot en met de 13e in te stellen binnen een bereik van 5 tot 50%, met een stapgrootte van 1%.	Behaald
<b>REQ-2.5 [CH]:</b> De testengineer kan een standaardtestprocedure initiëren die alle gewenste testscenario's, weergegeven in tabel 1, achtereenvolgens uitvoert.	Behaald
<b>REQ-3.1[MH]:</b> Het testsysteem is in staat om stroomtestscenario 1 (zie tabel 1) te simuleren met de maximale afwijking van 6% ten opzichte van het gewenste simulatie signaal.	Behaald
<b>REQ-3.2[SH]:</b> Het testsysteem is in staat om alle testscenario's weergeven in tabel 1 te simuleren met de maximale afwijking van 6% ten opzichte van het gewenste simulatie signaal.	Behaald
<b>REQ-3.3[CH]:</b> Het testsysteem is in staat om alle stroomtestscenario's te simuleren volgens REQ-2.2 met de maximale afwijking van 6%	Behaald
<b>REQ-3.4[CH]:</b> Het testsysteem is in staat om het gewenste stroom testscenario te simuleren met een maximale afwijking van 3% ten opzichte van het gewenste simulatie signaal.	Behaald
<b>REQ-3.5[SH]:</b> Het testsysteem is in staat om het gewenste THD% testscenario's te simuleren met een maximale afwijking van 6% ten opzichte van het ingestelde THD% door de testengineer.	Gedeeltelijk behaald
<b>REQ-3.6[CH]:</b> Het testsysteem is in staat om het gewenste THD% testscenario's te simuleren met een maximale afwijking van 3% ten opzichte van het ingestelde THD% door de testengineer.	Gedeeltelijk behaald
<b>REQ-3.7[MH]:</b> Het testsysteem is in staat om op 1 poort van de MEM101 de testscenario's te simuleren.	Behaald
<b>REQ-3.8[CH]:</b> Het testsysteem is in staat om op 8 poorten van de MEM101 tegelijkertijd de testscenario's te simuleren.	Behaald
<b>REQ-4.1[CH]:</b> Het testsysteem geeft een visuele indicatie wanneer het testsysteem gereed is voor gebruik.	Behaald
<b>REQ-4.2[CH]:</b> Het testsysteem geeft een visuele indicatie wanneer het gestart is met de testprocedure.	Behaald
<b>REQ-4.3[CH]:</b> Het testsysteem geeft een visuele indicatie wanneer de testprocedure voltooid is.	Behaald
<b>REQ-4.4[CH]:</b> Het testsysteem geeft een visuele indicatie wanneer de testprocedure gepauzeerd is.	Behaald
<b>REQ-4.5[CH]:</b> Het testsysteem geeft een visuele indicatie wanneer het gestopt is met de testprocedure.	Behaald
<b>REQ-5.1[MH]:</b> Het testsysteem geeft het actieve testscenario weer aan de gebruiker.	Behaald

REQ-6.1[CH]: Het testsysteem genereert een testrapport na afloop van elk testprocedure en stuurt deze door naar de PC.	Niet Behaald
REQ-NF1[MH]: Het testsysteem functioneert met een voeding die een ingangsspanningsbereik van 10 tot 30 VDC heeft.	Behaald
REQ-NF2[MH]: Het testsysteem kan verbonden worden met het Smart Device doormiddel van een UTP-kabel.	Behaald
REQ-NF3[SH]: Het testsysteem verbruikt tijdens de testprocedure niet meer dan 15 watt aan vermogen.	Behaald
REQ-NF4[CH]: Het testsysteem weegt maximaal 5 kg.	Behaald
REQ-NF5[CH]: De afmetingen van het testsysteem zijn maximaal 200x175x50 mm.	Behaald

---

# Bijlage I: Handleiding

Testopstelling DA\_BOX\_V2

---

<b>Auteur:</b>	Younes Boulmani
<b>Stagedocent:</b>	De heer Fogarty
<b>Bedrijfsbegeleiders:</b>	Mark Burghout en Koen Peelen
<b>Titel:</b>	Handleiding
<b>Datum van uitgifte:</b>	5-11-2024

## Inhoud

1	Inleiding.....	251
2	Technische specificaties.....	252
3	Veiligheidsrichtlijnen .....	252
4	Beschrijving .....	253
5	Toestanden en Werking van het Systeem .....	254
6	Gebruik van testsysteem .....	256
6.1	Initiële Installatie en Voorbereiding.....	257
6.1.1	Software-installatie .....	257
6.1.1.1	Download de GUI.....	257
6.1.1.2	Installeer python.....	257
6.1.2	PCb-configuratie .....	258
6.1.3	Benodigde materiaal.....	258
6.2	Systeem Aansluiten .....	259
6.2.1	Voeding Aansluiten.....	259
6.2.2	Smart Device aansluiten .....	259
6.2.3	PC aansluiten .....	260
6.3	Starten van de GUI Applicatie.....	261
6.4	Configureren van Testscenario's .....	263
6.4.1	Handmatig configureren .....	264
6.4.2	Initiëren standaard testprocedure .....	266
6.5	Het bedienen van de testprocedure .....	267
6.6	Reset.....	268
7	Firmware updaten .....	268

## Versie Historiek

Revisie	Datum	Auteur	Omschrijving
1.0	4-11-2024	Younes Boulmani	Eerste opzet handleiding
1.1	5-11-2024	Younes Boulmani	Handleiding volledig uitgewerkt,

## 1 Inleiding

Deze handleiding biedt een gedetailleerde uitleg over het gebruik en de bediening van het testsysteem "Testopstelling DA\_BOX\_V2". Dit systeem is ontworpen om verschillende stroom- en THD-testscenario's te simuleren en wordt gebruikt om het Smart Device "MEM101" te kunnen testen. Door de stappen in deze handleiding te volgen, kunnen gebruikers het systeem veilig installeren, configureren en bedienen.

Het document begint met belangrijke technische specificaties en veiligheidsrichtlijnen, gevolgd door een beschrijving van de systeemtoestanden en de benodigde handelingen. Deze handleiding richt zich ook op de initiële installatie en voorbereiding, het configureren van testscenario's en het uitvoeren van de testprocedure. Ten slotte wordt er uitleg gegeven hoe de firmware van het testsysteem bijgewerkt kan worden.

Deze handleiding is bedoeld voor testengineers en technici die verantwoordelijk zijn voor het uitvoeren en controleren van tests op het MEM101-apparaat.

## 2 Technische specificaties

Parameter	Voorwaarde	Min.	Typ.	Max.
<i>Ingangsspanning (Voltage)</i>		4 V	10-30 V	36 V
<i>Stroomtestscenario's bereik</i>		5 A	-	500 A
THD% oneven harmonische bereik		5%		50%
<i>Afwijking Stroom Testscenario's</i>		-	3%	6%
<i>Afwijking THD Testscenario's</i>		-	2%	5%
<i>Vermogen (Operationeel)</i>	Bij 10 V ingang	-	350 mW	-
<i>Vermogen (Inactief)</i>	Bij 10 V ingang	-	260 mW	-
<i>Testproceduretijd per Scenario</i>		-	30 s	-
<i>Grondsignaalfrequentie</i>		-	50 Hz	-

## 3 Veiligheidsrichtlijnen

Om het testsysteem veilig en duurzaam te gebruiken, is het belangrijk om enkele basisveiligheidsrichtlijnen te volgen. Deze sectie geeft de essentiële voorzorgsmaatregelen om schade aan het systeem en veiligheidsrisico's voor de gebruiker te voorkomen:

- **Ingangsspanning:** Overschrijd nooit de maximale ingangsspanning van 36 V; hogere spanningen kunnen het systeem beschadigen.
- **Polariteit:** Controleer altijd de polariteit bij het aansluiten van de voeding om schade te voorkomen.
- **Uitschakelen bij wijzigingen:** Zet het systeem uit bij het aanpassen van jumpers, componenten, of bedrading.
- **ESD-bescherming:** Gebruik aarding (zoals een antistatische polsband) bij het hanteren van de PCB om schade door elektrostatische ontlading te voorkomen.
- **Veilige testomgeving:** Houd vloeistoffen uit de buurt van het systeem; plaats geen dranken of andere geleidende stoffen op of rond de PCB om kortsluiting en schade te vermijden.

## 4 Beschrijving

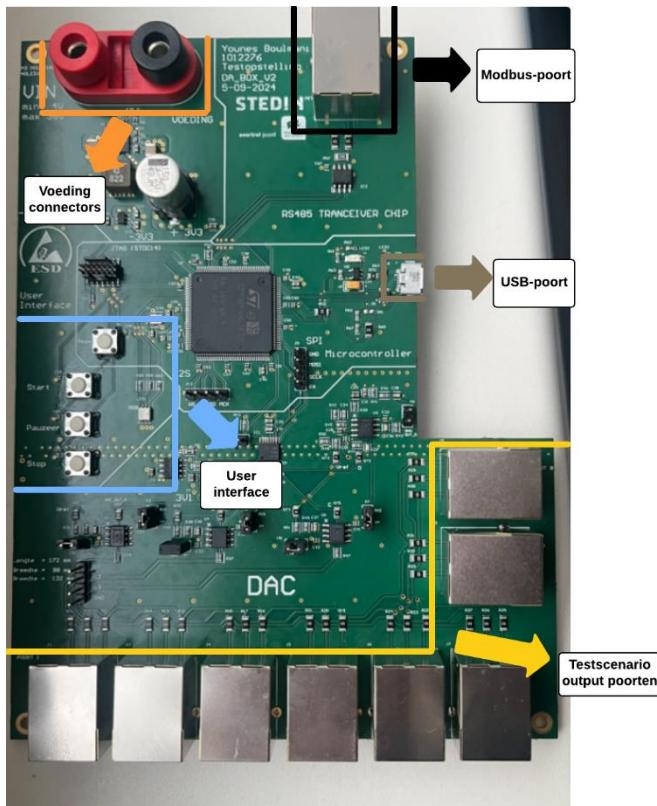
Het testsysteem "Testopstelling\_DA\_BOX\_V2" is een apparaat dat ontworpen is om verschillende stroom- en THD-testscenario's te simuleren voor het Smart Device genaamd MEM101. Dit testsysteem beschikt over 8 uitgangen die de gesimuleerde testscenario's uitvoeren en kunnen worden gekoppeld aan het Smart Device.

Het systeem is uitgerust met een USB-poort, waarmee communicatie via het USB-protocol mogelijk is met externe apparaten, zoals een PC. Bij het testsysteem hoort een Python-bestand dat fungeert als interface tussen de PC en het testsysteem. Met behulp van deze interface kan de gebruiker eenvoudig alle gewenste testscenario's invoeren en configureren.

Daarnaast beschikt het systeem over een RS485-transceiverpoort, die communicatie met het Smart Device mogelijk maakt via het MODBUS-protocol. Het testsysteem werkt binnen een breed spanningsbereik van 10 tot 30 V (zie specificaties voor minimum- en maximumwaarden) en is voorzien van een banaanplugconnector, waardoor het eenvoudig kan worden aangesloten op een labvoeding.

Op de PCB is een gebruikersinterface aanwezig. Deze bestaat uit drie bedieningsknoppen – start, pauzeer en stop – waarmee de gebruiker de testprocedure kan starten, pauzeren en stoppen. Daarnaast is er een resetknop om het testsysteem te resetten, en een status-LED die de huidige status van het systeem weergeeft.

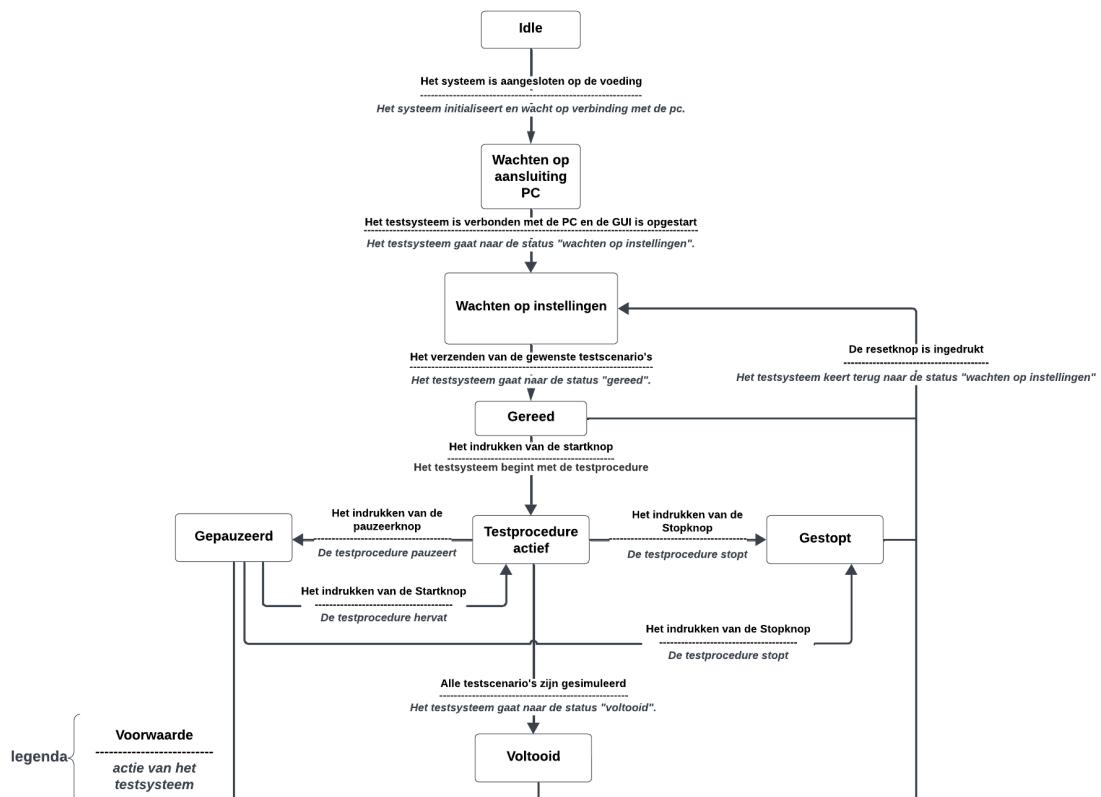
In de figuur hieronder is het testsysteem weergeven:



Figuur 1, Het testsysteem "testopstelling DA\_BOX\_V2"

## 5 Toestanden en Werking van het Systeem

Het testsysteem “Testopstelling\_DA\_BOX\_V2” doorloopt verschillende toestanden tijdens gebruik, afhankelijk van de acties van de gebruiker en systeemvereisten. Hieronder volgt een korte beschrijving van elke toestand. Zie het toestandsdiagram voor een overzicht van de overgangen tussen de toestanden.



### 1. Idle

In de “Idle” toestand is het systeem nog nergens mee verbonden. In deze fase moet de testengineer de initiële installatie van de software uitvoeren, de PCB configureren en alle benodigde materialen verzamelen. Zodra het systeem op de voeding is aangesloten, schakelt het door naar de volgende toestand: “Wachten op Aansluiting PC”.

### 2. Wachten op Aansluiting PC

In deze toestand wacht het testsysteem op een verbinding met de PC. De testengineer dient de GUI op te starten. Zodra er een succesvolle verbinding is, gaat het systeem over naar “Wachten op Instellingen”.

### 3. Wachten op Instellingen

Het systeem wacht op de testinstellingen van de gebruiker via de GUI. In deze toestand kan de gebruiker alle testscenario's configureren, handmatig of door de standaard testprocedure te starten. Zodra alle instellingen zijn geconfigureerd en verzonden, en het systeem deze heeft ontvangen, schakelt het door naar de toestand “Gereed”.

#### 4. Gereed

In deze toestand zendt het testsysteem blauw licht uit en geeft een melding in de GUI dat het gereed is. Het testsysteem is klaar om de testprocedure te starten. De gebruiker kan nu op de startknop drukken. Zodra dit gebeurt, gaat het systeem naar “Testprocedure Actief”.

#### 5. Testprocedure Actief

Het systeem voert de testprocedure uit volgens de ingestelde parameters. De gebruiker kan het systeem bedienen via de knoppen op de user interface. Het systeem kan overgaan naar de volgende toestanden:

- Gepauseerd: De gebruiker drukt op pauze.
- Gestopt: De gebruiker drukt op stop.
- Voltooid: Alle testscenario's zijn uitgevoerd.

In deze toestand zendt het systeem groen licht uit en geeft een melding via de GUI dat de testprocedure actief is.

#### 6. Gepauseerd

De testprocedure is tijdelijk gepauseerd, en het systeem blijft het huidige testscenario simuleren. De testengineer kan de test hervatten door op de startknop te drukken (waarna het systeem teruggaat naar “Testprocedure Actief”) of de test stoppen door op de stopknop te drukken. In deze toestand zendt het systeem groen knipperend licht uit en geeft een melding via de GUI.

#### 7. Gestopt

De testprocedure is gestopt, en het systeem simuleert geen testscenario's meer; de uitgangen staan op 0 ampère. Als de gebruiker opnieuw op start drukt, keert het systeem terug naar “Testprocedure Actief” en begint de testprocedure vanaf het begin. In deze toestand zendt het systeem rood licht uit en toont een melding in de GUI.

#### 8. Voltooid

Het systeem komt in deze toestand nadat alle testscenario's volledig zijn uitgevoerd. In deze toestand blijft het systeem het laatste testscenario simuleren. Het systeem zendt knipperend blauw licht uit en geeft een melding in de GUI dat de test succesvol is afgerond.

**Note:** Als de resetknop op enig moment wordt ingedrukt, schakelt het systeem automatisch naar de toestand “Wachten op Instellingen”, waardoor de gebruiker nieuwe testscenario's kan instellen.

Hoe de testengineer het testsysteem precies kan gebruiken en welke acties uitgevoerd moeten worden, wordt uitgebreid beschreven in het volgende hoofdstuk.

## 6 Gebruik van testsysteem

In het vorige hoofdstuk zijn de verschillende toestanden van het testsysteem besproken en hoe deze afhankelijk zijn van de acties van de gebruiker. In dit hoofdstuk wordt uitgelegd hoe het testsysteem gebruikt kan worden en welke stappen de testengineer moet volgen om het systeem correct te bedienen en het Smart Device te kunnen testen. Hieronder zijn alle benodigde acties en stappen weergegeven:

1. Initiële Installatie en Voorbereiding (eenmalige stap)
2. Systeem Aansluiten
3. Starten van de GUI Applicatie
4. Configureren van Testscenario's
5. Bedienen van de Testprocedure
6. Reset (optioneel, indien de gebruiker nieuwe testscenario's wil instellen)

Deze stappen worden uitgebreid beschreven in paragraaf **{6.1}** tot en met **{6.6}**.

## 6.1 Initiële Installatie en Voorbereiding

Deze paragraaf beschrijft de eenmalige stappen die nodig zijn om het testsysteem gebruiksklaar te maken. Dit omvat de installatie van de benodigde software voor de GUI, de configuratie van de PCB, en het verzamelen van alle benodigde materialen.

### 6.1.1 Software-installatie

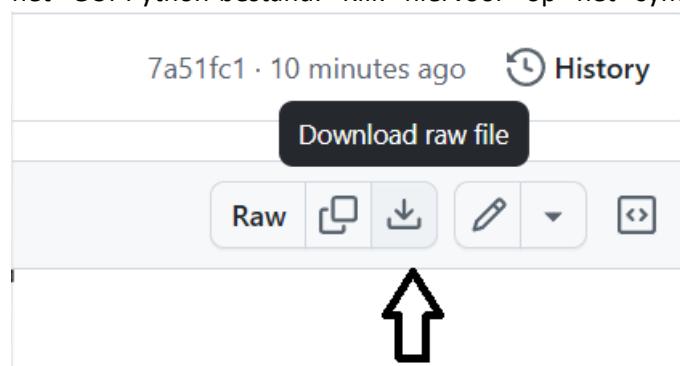
De testengineer gebruikt een graphical user interface (GUI) om de gewenste testscenario's in te stellen voor het testsysteem. Om de GUI te kunnen gebruiken, moet eerst het GUI-Python-bestand worden gedownload en Python geïnstalleerd worden op de PC. Volg onderstaande stappen om de software te installeren.

#### 6.1.1.1 Download de GUI

Indien het GUI-Python-bestand nog niet is gedownload, volg dan de onderstaande stappen:

1. **Download het GUI-bestand via GitHub:**

Klik op de volgende link [[Download GUI-bestand](#)] om naar de GitHub-repository te gaan en download het GUI-Python-bestand. Klik hiervoor op het symbool "Download raw file", zie Figuur 2.



Figuur 2, Het downloaden van het GUI-bestand

2. **Sla het bestand lokaal op:** Sla het GUI-bestand op een locatie op je laptop of PC waar je het makkelijk terug kunt vinden.

#### 6.1.1.2 Installeer python

Als Python nog niet is geïnstalleerd, download en installeer het dan vanaf [python.org](https://python.org). Kies de juiste versie voor jouw besturingssysteem.

Controleer of Python correct is geïnstalleerd door het volgende commando in de terminal of opdrachtprompt van je PC in te voeren:

```
python --version.
```

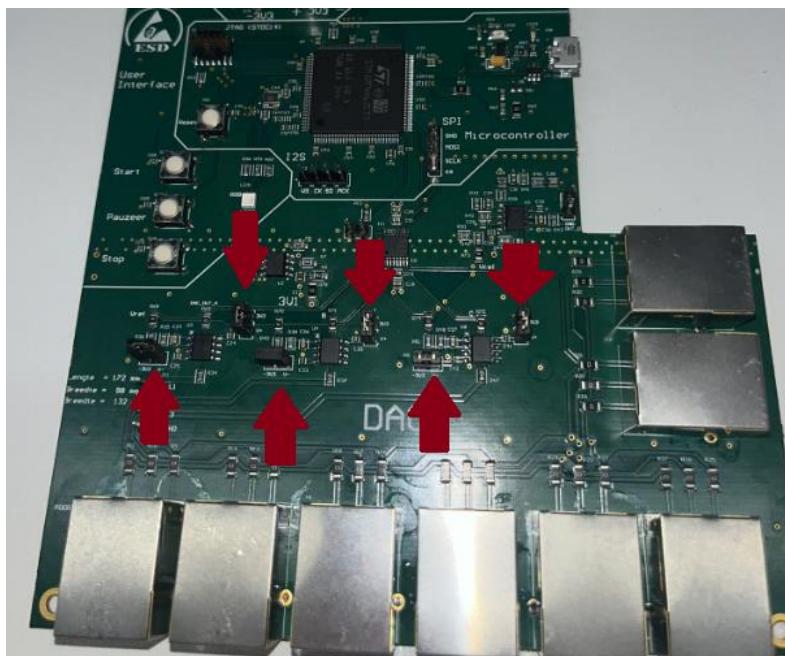
Indien de installatie succesvol is, verschijnt een versieaanduiding als uitvoer, zie Figuur 3:

```
C:\Users\yoiun>python --version
Python 3.12.6
```

Figuur 3, Uitvoer bij succesvolle installatie

### 6.1.2 PCB-configuratie

Voordat het testsysteem kan worden gebruikt, moeten er een aantal jumpers op de PCB worden geplaatst om de voeding voor de DAC-output en de opamps te configureren. Plaats de jumpers volgens de specificaties hieronder. Raadpleeg de onderstaande figuur voor de exacte posities van de jumpers.



Figuur 4, de positie en plaatsing van de jumpers.

### 6.1.3 Benodigde materiaal

Om het testsysteem correct te laten functioneren en het Smart Device te kunnen testen, zijn de volgende materialen vereist:

- Labvoeding en bijbehorende kabels (minimaal 4V en vermogen van 40 mW)
- UTP-kabel voor de aansluiting op de MEM101
- Micro USB-B-kabel voor de aansluiting van de PCB op de PC
- PC met de geïnstalleerde software

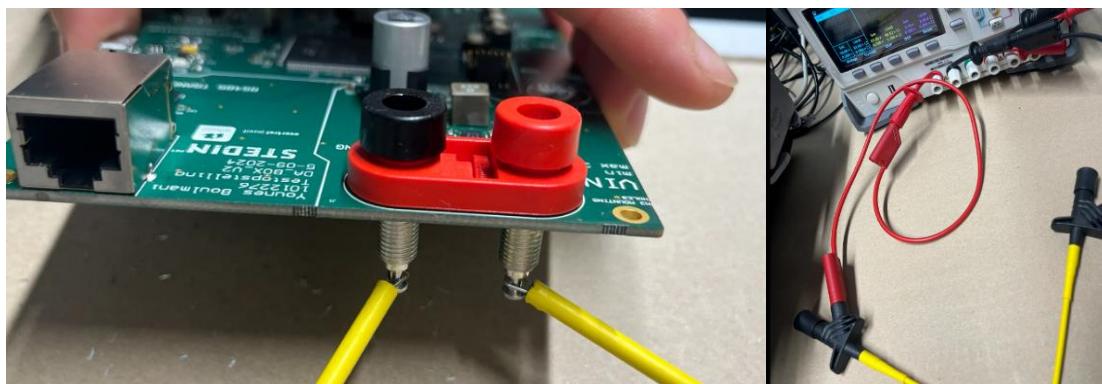
## 6.2 Systeem Aansluiten

Na het uitvoeren van alle initiële voorbereidingen en het verzamelen van het benodigde materiaal, kan het systeem worden aangesloten op de voeding, het Smart Device en de PC.

### 6.2.1 Voeding Aansluiten

- Sluit de positieve uitgang van de labvoeding aan op de positieve ingang (rood) van het testsysteem.
- Sluit de negatieve uitgang van de labvoeding aan op de negatieve ingang van het testsysteem.
- Schakel vervolgens de labvoeding in.

Zie de figuur hieronder ter illustratie:

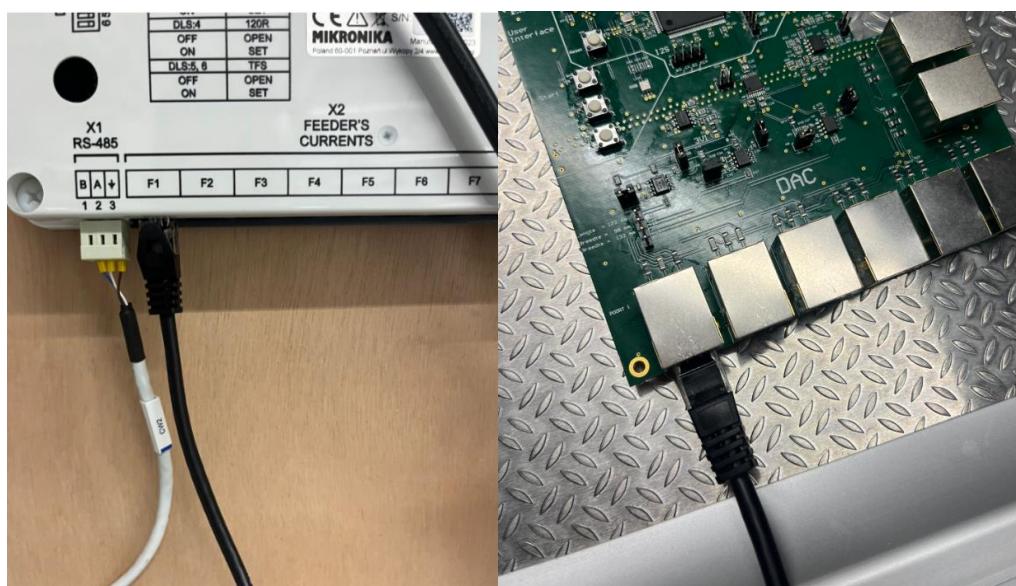


Figuur 5, de aansluiting van de voeding

### 6.2.2 Smart Device aansluiten

Verbind het Smart Device met het testsysteem door de UTP-kabel aan te sluiten op de beschikbare poorten van het testsysteem:

Zie de figuur hieronder ter illustratie:

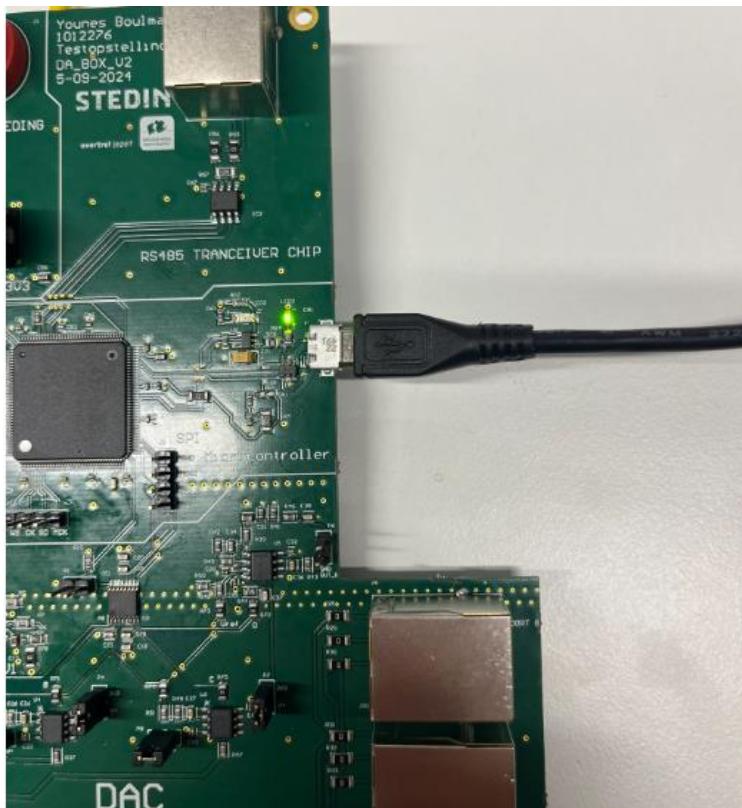


Figuur 6, aansluiting van het testsysteem op het Smart Device.

### 6.2.3 PC aansluiten

- Verbind de PC met het testsysteem via de USB-poort door gebruik te maken van de micro USB-kabel.
- Controleer of het groene LED-lampje oplicht om een goede aansluiting te bevestigen.

Zie de figuur hieronder ter illustratie:



Figuur 7, aansluiting van het testsysteem op de PC

### 6.3 Starten van de GUI Applicatie

Nadat het testsysteem succesvol is verbonden met de PC, kan de gebruiker de GUI-applicatie opstarten door de volgende stappen te volgen:

#### 1. Open een terminal of command prompt:

- Voor Windows: Typ cmd in het zoekveld en open de Command Prompt.
- Voor macOS: Open Terminal via Spotlight of uit de map Applications > Utilities.
- Voor Linux: Open de terminal via je applicatie-overzicht of met de sneltoets Ctrl + Alt + T.

#### 2. Navigeer naar de map met je Python-bestand:

Gebruik het cd-commando om naar de directory te gaan waar het Python-bestand is opgeslagen. Bijvoorbeeld:

```
cd pad/naar/jouw/map .
```

```
C:\Users\yoiun>cd C:\SCHOOL\Afstudeerstage_Stedin\Github\AFS30_testsysteem_Stedin\Vscode\GUI
```

Figuur 8, het cd-commando wanneer het bestand is opgeslagen in het volgende pad:  
C:\SCHOOL\Afstudeerstage\_Stedin\Github\AFS30\_testsysteem\_Stedin\Vscode\GUI

#### 3. Voer het Python-bestand uit:

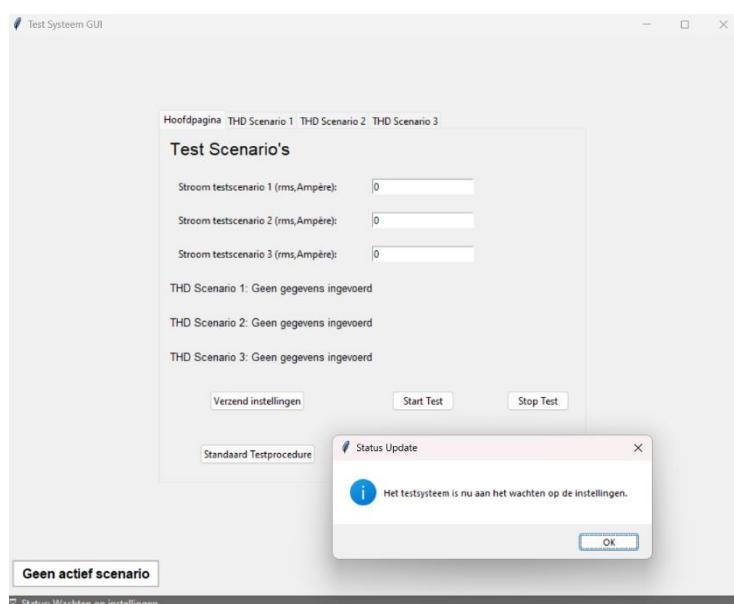
Typ de volgende opdracht en vervang jouw\_bestand.py door de naam van je Python GUI-bestand:

```
python jouw_bestand.py
```

```
C:\SCHOOL\Afstudeerstage_Stedin\Github\AFS30_testsysteem_Stedin\Vscode\GUI>python GUI_Code.py
```

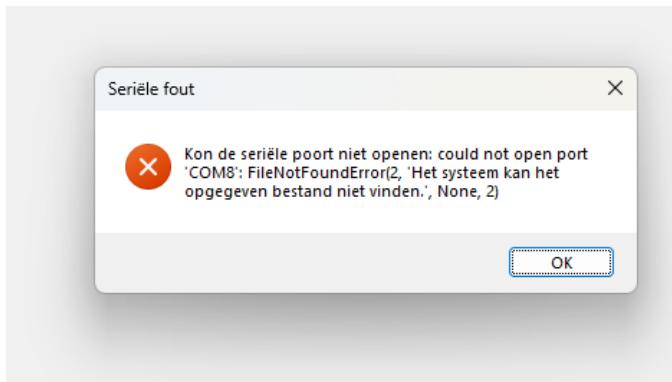
Figuur 10, het commando wanneer de bestandsnaam "GUI\_Code" is

Wanneer de bovenstaande commando's zijn uitgevoerd, zou de GUI moeten starten en na enkele seconden een melding moeten geven dat het testsysteem wacht op de instellingen (zie figuur hieronder).



Figuur 9, de melding van de GUI na succesvol opstarten.

Als je een foutmelding ontvangt zoals in Figuur 12 hieronder, kan dit erop wijzen dat het testsysteem niet verbonden is met de juiste COM-poort (bijvoorbeeld “COM 8”). Controleer op welke poort het testsysteem is aangesloten, open het Python-bestand, en wijzig de regel met de COM-poort naar de juiste waarde (zie Figuur 11). Sla het bestand op en herhaal stap 1 en 2.



Figuur 12, foutmelding bij een onsuccesvolle verbinding met de COM-poort.

```
try:  
|     self.ser = serial.Serial('COM8',115200, timeout=0.0001)
```

Figuur 11, de coderegel (regel 15) die moet worden gewijzigd om de COM-poort aan te passen.

## 6.4 Configureren van Testscenario's

In deze paragraaf wordt uitgelegd hoe de testscenario's geconfigureerd kunnen worden. De GUI biedt de testengineer de mogelijkheid om 6 testscenario's te simuleren: de eerste 3 zijn stroomtestscenario's en de laatste 3 zijn THD-scenario's (zie Figuur 13). Er zijn twee methoden om de testscenario's in te stellen:

- **Handmatige configuratie:** De testengineer vult de parameters handmatig in en klikt vervolgens op "Verzend Instellingen".
- **Standaard testprocedure:** Door op de knop "Standaard Testprocedure" te klikken, worden alle testscenario's automatisch ingesteld en naar het testsysteem verzonden.

The screenshot shows a user interface titled 'Test Scenario's'. At the top, there are tabs: 'Hoofdpagina', 'THD Scenario 1', 'THD Scenario 2', and 'THD Scenario 3'. Below the tabs, there are two main sections: 'Stroomtest scenario's' and 'THD testscenario's'. Under 'Stroomtest scenario's', there are three input fields labeled 'Stroom testscenario 1 (rms,Ampère):', 'Stroom testscenario 2 (rms,Ampère):', and 'Stroom testscenario 3 (rms,Ampère)'. Each field has a value of '0'. Under 'THD testscenario's', there are three status messages: 'THD Scenario 1: Geen gegevens ingevoerd', 'THD Scenario 2: Geen gegevens ingevoerd', and 'THD Scenario 3: Geen gegevens ingevoerd'. At the bottom, there are four buttons: 'Verzend instellingen', 'Start Test', 'Stop Test', and 'Standaard Testprocedure'.

Figuur 13, de testscenario's

#### 6.4.1 Handmatig configureren

Bij het handmatig instellen kan de testengineer zowel de stroomtestscenario's als de THD-scenario's configureren.

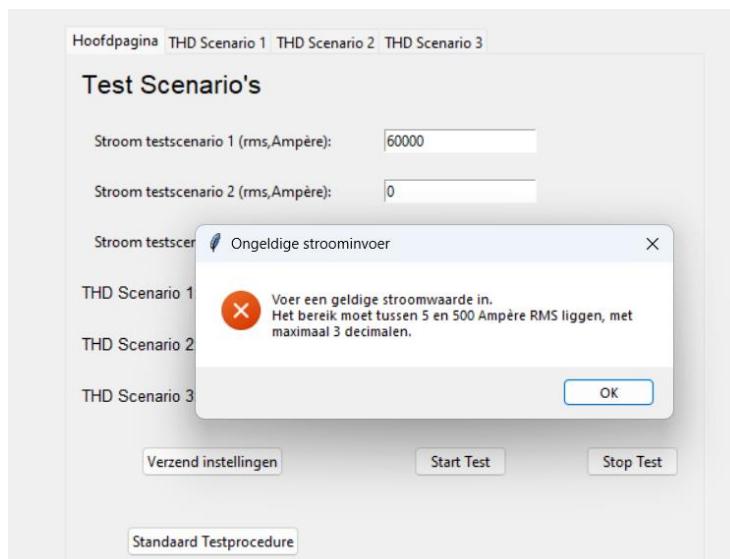
- **Stroomtestscenario's:**

De invoervelden voor de stroomtestscenario's bevinden zich op de hoofdpagina van de GUI.

Voor deze scenario's gelden de volgende parameterinstellingen:

- Minimum stroomwaarde: 5 A
- Maximum stroomwaarde: 500 A
- Maximale decimalen: 3

Als een stroomwaarde buiten dit bereik wordt ingevoerd, verschijnt een waarschuwing in de GUI, zie figuur hieronder:



Figuur 14, waarschuwingmelding bij het verkeerd invoeren van de testscenario's

- **THD-scenario's:**

De THD-scenario's kunnen worden ingesteld via de subpagina's naast de hoofdpagina in de GUI. Voer de gewenste waarden in de invoervelden in en klik vervolgens op "Opslaan" (Figuur 15) Voor de THD-waarden gelden de volgende parameterinstellingen:

- Stroomwaarde: zelfde parameterinstellingen als bij de stroomtestscenario's.
- Maximum percentage: 50%
- Minimum percentage: 5%
- Gehele getallen

Als een waarde buiten dit bereik wordt ingevoerd, ontvangt de gebruiker een foutmelding, zie Figuur 16

Hoofdpagina THD Scenario 1 THD Scenario 2 THD Scenario 3

RMS Stroom (Ampère):

3e Harmonische (%):

5e Harmonische (%):

7e Harmonische (%):

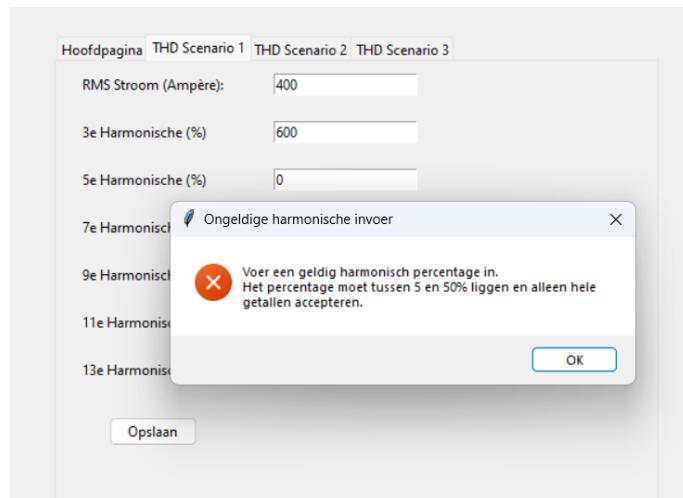
9e Harmonische (%):

11e Harmonische (%):

13e Harmonische (%):

**Opslaan**

Figuur 15, het opslaan van de THD-testscenario's



Figuur 16, foutmelding bij verkeerde invoer

Zodra alle gewenste testscenario's zijn ingevoerd, kan de testengineer op "Verzend Instellingen" klikken (zie Figuur 17). Na enkele seconden zal het testsysteem de status "Gereed" weergeven en ontvangt de testengineer een bevestigingsmelding, zoals in Figuur 18.

Hoofdpagina THD Scenario 1 THD Scenario 2 THD Scenario 3

### Test Scenario's

Stroom testscenario 1 (rms,Ampère):

Stroom testscenario 2 (rms,Ampère):

Stroom testscenario 3 (rms,Ampère):

Stroom L1, L2, L3: 400.0 A; THD% = (3e: 30%, 5e: 0%, 7e: 20%, 9e: 0%, 11e: 10%, 13e: 0%)

Stroom L1, L2, L3: 300.0 A; THD% = (3e: 12%, 5e: 0%, 7e: 15%, 9e: 0%, 11e: 0%, 13e: 0%)

Stroom L1, L2, L3: 200.0 A; THD% = (3e: 7%, 5e: 10%, 7e: 0%, 9e: 0%, 11e: 0%, 13e: 0%)

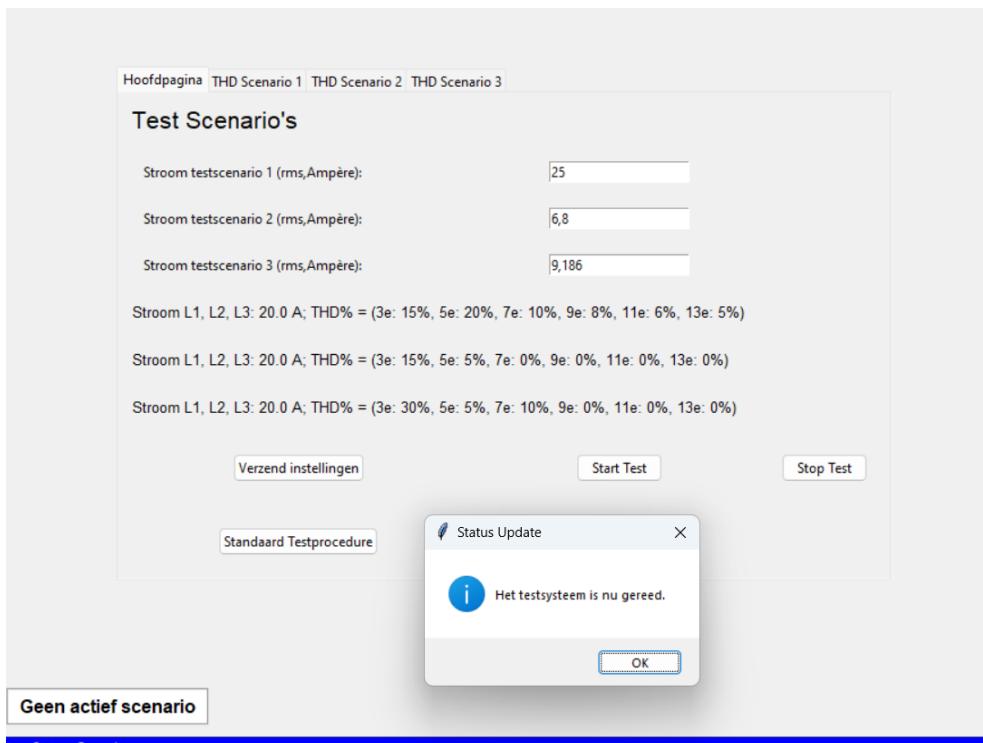
**Verzend instellingen**    **Start Test**    **Stop Test**

**Standaard Testprocedure**

Figuur 17, Het verzenden van de gewenste testscenario's naar het testsysteem

#### 6.4.2 Initiëren standaard testprocedure

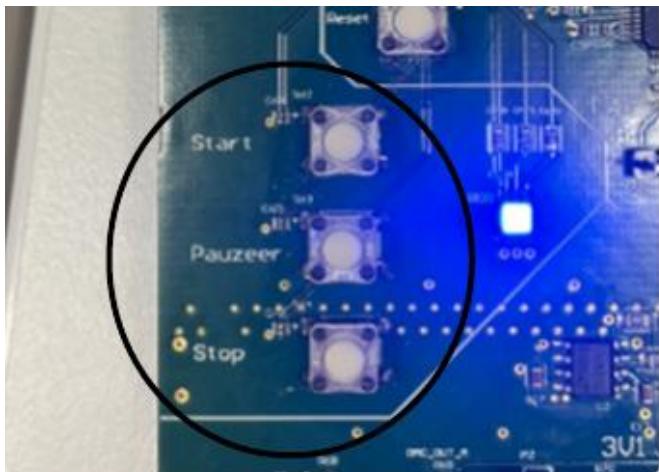
Om de standaard testprocedure te initiëren, klikt de testengineer op de knop "Standaard Testprocedure" in de GUI. Dit zal automatisch alle vooraf ingestelde waarden laden en naar het testsysteem versturen.



Figuur 18, Het initiëren van de standaard testprocedure

## 6.5 Het bedienen van de testprocedure

Nadat in de vorige paragraaf alle gewenste testscenario's zijn ingevoerd en ontvangen door het testsysteem, is het systeem klaar voor gebruik. Het testsysteem kan nu worden bediend via de drukknoppen op de PCB, in het user interface-gedeelte, zie figuur hieronder:



Figuur 19, het bedieningspaneel voor het bedienen van de testprocedure.

- **Starten van de Testprocedure**

Druk op de startknop om de testprocedure te starten. Het testsysteem zal de geselecteerde testscenario's één voor één uitvoeren, waarbij elk scenario 30 seconden duurt. Tijdens de testprocedure zal de RGB-LED groen licht uitstralen, en in de GUI wordt een melding weergegeven met het actieve scenario.

- **Pauzeren van de Testprocedure**

- Druk op de pauzeknop om de testprocedure tijdelijk te pauzeren. Het testsysteem zal het huidige scenario blijven simuleren, maar de tijd stopt en het systeem blijft in dezelfde scenario-stand tot de test hervat wordt. In de pauzestand zal de RGB-LED knipperend groen licht uitzenden, en de GUI toont een melding dat de test is gepauzeerd.
- Druk opnieuw op de startknop om de test te hervatten en door te gaan met de testprocedure

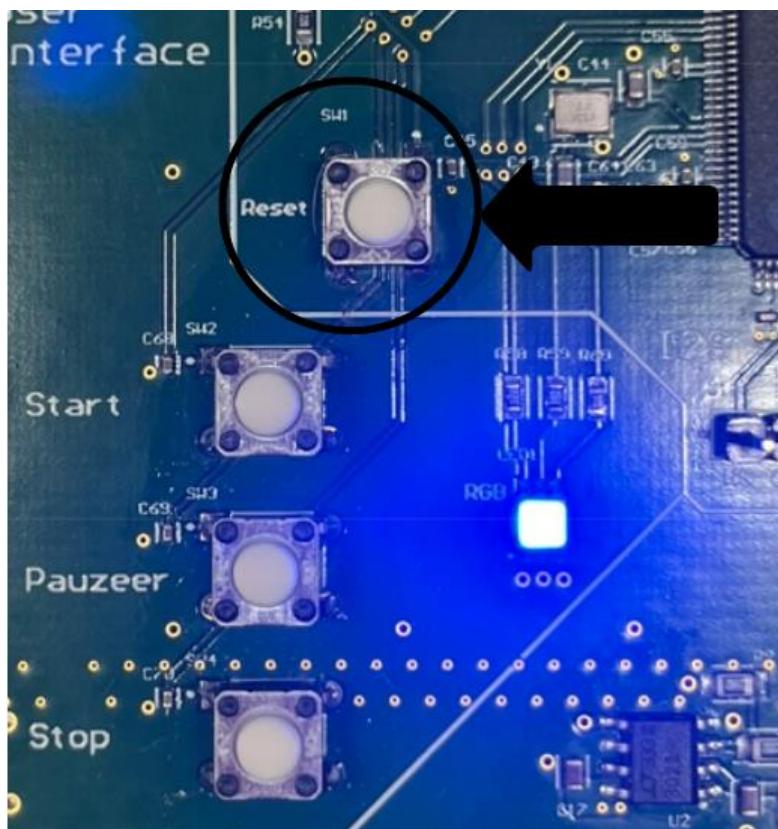
- **Stoppen van de Testprocedure**

Druk op de stopknop om de testprocedure volledig te stoppen. Het testsysteem zal stoppen met de simulatie en 0 ampère uitsturen naar het Smart Device. In deze toestand zendt de RGB-LED rood licht uit, en de GUI toont een melding dat de testprocedure is gestopt.

Zodra alle testscenario's zijn uitgevoerd, schakelt het systeem automatisch naar de status "**Voltooid**". In deze toestand zal de RGB-LED blauw knipperen en verschijnt er in de GUI een melding dat de test succesvol is afgerond.

## 6.6 Reset.

Het testsysteem kan op elk willekeurig moment gereset worden door op de resetknop te drukken (zie Figuur 20 voor de resetknop). Dit brengt het systeem terug naar de toestand "Wachten op Instellingen," zodat de testengineer alle gewenste testscenario's opnieuw kan invoeren. Hiermee wordt het systeem voorbereid voor een nieuwe testcyclus.



Figuur 20, resetknop

## 7 Firmware updaten

In dit hoofdstuk wordt uitgelegd hoe de firmware van het testsysteem kan worden bijgewerkt. Bij aansluiting op de voeding voert het testsysteem standaard de firmware uit die beschikbaar is via de volgende link:[\[Firmware\]](#).

Als de gebruiker wijzigingen in de firmware wil aanbrengen, kan dit door de nieuwe firmware te flashen met behulp van de STLinkV3Set-debugger. Verbind hiervoor de debugger via de JTAG-connector met het testsysteem (zie figuur hieronder).



Figuur 21, JTAG-connector

# Bijlage J: Opdrachtomschrijving

---

# Test station voor Net-Meetsystemen.

---

## Contactgegevens

---

**Student**

Younes Boulmani  
1012276  
1012276@hr.nl yboulmani@hotmail.com

**Bedrijfsbegeleider**

Mark Burghout  
mark.burghout@stedin.net

## 1 Opdracht informatie

### 1.1 Algemene Context

Stedin moet, net als alle distributie-netbeheerders flink aan de bak. Door de snelle elektrificeren van huishoudens en bedrijven ontstaan er continue nieuwe congestie punten waar deze nooit voorspeld waren. Daarom is het opeens belangrijk om veel uitgebreider te meten. Hiermee kan Stedin het net beter benutten en weet ze waar gebouwd moet worden. Een van de projecten die zich hier mee bezig houdt is het DA3 project. De DA3 is een meet systeem wat in alle MSR

(Middelspanningstationsruimtes) geplaatst moet worden, en daar de stroom door alle velden zal bemeten.

### 1.2 Aanleiding:

Binnen het DA3-project wordt een Smart Device met 8 poorten gebruikt voor het meten en distribueren van stromen in MSR's. De huidige testmethode met de Omicron is kostbaar en beperkt tot het testen van één poort tegelijk. We streven naar een efficiëntere testopstelling die het inductiespoelsignaal simuleert om het Smart Device effectiever te testen. Deze aanpak is niet alleen essentieel voor bestaande devices maar ook voor doorontwikkeling van DA3 en toekomstige projecten.

### 1.3 Probleemstelling:

Het huidige testapparaat, de Omicron, kan slechts één poort van het Smart Device tegelijkertijd testen. Het doel is om een eenvoudigere testoplossing te ontwikkelen die meerdere poorten gelijktijdig kan testen, waardoor de Omicron overbodig wordt. Tevens streven we naar de mogelijkheid om diverse scenario's te testen.

### 1.4 Context van de opdracht:

De opdracht omvat het ontwikkelen van een testopstelling met een programma waarmee diverse scenario's voor het Smart Device kunnen worden getest. De scenario's testen o.a. of het systeem de amplitude, frequentie van de stroom, en de hogere harmonische aandelen in de stroom.

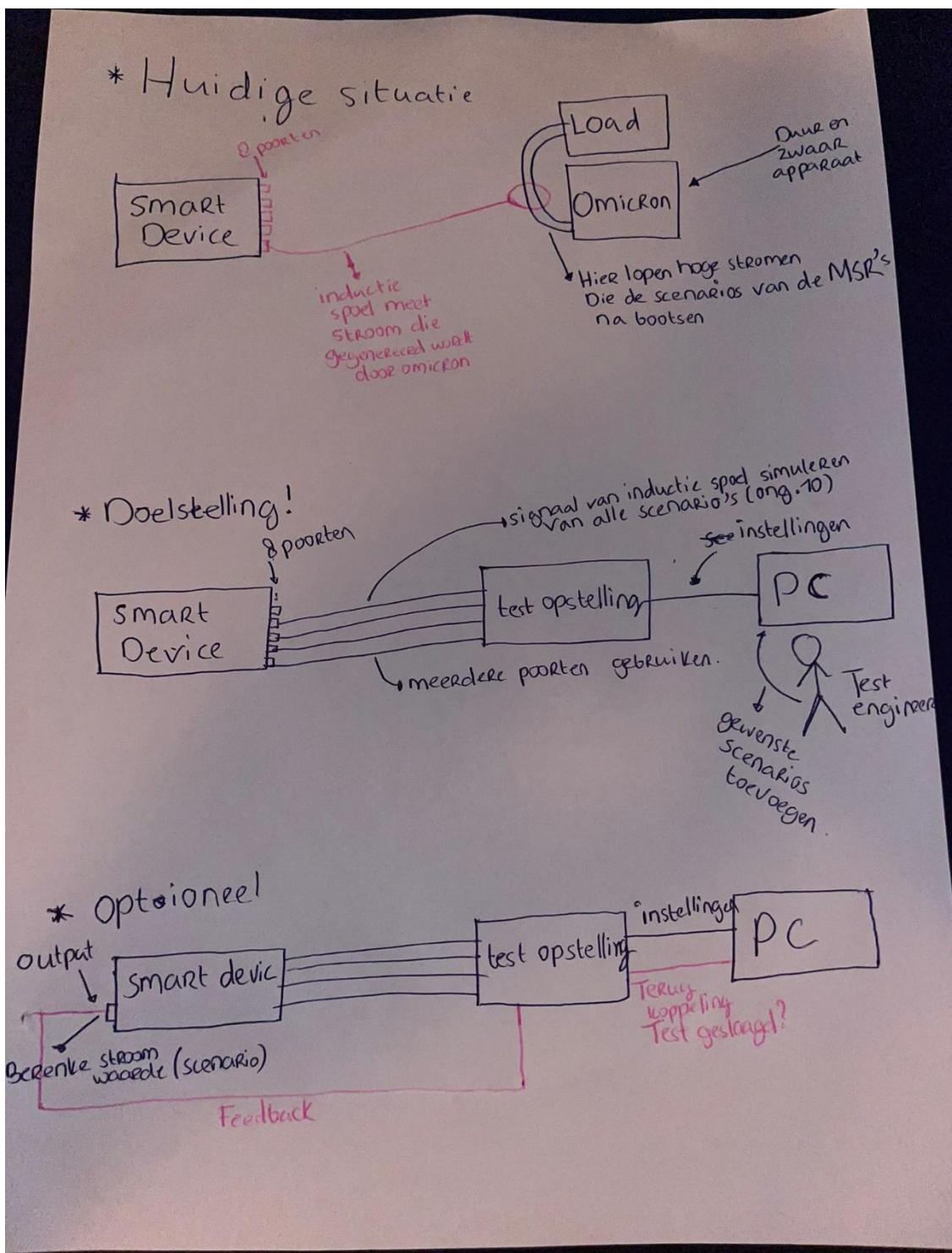
Een testengineer kan via een computer/machine de gewenste scenario's aan de testopstelling doorgeven. Optioneel kan de testopstelling automatisch de berekende stroomwaarde van het Smart Device controleren t.o.v de input en deze als feedback aan de gebruiker teruggeven.

### 1.5 Activiteiten

Enkele activiteiten die de stageopdracht omvat:

- Programmeren met een microcontroller.
- Het ontwerpen van een hoogwaardige PCB op niveau en bijbehorende firmware.
- Het maken van een GUI-applicatie waarbij de gebruiker testcases kan invoeren.
- Circa 10 scenario's simuleren.
- Het communiceren met het Smart Device Busmod-protocol (optioneel).

## 1.6 Schema



## 2 Onderdelen van Afstudeer-opdracht

Hogeschool Rotterdam heeft een aantal eisen met betrekking tot de afstudeeropdracht. In dit hoofdstuk zal de opdracht verdeeld worden naar de diverse onderdelen die Hogeschool Rotterdam eist. De onderdelen zijn:

### 2.1 Analyseren

- De wensen van de opdrachtgever aantoonbaar helder vertalen naar eisen waarop een ontwerp te baseren is.

### 2.2 Onderzoeken

- onderzoeken welke subset van scenario's nodig zijn om met zekerheid te zeggen dat de Smart Device naar behoeven functioneren
- onderzoeken welke signalen gegenereerd moeten worden voor deze scenario's
- onderzoeken wat de verwachte output zou moeten zijn in deze scenario's

### 2.3 Ontwerpen

- Ontwerpen van een systeem die meerdere aansluitingen (3 fase per aansluiting) kan testen door een set aan scenario's uit te voeren
- Ontwerpen van een systeem die meerdere aansluitingen (3 fase per aansluiting) kan bemeten.
- Ontwerpen van de firmware van de testopstelling.

### 2.4 Realiseren

- Maken van een test opstelling die de Smart Device kan testen

### 2.5 Beheren

- Documenteren van ontwerp en implementatie voor toekomstige gebruik en mutaties
- Schrijven van handleiding voor gebruik.

### 2.6 Managen

- Maken van een overzichtelijke en realistische planning/ Plan van Aanpak

### 2.7 Adviseren

- Welke scenario's genoeg zijn om de eisen van het product te testen

### 2.8 Professionaliseren

- Meedenken in workflow van ingangs-controles en mogelijk aanpassingen voorstellen voor efficiëntie.
- (mogelijk) automatische vergelijking van verwachte output signaal en werkelijke (pass/fail)

## Bedrijfsbeoordeling

### Beoordelingsadvies stage/afstuderen door de bedrijfsbegeleider



### Instituut voor Engineering en Applied Science Elektrotechniek

Naam student: Younes Boumani  
 Bedrijf: Stedin  
 Bedrijfsbegeleider: Mark Burghout

Z(wak), V(olndoende), G(oed),  
 U(itstekend) omcirkelen met  
 eventuele toelichting

#### Analyseren

- De wensen van de opdrachtgever zijn volledig en correct meegenomen in de door de student opgestelde eisen. (Z / V / G / U)
- De eisen zijn valide onderbouwd gezien de gebruikte criteria in het werkveld. (Z / V / G / U)
- Welke input van de student op het eisenpakket zijn voor het bedrijf bijzonder waardevol en waarom?

Younes gaf waardevolle adviezen over de mogelijke haalbaarheid van sommige eisen en vroeg ook goed door over het "waarom". Uiteindelijk leidde dit tot een aanpassing op de gewenste te testen stroomsterktes, wij hadden 20A-120A in gedachten omdat de Omicron ons daarbij limiteerde. Younes adviseerde dit hoger te zetten omdat zijn oplossing dat wel zou kunnen.

#### Ontwerpen

- De gemaakte ontwerpkeuzen en de onderbouwing ervan zijn voor het bedrijf goed bruikbaar. (Z / V / G / U)
- Het ontwerp houdt rekening met alle externe omstandigheden relevant voor het bedrijf en het product. (Z / V / G / U)
- Welke ontwerpkeuzen zijn bijzonder waardevol en waarom?

In eerste instantie was de gedachte om het device niet portable te maken. De Omicron kent immers ook enige beperkingen. Younes kwam met de suggestie om dit flexibeler aan te pakken. Het resultaat is een apparaat wat compact is en vanaf een accu gevoed kan worden zodat het ook in een MSR gebruikt kan worden.

#### Realiseren

- Het opgeleverde product voldoet aan alle relevant wensen van de opdrachtgever. (Z / V / G / U)
- De student heeft op relevante moment het product of onderdelen ervan gedegen getest en de resultaten zijn helder gedocumenteerd. (Z / V / G / U)
- Welke onderdelen van de realisatie van het product en/of de testen ervan zijn voor het bedrijf bijzonder waardevol en waarom?

Uiteindelijk zijn de portabiliteit en hogere stroomsterktes van grote waarde. Maar ook de mogelijkheid om tests te draaien zonder een volledige configuratie op een externe machine op te starten scheelt bijzonder veel tijd.

#### Beheren

- De projectdocumentatie is voor het bedrijf éénduidig bruikbaar en opgesteld volgens de normen van het bedrijf. (Z / V / G / U)
- De student heeft gebruik gemaakt van het binnen het bedrijf gebruikte versiebeheer of heeft deze geïntroduceerd. (Z / V / G / U)
- Welke onderdelen van de projectdocumentatie zijn voor het bedrijf bijzonder waardevol en waarom?

Younes heeft dit project goed aangepakt. Objectief kijkend is de beknopte handleiding natuurlijk het meest waardevol, dit stelt ook onervaren collega's in staat om tests te draaien.

#### Managen

- De student heeft zelfstandig een risicoanalyse en planning opgesteld, deze waar/wanneer nodig bijgesteld en daarnaar gehandeld. (Z / V / G / U)
- De student heeft systematisch een ontwikkelmethodiek gevolgd en de keuze daarvan onderbouwd. (Z / V / G / U)
- Welke projectmanagementactiviteiten van de student zijn voor het bedrijf bijzonder waardevol en waarom?

In principe was continu duidelijk waar het project zich qua voortgang bevond. Younes was heel open in het rapporteren hier over, ook toen er tegenslag was met het eerste prototype. Het klinkt misschien raar, maar juist de openheid over het traject is waardevol, het laat mensen die vastzitten in patronen zien dat niet alles goed kan gaan en dat open zijn daar over heel waardevol is.

**Adviseren**

- De student heeft het bedrijf tijdens of aan het eind van de stageperiode waardevolle adviezen gegeven.

(Z / V / G / U)

- Welke adviezen waren dat en wat is daarmee gedaan?

Wij kregen het advies om goed te kijken naar een doorontwikkeling van dit device om verder geautomatiseerd testen mogelijk te maken. Dit traject wordt in Q4 2024 opgestart. Te denken valt dan aan het uitlezen van de MEM units via modbus en de gemeten waarden toetsen met de input values.

**Onderzoeken**

- De student geeft blijk van een kritisch onderzoekende houding relevant voor het bedrijf en het project.

(Z / V / G / U)

- Welke onderzoeksresultaten zijn voor het bedrijf bijzonder waardevol en waarom?

Het belangrijkste was natuurlijk de bevestiging dat het beoogde apparaat daadwerkelijk te realiseren was.

.....

**Professionaliseren**

- De student heeft aantoonbaar gefunctioneerd als een vakbekwaam elektrotechnisch ingenieur.

(Z / V / G / U)

- De schriftelijke verslaglegging van de student is passend bij de opdracht en het bedrijf.

(Z / V / G / U)

- De student heeft heldere mondelinge communicatie binnen het bedrijf en de externe omgeving ervan.

(Z / V / G / U)

- Waaruit blijkt dat met name en waarom?

Younes heeft zijn afstudeerproject aangepakt als een serieus project, zoals wij van onze collega's ook verwachten.

.....

**Algemene indruk**

- Welk eindcijfer (1 – 10) zou u de student willen geven.

(..10...)

- Wat is de belangrijkste overweging om hiertoe te komen?

De belangrijkste overweging is hoe Younes omging met de tegenslag in zijn project. Hij ging niet bij de pakken neer zitten maar herpakte zichzelf en ging door.

Het device wat Younes heeft ontwikkeld is in een korte post op intranet gepreviewd. Dit gaf veel positieve response, en waarschijnlijk gaat dit device ook in andere teams landen (en worden er meerdere gefabriceerd).

**Datum:** 22-10-2024**Handtekening:** 

## Reflectieverslag

De afgelopen negen maanden voelden als een intensieve rollercoaster. Ik heb fijne momenten gehad, maar ook periodes waarin het behoorlijk zwaar werd, vooral tijdens het realiseren van het product. Ondanks dat ik keihard heb gewerkt, lange dagen maakte en zelfs in weekenden heb doorgewerkt, kon ik de eerste deadline niet halen. Dit was een bittere teleurstelling, vooral omdat ik mezelf als doel had gesteld om binnen vier jaar mijn diploma te behalen. Ik heb altijd zonder problemen mijn vakken in één keer afgerond, dus deze tegenslag kwam hard aan. Het voelde extra pijnlijk toen ik besefte dat ik het afstudeermoment niet kon delen met mijn goede klasgenoten en vrienden die hun diploma wel behaalden. Samen die mijlpaal vieren was een moment waar ik echt naar had uitgekeken.

Ondanks deze teleurstelling heb ik ontzettend veel steun ervaren. Mijn ouders hebben me door alles heen gesteund, en ook binnen Stedin voelde ik veel begrip. Ze hebben hun uiterste best gedaan om me goed te begeleiden, en vanuit school kreeg ik duidelijke instructies voor een succesvol herkansingstraject. Deze stage heeft me niet alleen veel geleerd over mijn vak, maar ook over mezelf. Ik heb ontdekt waar mijn sterke en zwakke punten liggen, en ik ben trots op de zelfstandigheid die ik tijdens deze stage heb laten zien. In mijn derdejaars stage had ik nog veel begeleiding nodig en was ik zoekende naar de juiste aanpak. Dankzij de ervaringen en leermomenten van dat jaar en het project PEE50 kon ik nu met veel meer zekerheid mijn afstuderen aanpakken. Ik documenteerde alles goed vanaf het begin, en ik was in staat om zelfstandig kennis te vergaren en zaken uit te zoeken zonder veel begeleiding van Stedin.

Ik heb ook geleerd dat het risicovol kan zijn om een embedded afstudeeropdracht uit te voeren in een bedrijf dat zich voornamelijk op power richt. Indien je dan vastloopt, zijn er maar weinig collega's met de expertise om je specifiek met embedded systemen verder te helpen. Toch heeft dit juist een positieve invloed gehad op mijn leerproces: ik moest zelf oplossingen vinden en problemen zelfstandig oplossen. Hoewel dit soms lastig was, heb ik er juist enorm veel van geleerd in korte tijd. Ik besef dat ik hierdoor veel meer kennis en ervaring heb opgedaan dan wanneer alles me was voorgekauwd door collega's.

Gedurende mijn stage heb ik nieuwe vaardigheden ontwikkeld, zoals het maken van een GUI met Python, het aansturen van een DAC en USB-communicatie. Naast deze nieuwe vaardigheden heb ik ook mijn opgedane kennis uit de opleiding praktisch kunnen toepassen, wat essentieel was om mijn product succesvol te maken.

Er zijn echter ook aandachtspunten waar ik aan wil werken. Soms denk ik te complex en ben ik te perfectionistisch. Ik wil altijd goed presteren en kwaliteit leveren, maar dit werkt soms ook tegen je. Ik blijf dan te lang hangen in details van een taak die eigenlijk niet zo essentieel is en verlies onnodig veel tijd. In de toekomst wil ik beter leren prioriteiten testellen en mijn tijd efficiënter in te delen. Een ander aandachtspunt is het scheiden van werk en privé. Als een werkdag niet helemaal succesvol was, merk ik dat ik blijf piekeren, zelfs nadat ik gestopt ben met werken. Dit kan ten koste gaan van mijn privéleven, omdat mijn hoofd dan nog bij het werk blijft.

Als ik terugkijk, ben ik trots op mezelf en de prestaties die ik heb geleverd. Van de 33 gestelde eisen heb ik er 31 gerealiseerd, en ik heb een bruikbaar product opgeleverd waar Stedin blij mee is en dat ze zo snel mogelijk willen inzetten. Ik ben dankbaar voor de begeleiding en kritische feedback die ik heb ontvangen van mijn begeleiders. De periode bij Stedin heeft me niet alleen veel nieuwe kennis en vaardigheden gebracht, maar ook waardevolle connecties en leuke ervaringen. Ik hoop dat ik met dit resultaat kan laten zien dat ik na vier jaar hard werken de benodigde engineercompetenties beheers. Ik kijk ernaar uit om mijn carrière als electrical engineer te starten, nieuwe dingen te blijven leren en mijn kennis toe te passen om een positieve bijdrage te leveren aan de samenleving.

## Competentie verantwoording

In deze sectie is een competentieverantwoording gegeven waar per competentie is aangegeven wat voor deze competentie is gedaan.

### Analyseren

Op basis van de wensen en vraagstelling van de klant zijn de opdracht, probleemstelling en doelstelling helder geformuleerd. Er is ook onderzocht welke maatschappelijke en financiële impact de realisatie van de doelstelling met zich meebrengt. In overleg met de bedrijfsbegeleider is vastgesteld welke functies het systeem moet hebben. Aan de hand van deze systeemfuncties zijn diverse functionele en niet-functionele eisen opgesteld.

Daarnaast is het systeem gemodelleerd met de Yourdon-analyse, waarbij alle eisen eenduidig, specifiek en verifieerbaar zijn vastgelegd. Er is gestreefd naar SMART-formulering van de eisen, die grondig zijn onderbouwd en verantwoord. Ook is het huidige testsysteem geanalyseerd, met aandacht voor de beperkingen ervan. Deze inzichten zijn verwerkt in het programma van eisen, zodat het nieuwe product een veel betere oplossing biedt.

### Ontwerpen

Deze competentie heb ik ontwikkeld door, op basis van de analyse en de opgestelde eisen, een architectuurontwerp te maken. In deze fase zijn verschillende ontwerpbeslissingen genomen en specificaties voor deelsystemen opgesteld, afgestemd op de eisen. Vervolgens is een detailontwerp gemaakt op basis van het gekozen architectuurontwerp. Hierbij zijn componenten vergeleken, en keuzes gemaakt op basis van specificaties en aspecten zoals duurzaamheid, nauwkeurigheid, flexibiliteit en complexiteit. Deze keuzes zijn zorgvuldig onderbouwd.

De schakelingen van de deelsystemen zijn ontworpen volgens de aanbevelingen uit de datasheets en er zijn simulaties uitgevoerd om de functionaliteit en betrouwbaarheid van het systeem te waarborgen. Bij het ontwerp is ook rekening gehouden met de testbaarheid en maakbaarheid van het product. Zo zijn er vooraf simulaties uitgevoerd en zijn er veel testpunten toegevoegd. Daarnaast is een PCB-ontwerp gemaakt, waarbij de verschillende PCB-keuzes goed zijn onderbouwd om een kwalitatief hoogwaardig product te leveren. Verder heeft de afstudeerde de firmware van het systeem ontworpen en gebruiksvriendelijke GUI die voldoet aan de wensen van de klant. Het firmwareontwerp is overzichtelijk gemoduleerd in schema's en flowcharts.

### Realiseren

Deze competentie heb ik ontwikkeld door de hardware en firmware van het testsysteem te realiseren. Ik heb ervoor gezorgd dat alle essentiële fabricagebestanden zijn geleverd aan het PCB-productiebedrijf en gecontroleerd of de PCB correct kon worden geproduceerd en geassembleerd. Vervolgens heb ik, volgens het V-model, de unit- en integratietesten uitgevoerd. Wanneer bepaalde belangrijke testen niet voldeden, ben ik teruggekeerd naar het ontwerp om de nodige aanpassingen door te voeren, zodat de testen succesvol konden worden behaald. Daarna heb ik acceptatietesten uitgevoerd om te verifiëren of het testsysteem aan alle klantwensen voldeed. De testprocedures en de benodigde apparatuur voor de acceptatietesten zijn daarbij uitgebreid beschreven. Uit het acceptatietestrappart blijkt dat ik alle belangrijke functionele en niet-functionele eisen van de klant heb gerealiseerd.

## Beheren

Tijdens mijn stage zijn alle belangrijke stappen gedocumenteerd, inclusief gedetailleerde beschrijvingen van keuzes en versiewijzigingen in de documentatie. Voor de firmware is gebruikgemaakt van het versiebeheersysteem Git, en alle belangrijke documenten en bestanden zijn terug te vinden in de GitHub-repository [Repository]. Het bedrijf had geen specifiek versiebeheersysteem in gebruik, waardoor ik zelf een systeem mocht kiezen. Daarom heb ik gekozen voor Git, omdat ik dit een fijne manier vind om zowel firmware- als hardwareversies te beheren. Daarnaast is er een uitgebreide handleiding van het product opgesteld, waarin aspecten zoals de werking en bediening van het product, technische specificaties en veiligheidsrichtlijnen zijn opgenomen. Dit zorgt ervoor dat het product goed overdraagbaar is en effectief gebruikt kan worden voor het testen van het Smart Device.

## Managen

Deze competentie heb ik ontwikkeld door:

- Het opstellen van een plan van aanpak.
- Het bijwerken van de planning op basis van opgetreden risico's.
- Het uitvoeren van een risicoanalyse.
- Het tussentijds evalueren van de risico's.
- Het up-to-date houden van de stakeholders over de voortgang van het project.

## Adviseren

Er zijn verschillende aanbevelingen gedaan voor verbeteringen aan het opgeleverde product en mogelijke toekomstige implementaties. Zo zijn er aanbevelingen gegeven om het testsysteem veiliger te maken door middel van ompoolbeveiliging en mobieler te maken door het systeem draagbaar te maken met een batterij en een ingebouwd display voor bediening zonder PC. Daarnaast heb ik aanbevelingen gedaan voor meer flexibiliteit in de testmogelijkheden en een betere samenwerking met Mikronika (het bedrijf dat de Smart Devices maakt) om zo nog betere testsystemen te ontwikkelen.

## Onderzoeken

Deze competentie heb ik ontwikkeld door uitgebreid onderzoek te doen naar de mogelijkheden om het signaal van de Rogowski-spoel te simuleren, zodat het huidige testsysteem met de Omicron vervangen kan worden. Hierbij heb ik verschillende methoden gebruikt, zoals theoretisch onderzoek, praktisch onderzoek en expertconsultatie. De conclusies van dit onderzoek waren van groot belang voor het verdere verloop van het project en hebben geleid tot de keuze voor de DAC-methode. Alle gebruikte bronnen voor het onderzoek zijn in de bijlage van het onderzoekshoofdstuk opgenomen volgens de APA-stijl, waarbij kritisch is gekeken naar de betrouwbaarheid en bruikbaarheid van de bronnen.

## Professionaliseren

Deze competentie heb ik ontwikkeld door de voortgang van het project wekelijks te bespreken met de opdrachtgevers. Ook werden belangrijke projectonderdelen en resultaten gedeeld met de stakeholders, waarbij alle feedback van de stakeholders werd verwerkt.

Daarnaast ben ik gedurende het project zelfstandig te werk gegaan. Bij vragen stuurde ik de docentbegeleider en opdrachtgevers een bericht, en de communicatie verliep gedurende het project altijd goed. Daarnaast heb ik een reflectieverslag en een competentieverantwoording vastgelegd.