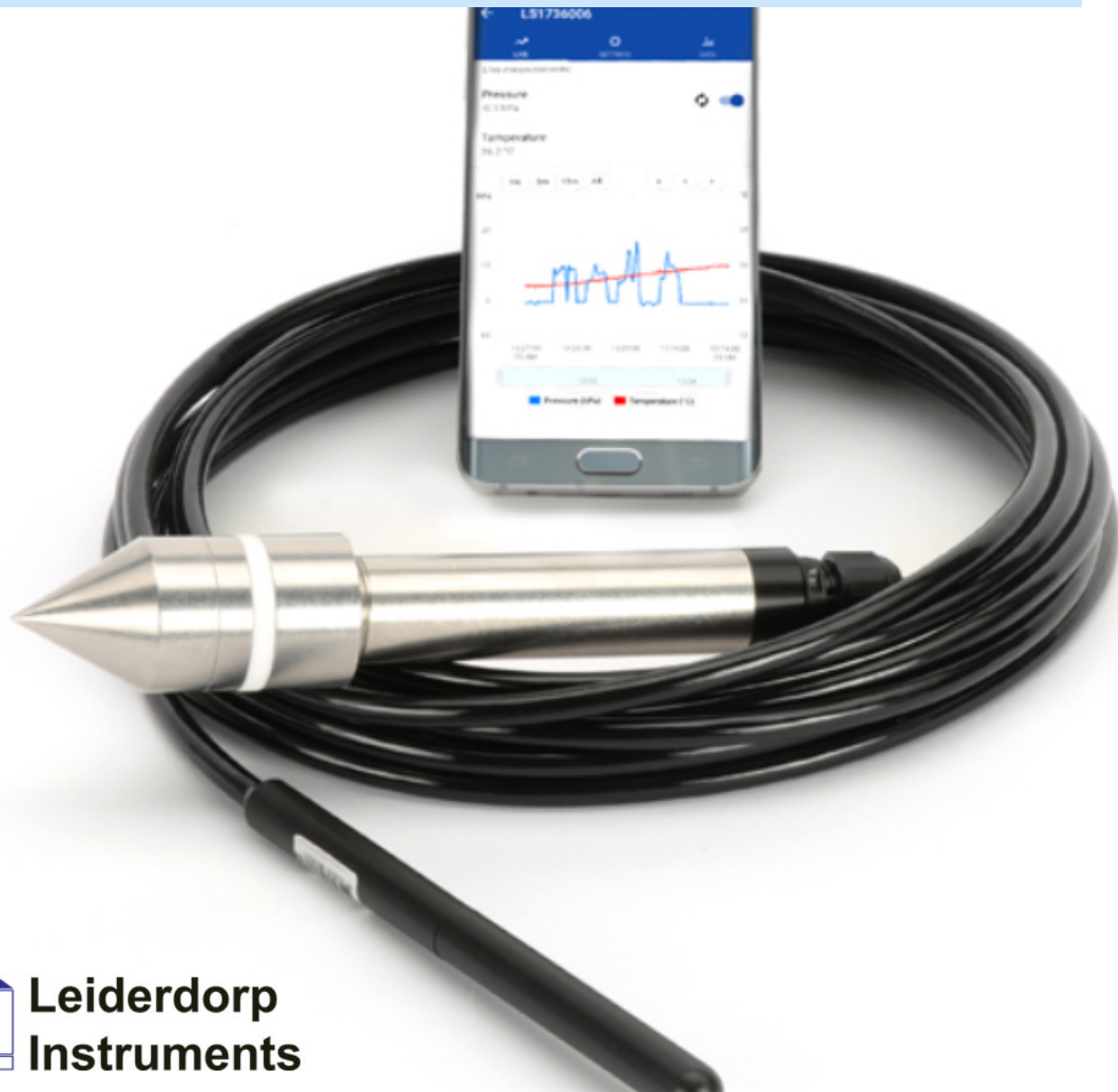


Geautomatiseerd kalibreren en testen van grondwaterloggers



 **Leiderdorp
Instruments**

DE HAAGSE
HOGESCHOOL

Pieter van der Lingen
Elektrotechniek
Afstudeerscriptie
29-05-2020 V1

Geautomatiseerd kalibreren en testen van grondwaterloggers

Gegevens afstudeerder

Naam	Pieter van der Lingen
Student nr.	14094258
Opleiding	Elektrotechniek
Instantie	de Haagse hogeschool
E-mail	pietervanderlingen@gmail.com
Telefoon	+31 6 40537133

Stagebedrijf

Leiderdorp Instruments	
Adres	Achthovenerweg 19 2351 AX, Leiderdorp
E-mail	info@LeiderdorpInstruments.nl
Telefoon	071 541 5514
Begeleider	Hans Liefing

Onderwijsinstelling

De Haagse hogeschool	
Opleiding	Elektrotechniek bachelor
Eerste begeleider	Morley, P.
Tweede begeleider	Kuiper, B.

Samenvatting

Voor Leiderdorp Instruments, een ingenieursbedrijf gespecialiseerd in productie van meetinstrumenten voor de bouw, is er een kalibratie systeem ontwikkeld om het productieproces te versnellen en de werknemers meer mogelijkheden te geven in het testen van de producten. Het te testen apparaat is een druksensor met logger die gebruikt wordt om de grondwaterstand te bepalen. Er is een systeem ontworpen dat een pneumatische opstelling aanstuurt om zo een referentiedruk te maken waaruit de kalibratiewaardes bepaald worden. Daarnaast moet het systeem data verzamelen over het stroomverbruik om de geproduceerde loggers te testen.

Een getest kalibratiesysteem is opgeleverd aan de opdrachtgever. Het systeem bevat een hardware kalibratie-opstelling die in connectie staat met een PC van waaruit het gehele kalibratie systeem wordt gecontroleerd. Deze opstelling bevat onder andere een stroommeter die via een schakelbare shunt met hoge precisie over een breed bereik kan meten. Op de microcontroller die op de hardware zit draait real-time firmware die de verschillende onderdelen aanstuurt. Ten slotte is er een PC applicatie die dient als gebruikersinterface voor het systeem.

Samen met de pneumatische opstelling vormt het systeem een handige tool voor de ontwikkelaars en productie medewerkers van Leiderdorp Instruments om de kwaliteit van de geproduceerde producten te waarborgen.

Summary

Leiderdorp Instruments is an engineering firm specialised in developing measurement equipment for building projects. This paper describes the development and implementation of a calibration and evaluation system for the hardware products of Leiderdorp Instruments. The target is a pressure sensor/logger which is used in determining the level of the groundwater by the waterpressure. A system is developed which controls a reference pneumatic component which provides a simulated pressure value for the target sensor and the reference sensor. An algorithm is able to control the pressure component and thereby determine the offset of the target sensor. Besides this, the system provides data of the current consumption of the target to give the engineers a tool to evaluate the produced hardware.

A tested calibration system has been delivered to the company. A physical hardware setup is connected to a PC and the rest of the system. The hardware setup contains a current meter with an automatic switching shunt to give it wide range properties while still being very accurate in the lower current range. The hardware setup runs a real-time firmware application which controls the different peripherals including the pneumatic system. Finally there is a PC application which acts as user interface for the system.

The system forms an usefull tool for the developers and production employees of Leiderdorp Instruments. It aquires high speed current data and is able to simultaneously control the pneumatic system and gain data from the different sensors which are embedded in the system. The PC application is able to control the system and able to find the calibration values for the target sensor without assistance from the user.

Voorwoord

Voor u ligt mijn afstudeerscriptie voor de elektrotechniek bachelor opleiding van de Haagse hogeschool. Het afstudeertraject was een interessante periode waarin ik veel geleerd heb over de ontwikkeling van meetapparatuur. Leiderdorp Instruments is mij bevallen als een fijne omgeving waarin veel technische kennis beschikbaar is en een gunstige werksfeer hangt.

De periode van het project was bijzonder vanwege de Corona-pandemie die tijdens het verloop van het project voor ingrijpende maatregelen in Nederland zorgde. Vergeleken met mijn omgeving heb ik er relatief weinig last van ondervonden maar het heeft wel impact gehad op de loop van het project. Ik heb gemerkt dat er een hoop mogelijkheden wegvielen die in een andere situatie aangegrepen zouden zijn om de verschillende problemen op te lossen. Dit heb ik zo goed mogelijk beschreven in het verslag.

Ondanks de chaotische periode denk ik toch een uitdagend technisch probleem opgelost te hebben. Niet alles in het project is even makkelijk verlopen als ik gehoopt had, maar ik ben toch tevreden over het uiteindelijke resultaat. Het ontwerp functioneert goed en ik ben er zeker van dat het een meerwaarde biedt aan de opdrachtgever.

Tenslotte wil ik nog speciaal de docenten bedanken die mij geholpen hebben bij het snel vinden van een nieuwe stageopdracht nadat mijn originele opdracht vlak voor aanvang wegviel. Daarbij ook dank aan Leiderdorp Instruments voor het beschikbaar stellen van deze opdracht. Verder nog dank aan mijn familie, vrienden en vriendin voor de steun tijdens deze periode.

Inhoudsopgave

Samenvatting	ii
Summary	iii
Lijst van figuren	ix
Lijst van tabellen	xi
Begrippenlijst	xiii
1 Introductie	1
1.1 Achtergronden	1
1.2 Probleemstelling	1
1.3 Doelstelling	2
1.3.1 Scope	2
2 Theoretisch kader	3
2.1 Principe van de grondwaterstandmeter	3
2.2 Stroommeting	4
2.2.1 Oriëntatie	4
2.2.2 Overzicht meetmethoden	5
2.2.3 Non-lineariteit	5
2.2.4 Onderzoeksresultaten	7

2.2.5	Datasnelheid & resolutie	9
2.2.6	Samenvatting van het onderzoek naar de stroommeter	11
2.3	Digitale isolatie	11
2.4	Kalibratie-algoritme	12
3	Methodes & overwegingen	14
3.1	Projectorganisatie	14
3.2	Test- & validatiemethodes	15
3.3	Gebruikte ontwikkeltools	15
3.3.1	Hardware ontwerp	15
3.3.2	Development omgeving & debugging	15
3.4	COVID-19	16
4	Ontwerp overzicht	17
4.1	Systeemoverzicht	18
4.2	Functies	18
4.3	Hardware	19
4.4	Software	21
4.4.1	Firmware	21
4.4.2	Applicatie	21
5	Hardware	22
5.1	Power	22
5.2	Stroommeting	23
5.2.1	Trigger	23
5.3	Interfaces & subsystemen	24
5.3.1	Druk regelen	24

5.3.2	Temperatuur sensor	25
5.3.3	ADC kalibratie	25
5.3.4	Communicatie sniffen	25
5.3.5	Externe modules en UI	26
5.4	Digitale isolatie voor communicatie naar de sensor	26
5.5	Programmeren van de target	27
6	Software	28
6.1	DLE-STX (LIC) protocol	28
6.2	Firmware LAUNCHXL	30
6.2.1	TI-RTOS	30
6.2.2	Software architectuur	31
6.2.3	Interfacing peripherals	32
6.2.4	Data snelheid & Real-time meten	32
6.2.5	Timing deadlines stroommeting	33
6.3	PC applicatie	35
6.3.1	Uitbreidbaarheid en deployment	36
6.3.2	Features	36
6.3.3	PC algoritmes en protocollen	38
7	Resultaten	40
7.1	Hardware	40
7.1.1	Stroommeter	40
7.1.2	Peripherals	44
7.1.3	Digitale isolatie	45
7.2	Firmware PCB	45
7.2.1	Functionaliteit	45

7.2.2	RTOS	45
7.2.3	Sample rate	45
7.3	Applicatie	47
7.3.1	Inzichtelijk maken stroommeting	47
7.3.2	Kalibratie-algoritme	47
7.4	Acceptatie	48
8	Conclusie	50
9	Reflectie	52
9.1	Aanbevelingen	52
9.1.1	Hardware	52
9.1.2	Stroommeter	52
9.1.3	Programmeer interface	53
	Bibliografie	54
	Bijlage index	56

Lijst van figuren

1.1	De levelstick grondwaterstand sensor/logger. Een van de target modules van het kalibratieproject	1
2.1	Overzicht van de eigenschappen van verschillende gebruikte technieken om stroom te meten [1]	5
2.2	Voorbeelden van potentiële non-lineaire meetgrafieken	6
2.3	Schema van een geregelde voedingsspanning met een high side shunt.	7
2.4	Schema van een variabele weerstand door middel van een transistor	8
2.5	Schema van een automatisch geschakelde shunt.	9
2.6	Visualisatie van het verschil tussen de metingen van de referentiesensor en target sensor.	12
4.1	Systeem overzicht	17
4.2	Een blokschema met een overzicht van de verschillende interfaces en onderdelen in de ontwikkelde PCB.	20
4.3	Het launchxl-CC26x2 development board is het aanstuurplatform voor de ontwikkelde hardware.	21
5.1	PCB layout van het kalibratiesysteem	22
5.2	Schema van het ontworpen meetcircuit	24
5.3	De Druck DPI pressure gauge wordt gebruikt om de referentiedruk te meten. . . .	25
6.1	Opbouw van een bericht volgens het communicatie protocol	28
6.2	Communicatie scenarios tussen de PC, het controle bord en de target sensor. . . .	29

6.3	Flowchart van de applicatiethread	31
6.4	Voorbeeld van verloop prioriteits scheduling tijdens een stroommeting waarbij de hoofdtak ook communiceert met de PC.	33
6.5	Interface van de ontwikkelde PC applicatie.	35
6.6	Meetinterface van de applicatie	36
6.7	Autokalibratie interface van de applicatie.	37
6.8	Productspecifieke interface van de applicatie voor de Levelstick	37
6.9	Flowchart van autokalibratie functie	39
7.1	Het geassembleerde kalibratiesysteem	41
7.2	Visualisatie van het inschakelen van de lage shunt met de waardes waarop de trigger reageert.	42
7.3	Meetresultaat van de test van de stroommeter	43
7.4	De opstartstroom van de Levelstick gemeten met een referentiestroommeter.	43
7.5	Stroommeting met de hysteresis van het schakelen zichtbaar.	44
7.6	Datasignaal seriële verbinding bij stroommeting. tussen de datablokken van de stroommeter wordt er een bericht verstuurd van de hoofdtak	46
7.7	Output van het kalibratielogaritme	47
7.8	Stroomverbruikgrafiek van een Levelstick met 2mA lekstroom bij het opstarten.	49

Lijst van tabellen

2.1	Overzicht van de conclusie van de geteste meet methodes	10
2.2	Indicatie van de benodigde ADC resolutie ENOB om een praktische meter te kunnen ontwerpen via de verschillende vergeleken meetmethodes.	10
2.3	Overeenkomsten grafiek (fig. 2.6)met output van de verschillende sensoren. . . .	12
3.1	Opgeleverde producten per projectfase	14
4.1	De beschrijving van de verschillende subsystemen	18
4.2	Overzicht van systeemfuncties en eisen	19
5.1	Lijst van interfaces van het systeem	26
6.1	Overzicht van de verschillende threads in de firmware applicatie	31
6.2	Overzicht van de verschillende events die afgehandeld worden in de hoofdtaak . .	32
7.1	Peripheral hardware resultaten	44
7.2	De commandolijst die het kalibratiesysteem herkent.	46
7.3	Overzicht van de mate van implementatie van de verschillende functionaliteiten. .	48

Begrippenlijst

Term	Beschrijving
- ADC	Analoog Digitaal Converter
- API	Application Programming Interface
- Baudrate	Rate waarmee een communicatielijn zijn waarde aan kan passen in veranderingen per seconden.
- ENOB	Effective number of bits
- GPIO	General Purpose In/Out
- I2C	Inter-Integrated circuit
- IC	Integrated circuit
- IDE	Integrated Development Environment
- Kalibratie opstelling	De ontwikkelde embedded hardware die de verschillende subsystemen aanstuurt.
- Levelstick	Grondwaterstand sensor/logger van Leiderdorp Instruments. Een van de target modules voor het kalibratiesysteem.
- LPF	Low pass filter
- MCU	Microcontroller unit
- MOSFET	Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor
- OP AMP	Operational amplifier
- PC	Personal computer
- PCB	Printed Circuit Board
- peripheral	Afzonderlijk apparaat dat de gebruiksmogelijkheden van een computer vergroot.
- Preemten	Het onderbreken van een lagere prioriteitstaak in de processor door een hogere prioriteitstaak.
- RS232	Recommended Standard 232, seriële communicatie standaard.
- target module/DUT	De verschillende hardwaressystemen die gekalibreerd worden door het systeem.
- TI-RTOS	Texas Instruments - Real Time Operating System
- UART	Universal Asynchronous receiver/transmitter

Hoofdstuk 1

Introductie

1.1 Achtergronden

Leiderdorp Instruments is een ingenieurbureau dat is opgericht in 1987. Inmiddels is het ook actief in de ontwikkeling, productie, verkoop, onderhoud en reparatie van eigen producten. Het bedrijf heeft als grootste focus het ontwikkelen van meetsystemen. Een onderdeel hiervan zijn meetsystemen die gebruikt worden in de bouw.



Figuur 1.1: De levelstick grondwaterstand sensor/logger. Een van de target modules van het kalibratieproject

Één van de producten die Leiderdorp Instruments ontwikkelt is een grondwaterlogger die de grondwaterstand bepaalt aan de hand van de gegevens uit een aangesloten waterdruksensor. (fig. 1.1) Deze logger bestaat uit een intern ontwikkelde PCB en een aangesloten druksensor van een externe fabrikant.

1.2 Probleemstelling

Bij de aankoop van de druksensoren die verbonden zijn met de grondwaterloggers wordt kalibratiedata meegeleverd vanuit de fabrikant. In de huidige situatie wordt deze kalibratiedata in de logger geladen waarna deze data gebruikt wordt om de meetwaarde bij te stellen. Echter is in het gebruik gebleken dat deze data niet altijd accuraat is waardoor de aangegeven waterstand soms enkele centimeters van de werkelijke waarde afligt. Om te voorkomen dat de geleverde meters verkeerde waardes aangeven, is de productieafdeling de sensoren gaan testen voor uitgave. Dit is een tijdrovend proces en er moet daarom een automatisch kalibratiesysteem komen om de meegegeven gegevens van de sensoren te controleren.

Een gerelateerd probleem is dat de loggers, die door een batterij gevoed worden, vaak uit de

productie komen met een hoger stroomverbruik dan de specificatie. Het effect is dat deze loggers dan bij een lege batterij teruggestuurd worden voor reparatie. Daar worden deze geanalyseerd en de fouten worden ontdekt. Om deze productiefouten in een eerder stadium te herkennen moet er een stroommeter komen die het verbruikspatroon van de hardware inzichtelijk maakt.

1.3 Doelstelling

Om de benodigde automatisatieslag te maken is er een project gestart waaraan deze scriptie verbonden is. Hiervoor is het volgende doel opgesteld:

Ontwerp, opzet en verificatie van een geautomatiseerd kalibratiesysteem toepasbaar op meerdere producten van de opdrachtgever, dat eenvoudig implementeerbaar is in het productieproces van de opdrachtgever.

Verder is bepaald dat er een stuk embedded hardware moet worden ontwikkeld (Kalibratie-opstelling) voor het aansturen van een druksysteem. De hardware moet in staat zijn tot het communiceren met- en programmeren van het *device under test* (DUT), in deze scriptie ook wel naar gerefereerd als het *target device*. Bij de ontwikkeling wordt als voornamelijke target module gefocussed op de Levelstick, (fig. 1.1) maar het kalibratiesysteem moet bruikbaar zijn voor meerdere producten van de opdrachtgever. Daarnaast moet het systeem in staat zijn om de target modules te programmeren.

Verder moet er een link zijn met een stuk te ontwikkelen Windows software dat in staat is om de kalibratie opstelling aan te sturen en te communiceren met de target modules.

Ten slotte moet het systeem verbonden worden met een database waarin alle gegevens van de producten worden opgeslagen evenals hun reparatiegeschiedenis.

1.3.1 Scope

Er is een scope bepaald voor het project wat garandeert dat zowel de student zijn technische eisen voor de scriptie kan halen als dat de opdrachtgever een werkend en nuttig product krijgt binnen de vastgestelde tijd.

Het project liep van 10-02-2020 tot 29-05-2020 bij Leiderdorp Instruments. In deze tijd is het ontwerp en de realisatie van het kalibratiesysteem voltooid. Deze scriptie is opgesteld voor de Haagse Hogeschool opleiding elektrotechniek in het kader van het afstuderen.

De scope is verder omschreven in het plan van aanpak. In hoofdstuk 4 ontwerpoverzicht wordt verder ingegaan op de technische eisen waaraan het project moet voldoen.

Hoofdstuk 2

Theoretisch kader

Voor het ontwerp is onderzoek gedaan naar de beste technische oplossingsmethoden voor de verschillende problemen. Dit hoofdstuk beschrijft de uitvoering en de resultaten van het verichte onderzoek. Daarnaast worden de principes uitgelegd die essentieel zijn voor het begrip van de werking van het ontworpen systeem.

2.1 Principe van de grondwaterstandmeter

De target sensor is een waterstandmeter die de diepte in een vloeistof meet via hydrostatische druk. Een vloeistof oefent druk uit op een object afhankelijk van de diepte van dat object omdat er meer gewicht van vloeistof zich boven het object bevindt hoe dieper het geplaatst is. [2] De diepte kan afgeleid worden via formule 2.1.

$$P_{object} = r * g * h + P_{atmosfeer} \quad (2.1)$$

Waar:

P = Druk

r = (rho) dichtheid van een vloeistof

g = gravitatieconstante

h = Diepte van het object

Om de diepte vanuit de druk te bepalen moet de dichtheid van het water en de atmosferische druk bekend zijn. De dichtheid van het water is afhankelijk van de temperatuur en het zoutgehalte van het water. om te compenseren voor deze factoren is de druksensor uitgerust met een temperatuursensor en kan bij de plaatsing bepaald worden wat het zoutgehalte is. Voor de atmosferische druk kan worden gecompenseerd via de data van een nabijgelegen barometer of er kan gebruik gemaakt worden van een sensor die de druk meet relatief aan de luchtdruk.[3]

Voor het kalibreren van de druksensor moet het systeem de mogelijkheid hebben om een bepaalde waterdruk te simuleren. Dit gebeurt door een luchtdruk te pompen in een pneumatische opstelling waar de referentie en target sensor op zijn aangesloten. Met deze gegevens is het mogelijk om na het kalibratieproces de grondwaterstand te bepalen.

2.2 Stroommeting

Er zijn twee redenen waarom men inzicht wil krijgen in het stroomverbruik van de sensor. Ten eerste werken de sensoren voor lange duur op een batterij. De product leverancier, oftewel de opdrachtgever, van de grondwaterstandlogger wil graag inzicht krijgen in het verbruik om zo de levensduur van de batterij te kunnen garanderen. Daarnaast is het analyseren van het stroomgebruik een methode om te volgen welke fases van operatie de logger doorloopt. Door het lage stroomverbruik in ruststand en de stroompieken tijdens draadloze transmissie van de data is het belangrijk om over een groot bereik de stroom te kunnen meten.

In de huidige situatie is er een afweging tussen resolutie en bereik. Het nieuwe systeem moet inzicht geven in het hele bereik van mogelijk stroomverbruik, wat tot twee ampère op kan lopen, zonder concessies te doen aan de resolutie in het lagere bereik.

2.2.1 Oriëntatie

In de oriëntatie is gekeken naar de minimale specificatie-eisen. Er zijn drie specificaties vastgesteld waaraan het systeem moet voldoen.

bereik	2 A
resolutie lage bereik	1 μ A
sample rate	5000 samples per seconde

De bereik- en resolutie-eis zijn bepaald door de opdrachtgever. De benodigde samplerate is bepaald door te kijken naar de *decouplingscondensatoren* van de target module. Door de target module te modeleren als een variabele weerstand met de opgetelde decouplingscondensatorwaarde parallel geschakeld, kan een inschatting gemaakt worden wat de minimale samplerate moet zijn om het verbruikspatroon te kunnen weergeven.

Het is belangrijk om mee te nemen dat het systeem waarop ontworpen wordt gelimiteerd is op de snelheid waarmee data verwerkt kan worden. Het systeem bevat niet genoeg extern geheugen om een precieze meting met een hoge datasnelheid voor meerdere seconden op te kunnen slaan. [4] Daarom wordt de maximale datasnelheid bekeken tussen de analoog digitaal omzetter en de PC die de data verwerkt.

2.2.2 Overzicht meetmethoden

Na een analyse van de verschillende meetmethodes en de beschikbare componenten op de markt zijn verschillende oplossingen onderzocht om stroom te kunnen meten. De meeste onderzochte oplossingen maakten gebruik van de wet van Ohm waarbij een stroom omgezet wordt naar een spanningswaarde. Het bereik van indirecte methodes, zoals de HALL effect sensor, met de commercieel verkrijgbare componenten is nog niet ontwikkeld tot de precisie die vereist is voor het doel. Er is in een vroeg stadium besloten deze methoden niet verder te onderzoeken.[1]

	Bandwidth	DC Capable	Accuracy	Thermal drift [ppm/K]	Isolated	Range	Power Loss
Shunt Resistor • Coaxial • SMD	MHz kHz-MHz	Yes	0.1% – 2%	25 – 300	No	kA mA – A	W – kW mW – W
Copper Trace ¹	kHz	Yes	0.5% – 5%	50 – 200	No	A – kA	mW
Current Transformer	kHz-MHz	No	0.1% – 1%	< 100	Yes	A – kA	mW
Rogowski Coil	kHz-MHz	No	0.2% – 5%	50 – 300	Yes	A – MA	mW
Hall Effect ¹ (open-loop / closed-loop)	kHz	Yes	0.5% – 5%	50 – 1000	Yes	A – kA	mW
Fluxgate	kHz	Yes	0.001% – 0.5%	< 50	Yes	mA – kA	mW – W
AMR Effect ¹ (closed-loop, core-less)	kHz	Yes	0.5% – 2%	100 – 200	Yes	A	mW
Core-less open-loop (GMR, AMR, Hall Effect) ¹	kHz	Yes	1% – 10%	200 – 1000	Yes	mA – kA	mW
Fiber-Optic Current Sensor ¹	kHz-MHz	Yes	0.1% – 1%	< 100	Yes	kA – MA	W

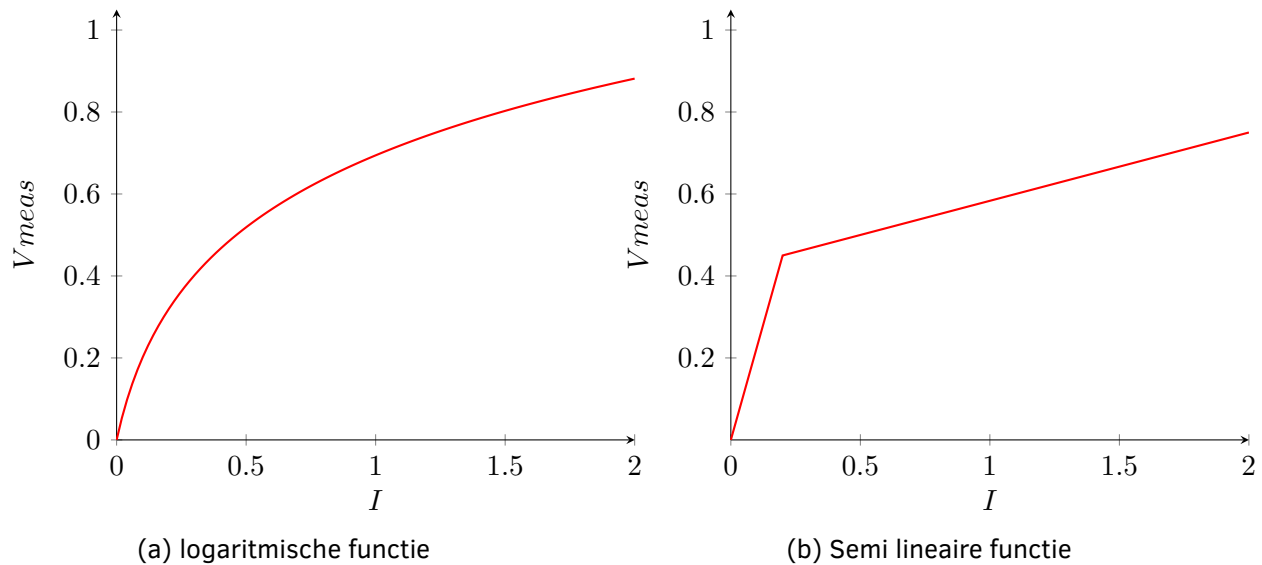
¹ Using temperature compensation electronics

Figuur 2.1: Overzicht van de eigenschappen van verschillende gebruikte technieken om stroom te meten [1]

De shunt resistor is een relatief eenvoudige manier om stroom te meten. De spanningsval over een weerstand in de te meten stroomlijn wordt gebruikt om de stroom te meten.[1][5] Vanwege het groote stroom bereik en de gevraagde precisie vormt zich hier echter een probleem. Er is bepaald dat de spanningsval over de target sensor niet meer mag zijn dan $200mV$. Bij een hogere spanningsval hebben experimenten aangetoond dat de werking van de targetmodule niet meer verzekerd kan worden. Er is afgeleid dat er om het bereik van zes decades accuraat te kunnen meten er een zuivere meting en versterking moet zijn van 120dB.

2.2.3 Non-lineariteit

Er is gekeken naar een niet lineaire relatie tussen de stroom en spanning. Uiteraard is lineariteit eenvoudig om gemeten spanningswaardes om te kunnen rekenen naar de stroomwaarde. Het zou echter voor het gebruik nuttig kunnen zijn om meer Volt per ampere te meten in het lage stroom bereik dan in het hoge bereik. In figuur 2.2 staan twee voorbeelden van niet lineaire verhoudingen tussen de gemeten stroom en meetspanning.



Figuur 2.2: Voorbeelden van potentiële non-lineaire meetgrafieken

Om deze relaties tussen stroom en meetspanning te realiseren is er gekeken naar het gebruik van halfgeleiders in de stroommeter. Onder de ideeën die onderzocht zijn vallen onder andere een diode als shunt en het gebruik van een stroomspiegel. [6] De argumenten om deze ontwerpen niet tot de testfase door te laten gaan waren een gebrek aan beschikbare ontwikkeltijd, de significante temperatuursinvloed of niet beschikbare componenten.

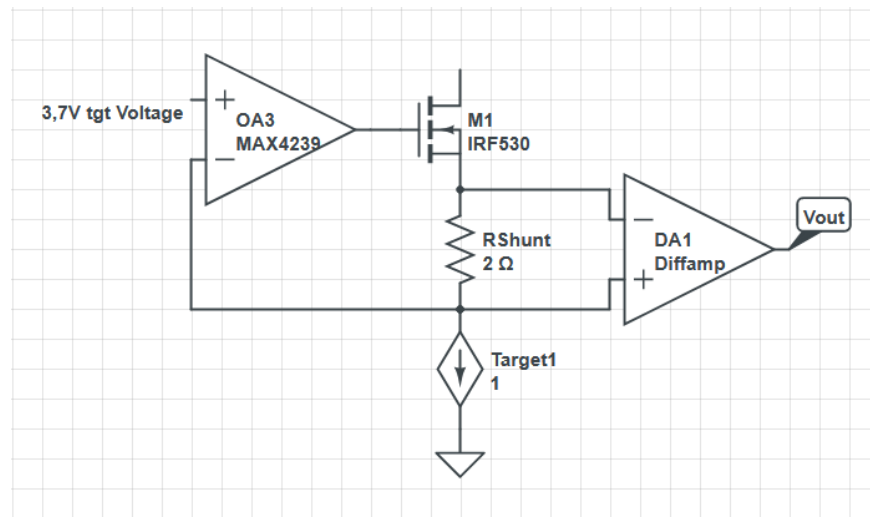
Één van de methodes om een niet lineaire grafiek te krijgen die inzicht biedt in de kleine stromen zonder concessies op het bereik, is het gebruik van een logarithmische versterker (log amp) over de shunt. Een log amp maakt gebruik van de logarithmische relatie tussen de spanning en de stroom van een *forward biased diode*. [7] Echter is de gangbare methode vooral ideaal bij stroommeters met een lager bereik (nA-mA). Er ontstaan bij hogere stromen problemen met de vermogens die gedissipeerd moeten worden. [6]

De meest belovende methode is het gebruik van halfgeleiders om de shuntwaarde aan te passen als de stroommeting in het hogere gebied van het bereik komt. Dit kan geleidelijk door het gebruik van de eigenschappen van transistoren of direct door het op- of afschakelen van een weerstand. Om deze methodes te valideren zijn proefopstellingen gemaakt en tests uitgevoerd.

Naast het aanpassen van de shunt is gekeken naar het regelen van de spanning aan de *high side* van de target. Hierbij is geprobeerd om een systeem te ontwerpen waarbij er een shunt gebruikt wordt zonder dat de target een spanningsval merkt.

2.2.4 Onderzoeksresultaten

Van drie ontwerpen is een testopstelling gemaakt en zijn de eigenschappen in kaart gebracht. In bijlage 1 zijn de lab aantekeningen te vinden van de verschillende tests. In dit stuk zullen de verschillende ontwerpen globaal besproken worden.



Figuur 2.3: Schema van een geregelde voedingsspanning met een high side shunt.

Methode 1: High side shunt met spanningscompensatie

Een van de onderzochte oplossingen is het gebruik van een OP-AMP om de spanningsdrop van de weerstand te compenseren. (fig. 2.3) In theorie geeft dit de mogelijkheid om een stroommeting te doen waarbij de spanning geleverd aan de logger niet afwijkt bij grote stromen.

In de praktijk echter, is het ontwerp erg gevoelig voor ongewenste spanningspieken en oscilaties. Simulaties en berekeningen met eventuele oplossingen om het signaal stabiel te maken hebben aangetoond dat hoewel er methodes zijn om oscilaties te voorkomen, dit ten koste gaat van de precisie van de meting en daarom niet gewenst is voor de applicatie. Als de target plotseling minder stroom vraagt kan er, door een vertraagde reactie van de regelaar, een spanningspiek ontstaan over het target device.

Met ideale componenten is het mogelijk een systeem te ontwerpen waarbij er zonder spanningsval de stroom gemeten kan worden. Echter, de eigenschappen van de reële componenten kunnen grote effecten hebben op het gedrag. Het is niet tijdefficient om deze in kaart te brengen omdat succes met echte componenten niet eenvoudig gegarandeerd kan worden.

Methode 2: Variabele shunt door middel van een transistor

De tweede methode is het variabel maken van de shunt doormiddel van het gedeeltelijk parallel schakelen van een transistor. In figuur 2.4 is een voorbeeld van een circuit met variabele shunt. Een semi lineaire verhouding (fig. 2.2) kan gerealiseerd worden door gebruik te maken van de verschillende operatiefases van de transistor. Er kan worden afgeleid dat in de cutoff-region van de NPN transistor geldt:

$$V_{out} = I_{in} * (R1 + R2) \quad (2.2)$$

Waar in het actieve gebied geldt:

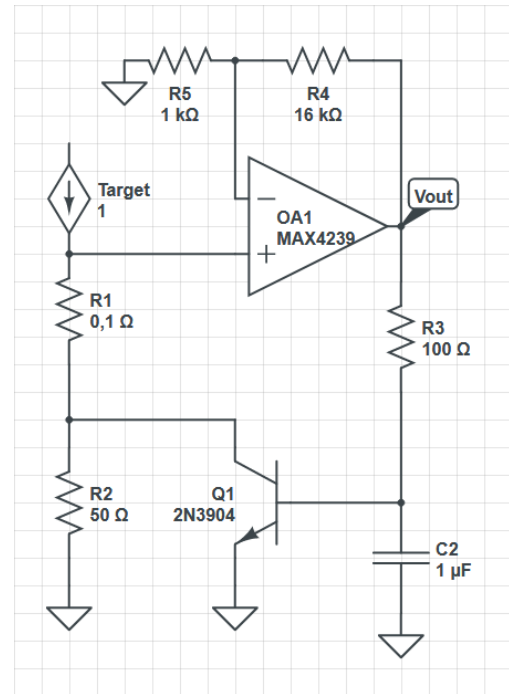
$$V_{out} = R1 * I_{in} + R2(I_{in} - \beta I_b) \quad (2.3)$$

Met gebruik van deze eigenschappen kan een shunt worden ontworpen die bij een lage stroom een hoge weerstand heeft, maar vanaf een bepaald punt (einde van de cut-off region van de transistor) de weerstand linear kleiner maakt afhankelijk van de shuntspanning. Hierdoor blijft de spanningsval bij hoge stromen binnen de gestelde limieten. Dit gebeurt door I_b (for. 2.3) afhankelijk te maken van de uitgangsspanning.

Een limiet waar rekening mee gehouden moet worden in dit circuit is dat de *collector-emitter saturation voltage* ($V_{CE(sat)}$) van de transistor niet bereikt wordt tijdens de meting. Dit vraagt aandacht tijdens het ontwerp en het gebruik van een transistor met een erg lage $V_{CE(sat)}$.

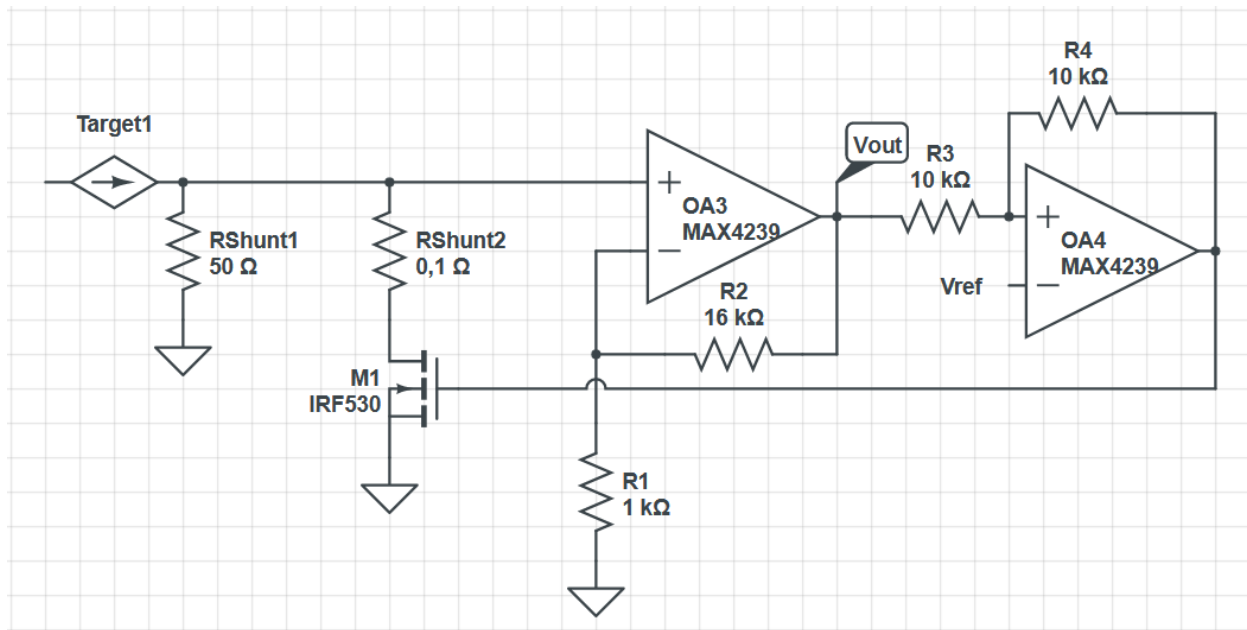
Tests hebben aangetoond dat bij stromen die op hoge snelheden langs de grens tussen de cut off region en de *active region* gaan er imperfecties ontstaan in de meting. Ook is aangetoond dat de meting gevoelig is voor temperatuur invloeden.

Een vergelijkbare schakeling met een MOSFET kan ook gerealiseerd worden. Echter is de daadwerkelijke stroom minder eenvoudig te bepalen uit de uitgangsspanning vanwege de kwadratische verhouding tussen de gate-source spanning en de drain-stroom.(for 2.4)



Figuur 2.4: Schema van een variabele weerstand door middel van een transistor

$$I_d = K_n(V_{gs} - V_{th})^2 \quad (2.4)$$



Figuur 2.5: Schema van een automatisch geschakelde shunt.

Methode 3: Geschakelde shunts

De laatste geteste methode maakt gebruik van een shunt die geschakeld wordt door een *schmitt trigger*. Deze methode heeft als nadeel en als voordeel dat een meetwaarde kan corresponderen met verschillende absolute stroomwaarden. De werkelijke stroomwaarde kan bepaald worden aan de hand van de stand van de schmitt trigger. Dit vereist digitale modificatie van de meetwaarde in het MCU platform. De resultaten zijn positief. De shunt schakelt in de proefopstelling na 10 μsec . Met een lage spanningsval kan het gehele bereik gemeten worden met een enkele *trap*. Een bijkomend voordeel is dat doordat het spectrum van het spanningsbereik dubbel gebruikt wordt, het gebruik van een zeer precize analoog digitaal converter niet nodig is.

2.2.5 Datasnelheid & resolutie

De gemeten waarde moet inzichtelijk worden op de PC. Daarvoor moet gekeken worden naar een analoog-digitaal conversie van de meting en moet er bepaald worden wat de overdrachtssnelheid is van de data van de ADC naar de PC applicatie.

Analoog digitaal conversie

Meerdere analoog-digitaal converters (ADC) zijn vergeleken voor de toepassing. Één van de leidende factoren in de selectie is het *effective number of bits* (ENOB). Dit getal geeft aan hoe-

Methode	Conclusie	Toelichting
High side shunt met spanningscompensatie	Niet geschikt	De lineaire meting stelt strenge hardware eisen aan de digitale kant van het systeem. Door niet ideale componenten en het vertraagd schakelen van de transistoren kunnen er spanningspieken en oscilaties ontstaan over de target module.
Variabele shunt doormiddel van een transistor	Mogelijk	Het systeem kan efficiënt gebruikmaken van het bereik over de shunt door de shuntwaarde te verlagen bij hogere stromen. Het effect is een schakelpunt waarbij $A = \frac{\Delta U_{out}}{\Delta I}$ verandert. Het hoogfrequent schakelen rond dit punt levert vervorming van het signaal op. Ook is er een significante temperatuursinvloed op de meting.
Geschakelde shunt	Aangeraden	Een geschakelde shunt door middel van een analoge trigger geeft het effect dat het spectrum tot de toegestane spanningsval met veel overlap gebruikt wordt. Rond het schakelpunt van de trigger zijn er echter wel vervormingen op het signaal.

Tabel 2.1: Overzicht van de conclusie van de geteste meet methodes

veel bits significant zijn voor de meting en niet beïnvloed worden door noise en distortion die optreedt.[8]

Type meting	Resolutie	Benodigde ENOB
lineaire meting	$2 \cdot (10^6)$	20+
Semi linear met variabele shunt	$10^4 - 10^5$	13-18
geschakelde shunt enkele trap	2000	11
geschakelde shunt twee trappen	1000	10-11

Tabel 2.2: Indicatie van de benodigde ADC resolutie ENOB om een praktische meter te kunnen ontwerpen via de verschillende vergeleken meetmethodes.

Voor de keuze van de ADC is het ENOB een belangrijk getal. Tabel 2.2 geeft een indicatie hoeveel ENOB nodig is om een praktische stroommeter te ontwerpen volgens de bepaalde eisen. Dit houdt in dat er een resolutie is van $1\mu A$ in het lagere bereik en er tot $2A$ gemeten kan worden.

Analyse van de commercieel beschikbare componenten heeft uitgewezen dat de *high-end* commercieel verkrijgbare componenten tot ongeveer 21 ENOB komen op de vereiste frequentie. In vergelijking kan de interne ADC van de TI CC2652 MCU komen tot 11 ENOB bij de benodigde frequentie.[4]

Data

Er zijn nog twee potentiële limiterende factoren in het digitale domein. Ten eerste kan het van belang zijn om ruimte op de processor vrij te houden voor andere taken dan data acquisitie en verwerking. Daarnaast kunnen er limieten liggen in de transmissie snelheid van de verschillende communicatie interfaces. Hierom is onderzocht waar de bottlenecks in de data verwerking en transmissie liggen. Aan de hand van die resultaten is er een afweging gemaakt tussen complexiteit en belasting van de microprocessor.

Hiervoor zijn een aantal methodes onderzocht en zijn de praktische oplossingen geïmplementeerd in het ontwerp. De conclusie is dat de vereiste datasnelheid haalbaar is met de interne UART verbinding over de debug probe. Een eventuele andere optie is het gebruik van een externe UART interface naar de PC. Dit voegt echter onnodige complexiteit toe.

2.2.6 Samenvatting van het onderzoek naar de stroommeter

Er moet een stroommeter ontworpen worden die over een bereik van 2A meet. De meter moet een resolutie van $1\mu\text{A}$ hebben in het lagere spectrum. Omdat er in het hogere bereik geen eis is voor een hoge resolutie ontstaan er nieuwe mogelijkheden naast een simpele lineaire meting.

Er is gekeken naar gebruik van sensoren die gebruik maken van elektromagnetische eigenschappen van stroom. De conclusie is dat alleen een shunt die stroom omzet in spanning geschikt is voor de toepassing. Er zijn meerdere methodes onderzocht om via een non lineaire meetgrafiek de eisen omtrent precisie en snelheid van de benodigde hardware te verlichten. Drie methodes hiervan zijn gebouwd en getest. (tab. 2.1) De resultaten gaven weer dat twee van de drie methodes aan de systeemeisen voldoen.

Ten slotte is gekeken naar de bottlenecks in de data overdracht van de analoog digitaal conversie naar de PC. Om binnen de eisen te vallen is het belangrijk dat data binnen het kalibratieplatform snel verwerkt wordt en verzonden. De hardware kan de benodigde datasnelheden aan maar het is aangeraden om een real-time oplossing te ontwikkelen voor het verkrijgen en verwerken van de stroomdata.

2.3 Digitale isolatie

Om de zuiverheid van de stroommeting te kunnen garanderen mag het niet voorkomen dat er stroom lekt over datasignalen. Hierom is het nodig om de target devices digitaal te isoleren van de rest van het systeem.

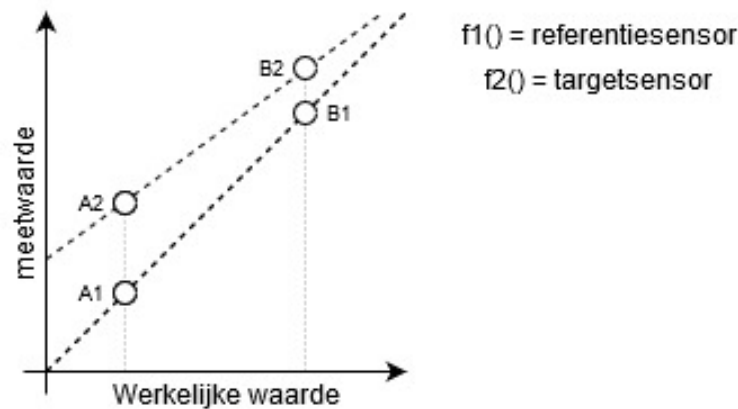
De uitdaging van digitale isolatie zit in het zenden van digitale en analoge signalen accuraat, op hoge snelheden, en in een compact circuit. De traditionele optocoupler oplossing heeft een lage

bandbreedte en kan weinig stroom leveren [9]. Hierom wordt gezocht naar andere hardware met bredere bandbreedte.

Voor de digitale isolatie zijn er veel commerciële oplossingen beschikbaar op de markt. Aan de hand van de eisen kan een keuze worden gemaakt die voldoet aan zowel de isolatie eisen als de data snelheidseisen.

2.4 Kalibratie-algoritme

Het kalibratiealgoritme is in staat om vanuit twee metingen te kunnen bepalen wat de *offset* en de *afwijking* van de target sensor is. Beide sensoren hebben binnen hun bereik een lineair verloop. Hier wordt de afleiding gegeven van hoe het kalibratie-algoritme tot stand is gekomen.



Figuur 2.6: Visualisatie van het verschil tussen de metingen van de referentiesensor en target sensor.

in figuur 2.6 is een voorbeeld te zien van de verhoudingen tussen de daadwerkelijke waarde en de gemeten waarde van een referentie sensor en een target sensor. Het kalibratie algoritme meet op 2 verschillende punten in de grafiek de waardes van de sensoren. hieruit kan de grafiek worden opgesteld.

	Meting A	Meting B
Referentiesensor waarde	x_{A1}, x_{A2}, y_{A1}	x_{B1}, x_{B2}, y_{B1}
Target sensor waarde	y_{A2}	y_{B2}

Tabel 2.3: Overeenkomsten grafiek (fig. 2.6) met output van de verschillende sensoren.

De x en y waarden van de verschillende punten in fig. 2.6 worden bepaald uit de sensorwaardes van de target en referentie sensor bij twee verschillende punten in de grafiek. Aangenomen is dat de referentie meetwaarde overeenkomt met de werkelijke waarde. hieruit valt af te leiden dat de grafiek punten overeenkomen met de sensorwaardes zoals in tabel 2.3.

$$\Delta d = df_1() - df_2() = \frac{y_{B1} - y_{A1}}{x_{B1} - x_{A1}} - \frac{y_{B2} - y_{A2}}{x_{B2} - x_{A2}} \quad (2.5)$$

Om de meetgrafiek van de target sensor bij te stellen moeten er twee operaties gedaan worden. Eerst moet de afgeleide van de grafiek bijgesteld worden zodat deze overeenkomt met de afgeleide van de referentiesensor. Dit gebeurt door de hele grafiek te vermenigvuldigen met een factor. Hierna zijn beide grafieken parallel en wordt er via het verschil op een bepaald punt de offset bepaald.

Door bij het verschil in afgeleides (for. 2.5) de output van de overeenkomende sensorwaardes (tab. 2.3) in te vullen, is het mogelijk om een formule af te leiden die vanuit de sensorwaardes op twee meetpunten de factor kan bepalen (for. 2.6). Vervolgens is via het bijstellen van de grafiek eenvoudig de offset te bepalen (for. 2.7).

$$factor = \frac{A_{tgt} + B_{ref} - A_{ref} - B_{tgt}}{B_{ref} - A_{ref}} \quad (2.6)$$

$$offset = A_{ref} - (A_{tgt} * (1 + factor)) \quad (2.7)$$

Ten slotte volgt vanuit de offset en factor waarde een operatie die op een meting van de target sensor gedaan kan worden om te zorgen dat deze overeenkomt met de referentie waarde.

$$Gekalibreerdewaarde = ((factor + 1) * meetwaarde) + offset \quad (2.8)$$

Hoofdstuk 3

Methodes & overwegingen

Voordat ingegaan wordt op het ontworpen systeem wordt een globaal overzicht gegeven van de aanpak van het project en enkele activiteiten en toegepaste methodes die essentieel waren bij de ontwikkeling. De methode is uitgebreider beschreven in het plan van aanpak, daar zijn ook meer details over de planning en doelen te vinden.

3.1 Projectorganisatie

Bij aanvang van het project is een Plan van Aanpak opgesteld waarin de projectorganisatie is beschreven. De projectopzet is afgeleid van het veelgebruikte V-model. Volgens dit model is het project opgedeeld in drie fases. In de decompositie fase worden de eisen omgezet in functies en abstracte ontwerpen. Vervolgens in de engineeringsfase worden de ontwerpen gerealiseerd. Ten slotte in de integratiefase worden de onderdelen verder geïntegreerd, gevalideerd en geverifieerd. Hierbij zijn in de eerste fase de eisen en testen bepaald waaraan het systeem moet voldoen[10].

Projectfases		
Decompositiefase	Engineeringsfase	Integratiefase
- Pakket van eisen - Functioneel ontwerp - Ontwerponderzoek	- Detailontwerp	- Hardware opstelling - Firmware - PC applicatie - Einddocumentatie

Tabel 3.1: Opgeleverde producten per projectfase

3.2 Test- & validatiemethodes

Er zijn verschillende methodes gebruikt om vast te stellen of een bepaald systeem voldoet aan de opgestelde eisen.

Voor veruit de meeste onderdelen voldoet een functionele verificatie waarbij de verschillende onderdelen in alle mogelijke toestanden zijn gebracht. Tijdens dit proces is gecontroleerd of de daadwerkelijke output overeenkwam met de verwachte output. Als het systeem zich gedraagt zoals verwacht voldoet dit systeem aan de eisen.

Functioneel wordt de stroommeter getest door de output te vergelijken met de stroommeter die op het moment in gebruik is. Daarnaast wordt via een testopstelling stapsgewijs een statische stroom toegepast en wordt de analoge output gemeten.

3.3 Gebruikte ontwikkeltools

Tijdens de loop van het project is er gebruik gemaakt van verschillende ontwikkelsoftware en andere tools voor ontwerp, ontwikkeling, verificatie en testen van de verschillende onderdelen.

3.3.1 Hardware ontwerp

Voor het hardware ontwerp is gebruik gemaakt van de ALTIUM Desiger 20 software. In deze software is het design van het circuit en de PCB voltooid. Verder is er gebruikgemaakt van de TINA-TI analoge simulatiesoftware voor verificatie van ontwerpen.

3.3.2 Development omgeving & debugging

Met ontwikkeling van een Real-Time Systeem is het belangrijk om over geschikte debug tools te beschikken[11].

- Debugger IDE
- Logic analyzer. Analyse van de interfaces en de IO van het systeem geeft inzicht in het verloop van de software

De firmware is ontwikkeld in de Code composer studio IDE van Texas Instruments. De PC applicatie is ontwikkeld in het .NET framework in de Visual Studio IDE.

3.4 COVID-19

Tijdens de loop van het project zijn er acties ondernomen naar aanleiding van de ontwikkeling van de COVID-19 pandemie. Enkele van deze acties hebben invloed gehad op de loop en resultaat van het project en worden hier benoemd.

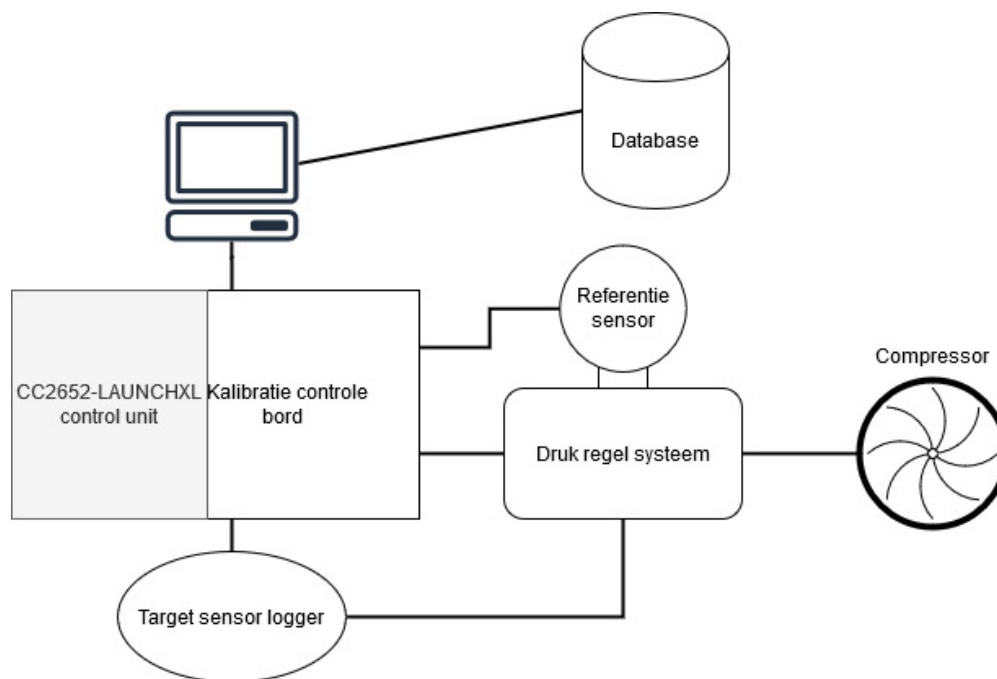
Om het risico in te dammen dat door quarantainemaatregelen de productie en levering van de hardware componenten niet meer mogelijk zou zijn is er versneld een PCB ontwikkeld. Dat heeft invloed gehad op de kwaliteitscontrole van de ontworpen systemen. Na latere analyse is er de conclusie getrokken dat de stroommeter volgens het huidige ontwerp niet goed te produceren is door werknemers zonder kennis van de werking van het systeem. Dit is omdat er in het ontwerp niet voldoende gekeken is naar de effecten van imperfecte componenten. Dit staat verder toegelicht in het hoofdstuk resultaten.

Verder is de directe invloed van de pandemie en de lockdown redelijk beperkt gebleven op het project. De maatregelen hebben wel voor een vertraging gezorgd waardoor het opzetten van de database en enkele andere randzaken niet meer opgenomen konden worden in de planning.

Hoofdstuk 4

Ontwerp overzicht

Het te realiseren ontwerp vormt een onderdeel in een bredere omgeving van het productieproces van Leiderdorp Instruments. Dit hoofdstuk beschrijft de plaatsing van het product in deze omgeving, de functionaliteiten die het systeem de gebruiker biedt, en geeft een algemeen overzicht van de ontwikkelde hardware en software. De hardware en software wordt in detail behandeld in de desbetreffende hoofdstukken.



Figuur 4.1: Systeem overzicht

4.1 Systeemoverzicht

Het systeem van de eindgebruiker bestaat uit zowel software, elektrische hardware, als een pneumatische component. Voor deze scriptie wordt vooral de focus gelegd op de ontwikkelde onderdelen in het elektrotechnisch en software domein. Hier wordt een overzicht gegeven van het hele systeem met toelichting van de verschillende onderdelen.

Subsysteem	Beschrijving	ontwikkeld door
Target sensor/logger	Benaming van leiderdorp instruments producten die gekalibreerd en of afgesteld gaan worden door het systeem.	Leiderdorp Instruments
Kalibratie-/meetopstelling	De ontwikkelde hardware die de simulatieomgeving aanstuurt voor de target sensor en de data regelt tussen de verbonden subsystemen.	Het project
PC applicatie	Applicatie voor het aansturen van het systeem, het berekenen van de kalibratie gegevens, en in latere versies, het beheren van de database	Het project
Database	Database voor opslag van de systeem en kalibratiegegevens van de targets	Wordt in een later stadium ontwikkeld
Druk regelsysteem en compressor	Pneumatische opstelling om druk te op te bouwen voor de target- en referentiesensor	Het project/Leiderdorp Instruments

Tabel 4.1: De beschrijving van de verschillende subsystemen

4.2 Functies

Het doel van het project vanuit het stage bedrijf is het verzorgen van de kwaliteitsborging. Aan het eind van het project moet er een systeem zijn wat door de productiemedewerkers gebruikt kan worden om fouten in de geproduceerde producten te vinden. Deze fouten en reparaties moeten centraal opgeslagen worden zodat ieder product een geschiedenis krijgt waarin defecten en reparaties bijgehouden worden. Dit laatste valt buiten de scope van deze scriptie. Vanuit dit doel en de randvoorwaarden is een lijst van functies opgezet. In tabel 4.2 staat het overzicht van systeemfuncties van het ontworpen systeem.

Hoofdfunctie	Deelfunctie
Automatisch kalibreren van druksensoren	- Uitlezen druksensoren - Referentie druk simuleren - Berekenen van de sensor offset & schaal
Kalibreren analoog digitaal converter target sensor	- Simuleren van bekende analoge spanningswaardes - Uitlezen ADC - Berekenen van de ADC offset
Temperatuur meten	- Accurate temperatuur meten
Meten van het stroomgebruik	- Meten stroom door target sensor - Isolatie van communicatie interfaces van de targetsensor
Programmeer interface voor de target sensor	- JTAG programmeer interface - Selecteerbare interface tussen programmer en systeem MCU/target sensor
Draadloze communicatie	- BLE 5 interface
UI & GPIO	- User interface met feedback en input - Beschikbare IO voor eventuele uitbereiding
Inzicht in communicatie target sensor	- UART sniffer

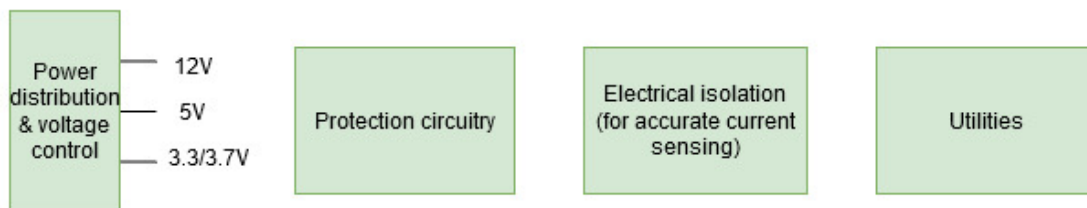
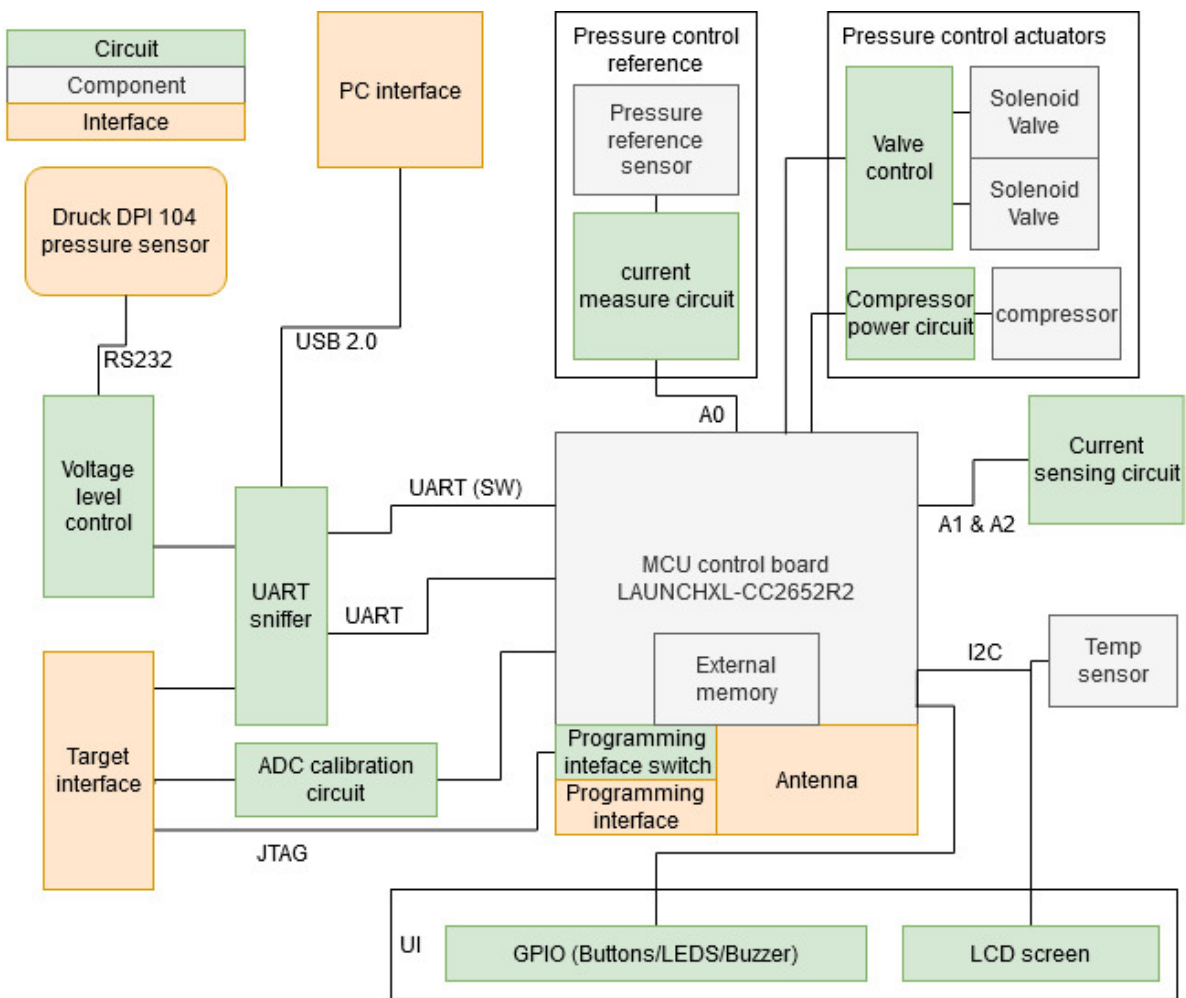
Tabel 4.2: Overzicht van systeemfuncties en eisen

4.3 Hardware

De hardware van het systeem bestaat uit een ontworpen PCB die connecties maakt met andere modules en een mechanische drukopstelling. De PCB bevat een controle module die het systeem aanstuurt en heeft meerdere interfaces naar sensoren en eventuele externe systemen.

Figuur 4.2 geeft een overzicht van de verschillende systemen in de hardware. Deze systemen zijn verder toegelicht in het hoofdstuk Hardware. Er is ook duidelijk te zien welke externe interfaces het systeem heeft die mogelijkheden bieden voor externe communicatie.

De hardware is ontwikkeld naar een PCB waarop alle benodigde functies ingebouwd zijn. Figuur 5.1 laat de PCB layout zien. Vanwege simpliciteit, geen stricte eisen rond omvang, en de relatief grote componenten is gekozen voor een twee-laagse PCB.



Figuur 4.2: Een blokschema met een overzicht van de verschillende interfaces en onderdelen in de ontwikkelde PCB.

4.4 Software

Er zijn twee software producten ontwikkeld. Firmware die embedded is in de ontwikkelde hardware opstelling, en een PC applicatie voor monitoring en aansturing van het systeem. Deze producten zijn verder beschreven in het hoofdstuk software.

4.4.1 Firmware

De hardware opstelling wordt aangestuurd door de Texas Instruments CC2652 Microcontroller. Er is voor dit platform gekozen wegens de embedded Bluetooth low energy functionaliteit. Daarnaast deelt de hardware met de andere producten van Leiderdorp Instruments één geïntegreerde ontwikkel omgeving (IDE).

De reden dat gekozen is om het gehele ontwikkelbord op de opstelling te gebruiken en niet alleen de microprocessor direct op de PCB te plaatsen is dat naast de CC2652 chip ook de programmer nodig is in de kalibratieopstelling. Namelijk om het target device te programmeren.



Figuur 4.3: Het launchxl-CC26x2 development board is het aanstuurplatform voor de ontwikkelde hardware.

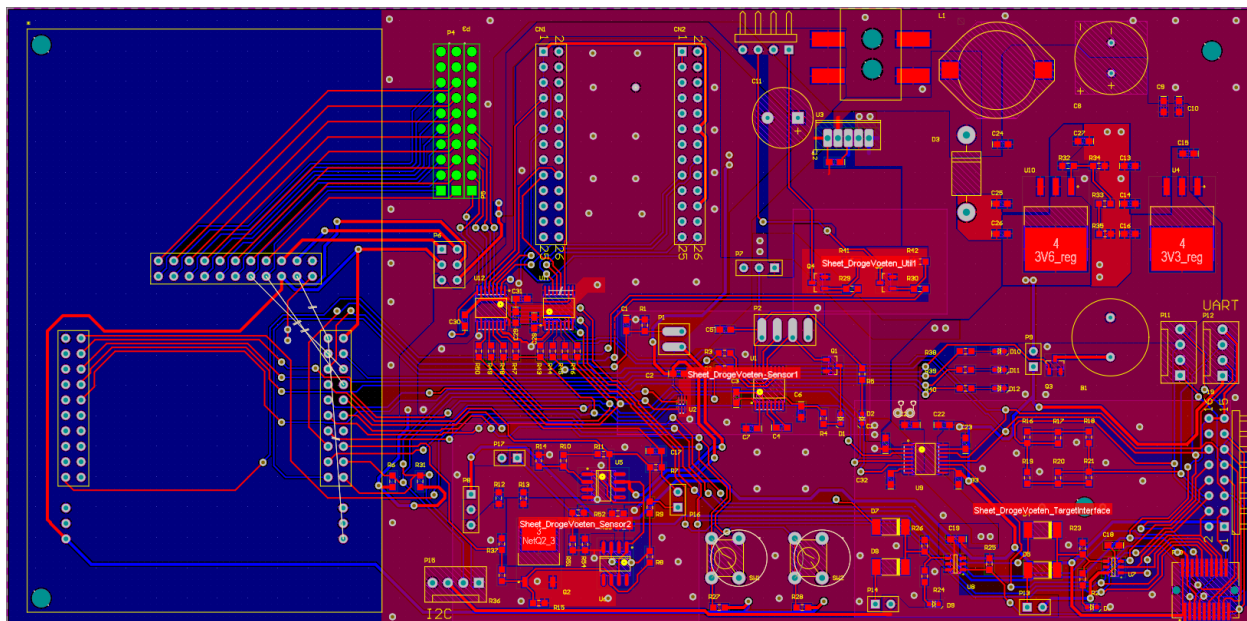
4.4.2 Applicatie

De applicatie is de voornamelijke gebruikersinterface van het systeem. Ook worden zoveel mogelijk rekenprocessen hierin uitgevoerd vanwege de beperkte processorkracht van de CC2652 microcontroller. De applicatie is ontwikkeld in C#. Er is gebruik gemaakt van de windows form tool in het .NET framework. Het is een makkelijk te gebruiken ontwikkelplatform met grote hoeveelheden functionaliteiten die toegevoegd kunnen worden.[12]

Hoofdstuk 5

Hardware

Dit hoofdstuk beschrijft de ontwikkelde hardware opstelling voor het kalibratie systeem. Dit betreft een PCB die de verschillende onderdelen van het test systeem aanstuurt. (fig. 5.1) Het werkt als voeding en aansturing voor het druk-regel-systeem, de referentiesensoren en de target. De hardware wordt aangestuurd vanuit een microcontroller die in verbinding staat met de applicatie van de PC.



Figuur 5.1: PCB layout van het kalibratiesysteem

5.1 Power

Vanwege de eis dat het eindproduct ook geschikt moet zijn voor target modules die gebruik maken van het mobiele netwerk en het moeten schakelen van relatief verbruikende drukvalves, kan

het systeem niet meer gevoed worden via een USB verbinding van de gemiddelde PC. Daarom is er een 12VDC voedingscircuit ontworpen met stepdown regulator naar 5V dat genoeg vermogen levert om het systeem en target modules te kunnen voeden.

5.2 Stroommeting

In het theoretisch kader is beschreven welke mogelijke oplossingen er bekeken zijn voor het meten van de stroom. In overleg met de opdrachtgever is er gekozen voor een automatisch geschakelde shunt. Dit systeem bestaat uit drie componenten. (fig. 5.2)

- **Shunt** De shunt bestaat uit een vaste shunt en een shunt met een lagere weerstandswaarde die in serie staat met een MOSFET.
- **Versterking** Een non-inverting amplifier versterkt het signaal zodat de waardes binnen de limieten van de ADC vallen.
- **Trigger** Een Schmitt trigger activeert/deactiveert de MOSFET en verlaagt/verhoogt de shuntwaarde zodat de spanningsval binnen de gestelde limieten blijft.

Wanneer de spanning over de shunt, die correspondeert met een stroom door de targetsensor, een bepaalde waarde bereikt dan schakelt de schmitt trigger een tweede shunt met een veel lagere weerstandswaarde parallel aan de eerste shunt. Het bereik van de stroommeting over de parallelle shunt is vanwege de lagere weerstandswaarde veel groter dan alleen de eerste shunt. Echter, wordt er een hoop resolutie opgeofferd voor bereik van de stroommeter. Dit is acceptabel omdat de gebruiker alleen een precieze meting met een hoge resolutie vereist bij een laag stroomgebruik. De output van de schmitt trigger wordt gemeten en hiermee kan de stroomwaarde bepaald worden. Dit algoritme staat beschreven in het hoofdstuk software.

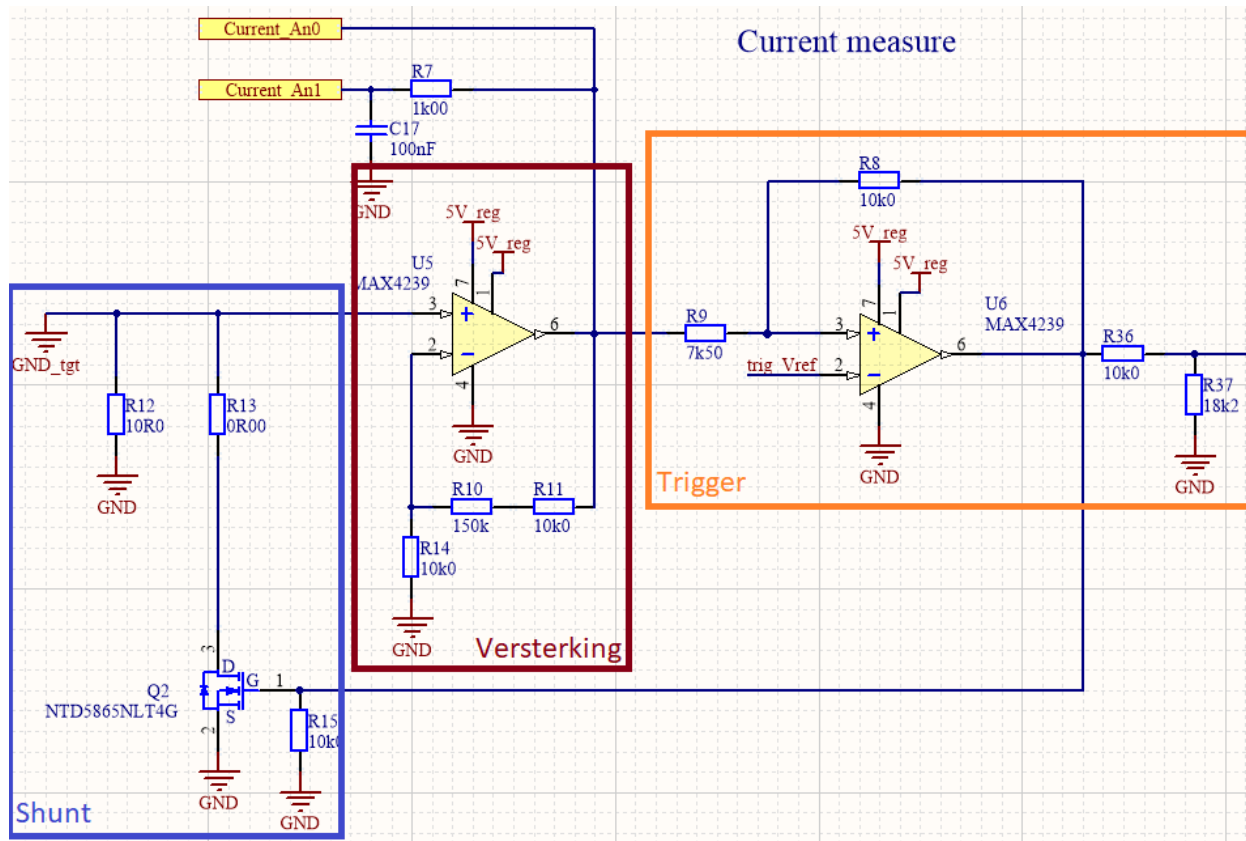
5.2.1 Trigger

De trigger regelt de stand van de shunt. Er is gekozen voor een systeem met een enkele *shunt-trap*.

$$V_{tl} = -\frac{R_1}{R_2}V_{outh} + \frac{R_2 + R_1}{R_2}V_{ref} \quad (5.1)$$

In formule 5.1 [13] is te zien dat de referentiespanning erg veel invloed heeft op de lagere threshold spanning (V_{tl}).

Om het gehele bereik van de analoog digitaal converter in de controle unit te gebruiken is het van belang om een schakelshunt te kiezen met een erg kleine waarde. Om te voorkomen dat de schmitttrigger door het schakelen de lage threshold bereikt of dat de threshold buiten het bereik



Figuur 5.2: Schema van het ontworpen meetcircuit

van de stroommeter komt te liggen is het belangrijk dat de waarde V_t zeer nauwkeurig bepaald kan worden.

Om deze redenen zijn er shunt en trigger component waardes gekozen met een grote spanningsval en een Vt/I waarde van dicht bij de 0. Het effect op de werking van het systeem wordt verder besproken in het hoofdstuk resultaten.

5.3 Interfaces & subsystemen

De hardware verbindt verschillende modules met de controle unit. Hier worden verschillende functies van de ontwikkelde hardware beschreven.

5.3.1 Druk regelen

De druk wordt geregeld door een paar *solenoid valves* die de druk op de sensoren controleren. Deze valves worden digitaal aangestuurd vanuit de MCU. Er zijn twee druksensoren aangesloten op de drukopstelling.

- Regelsensor - De Gems 3500B004 4-20mA druk sensor geeft een snelle drukindicatie. Deze sensor wordt gebruikt bij het regelen van de spanning.
- Referentiesensor - De DPI 104 Druck DigitalTest Gauge is een digitale drukmeter die de referentiedruk meet. Deze is aangesloten via een RS232 verbinding met de rest van het systeem. De DPI 104 heeft tijd nodig om zich te vestigen op de daadwerkelijke waarde. Dit maakt de sensor ongeschikt als regelsensor.

De regelsensor geeft data aan het systeem wanneer de gevraagde drukwaarde bereikt is, waarop deze druk vastgezet wordt door het sluiten van de valves. De exacte waarde kan uit de referentiesensor gehaald worden wanneer die zich gevestigd heeft.

5.3.2 Temperatuur sensor

Er is gekozen voor de TMP112 temperatuur sensor van Texas Instruments. Deze sensor heeft een kleine form-factor, en kan snel en precies via de I2C bus informatie sturen [14]. Deze sensor geeft het systeem de mogelijkheid om de waardes van de interne temperatuursensor van de targets te valideren.

5.3.3 ADC kalibratie

Het is mogelijk de ADC's die aanwezig zijn op de target module, te kalibreren. Dit gebeurt door meerdere bekende weerstandswaarden aan te bieden aan de meetpinnen van de target module. Omdat de meest voorkomende target module, de Levelstick, gebruikmaakt van een analoge sensor kan via deze methode een gesimuleerde sensorwaarde aangeboden worden aan de ADC's van de target. Dit systeem is geïmplementeerd volgens bestaande Leiderdorp Instruments ontwerpen.



Figuur 5.3: De Druck DPI pressure gauge wordt gebruikt om de referentiedruk te meten.

5.3.4 Communicatie sniffen

Een van de tools die gebruikt wordt bij het evalueren van de verschillende targets is het sniffen van interne seriële communicatie op de hardware. Er is een FT4232h quad usb to uart module [15] aangesloten die de ontwikkelaar inzicht geeft in alle communicatie kanalen van het kalibratie systeem en de aangesloten hardware modules. Deze systemen zijn digitaal geïsoleerd van de rest van het systeem volgens de methode beschreven in de sectie digitale isolatie.

5.3.5 Externe modules en UI

Er zijn verschillende user interface functionaliteiten toegevoegd aan het kalibratiesysteem waar- van de eindgebruiker aangaf dat die meerwaarde hadden bij het gebruik van het systeem.

- Drukknoppen en LED's dienen als simpele I/O functies voor de gebruiker.
- Een buzzer geeft mogelijkheden tot bewaking en het instellen van een alarm.
- Een I2C interface geeft de mogelijkheid om externe modules zoals een scherm aan het systeem te verbinden.

Interface	Functie
UART 0	Seriele interface PC - kalibratie-opstelling
UART 1	Seriele interface Kalibratie-opstelling - Target module
UART 2	(Software UART) interface Kalibratie-opstelling - referentie sensor
I2C	I2C bus verbonden met temperatuur sensor.
GPIO	Buzzer, drukkeppen, LED's en schakelen referentie weerstanden

Tabel 5.1: Lijst van interfaces van het systeem

5.4 Digitale isolatie voor communicatie naar de sensor

Isolatie is een middel om te voorkomen dat ongewenste stromen ontstaan tussen 2 onderdelen van een systeem [16]. Voor een zuivere stroommeting is het belangrijk om te voorkomen dat stromen weglekken door kanalen die bedoeld zijn voor communicatie. Hiervoor is het systeem zo ontworpen dat de targetsensor geïsoleerd is van de rest van het bord. Twee chips vormen de basis voor het systeem.

- **ADuM144x** Digitale isolator chip die digitale communicatie signalen isoleert tussen het controle board en de target sensor.
- **ADG801** Schakelaar die verschillende sensor referentiecircuitry aan de pinnen van de target sensor schakelt.

Verder is het niet nodig om analoge signalen over te brengen tussen het kalibratie systeem en de target sensor. Het systeem is ontworpen naar bestaande systemen van Leiderdorp Instruments.

5.5 Programmeren van de target

Omdat veel van de mogelijke sensoren en loggers dezelfde hardware bevatten als de kalibratieopstelling is het mogelijk om de programmer van het LAUNCH-XL platform te gebruiken om de target sensoren te programmeren. De JTAG interface die daarvoor gebruikt wordt is gemakkelijk te ontkoppelen van de kalibratieopstelling. Dit geeft de PC applicatie de mogelijkheid om zowel de kalibratie gegevens als systeemgegevens zoals serienummers in de firmware van de target te programmeren.

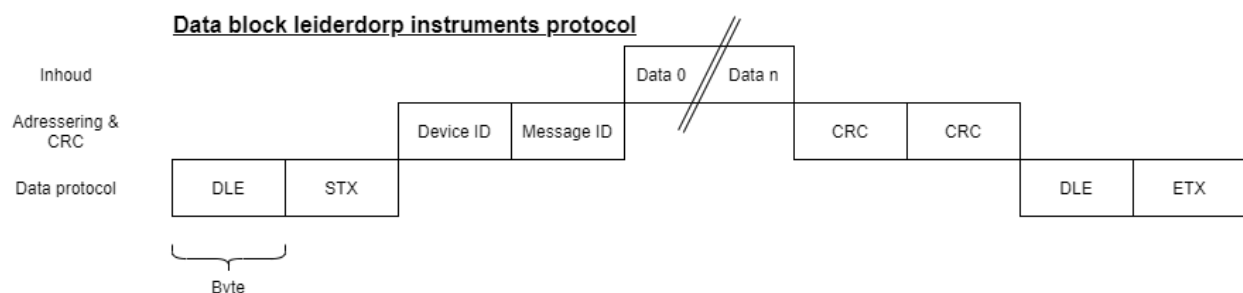
Hoofdstuk 6

Software

Dit hoofdstuk beschrijft de ontwikkelde software voor het kalibratie systeem. Er zijn twee software-reproducten opgeleverd. Ten eerste is er firmware ontwikkeld voor het hardware component van het kalibratiesysteem. Dit onderdeel is verantwoordelijk voor het regelen van de referentieopstelling en de coördinatie van de communicatie tussen de applicatie en de target. Deze firmware is geschreven in de C-taal op het TI-RTOS operating system van Texas Instruments. Daarnaast is er een applicatie ontwikkeld op de PC voor verwerking van de gegevens. Deze in C# ontwikkelde applicatie communiceert via seriële communicatie met de hardware omgeving.

6.1 DLE-STX (LIC) protocol

Voor de communicatie tussen de verschillende onderdelen van het systeem is gekozen voor een intern ontwikkeld communicatie protocol van Leiderdorp Instruments vanaf nu gerefereerd naar als het LIC protocol (*Leiderdorp instruments communicatie protocol*). Dit protocol is afgeleid van het door IBM ontwikkelde BSC protocol.[17]

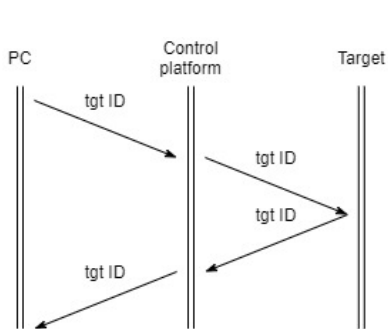


Figuur 6.1: Opbouw van een bericht volgens het communicatie protocol

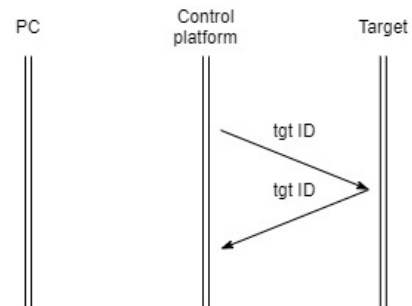
- **Dataprotocol** Via de controle characters worden verschillende commando's en datablokken van elkaar gescheiden. Het protocol bevat beveiliging tegen toevallige data waardes die overeenkomen met de controlecharacters.

- **Adressering & CRC** Device ID en Message ID bevatten de informatie over de bestemming en de inhoud van het bericht. Verder wordt er een *Cyclic redundancy check* uitgevoerd om fouten in de dataoverdracht te detecteren.
- **Data** Commandos en/of data-overdracht.

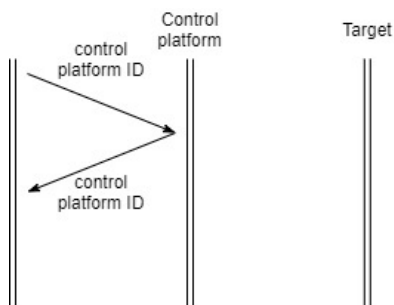
Een van de uitdagingen in de software is dat het protocol een hiërarchische structuur heeft. De PC of master stuurt een commando naar een device met het device ID van de bestemming, waarop de slave of target module reageert met een bericht met zijn eigen device ID. Het systeem bevat een tussenopstelling die over een kanaal als master en over een ander kanaal als slave communiceert. De PC applicatie moet ook in staat zijn om te communiceren met de target device dus de kalibratie-opstelling moet de mogelijkheid hebben om berichten door te sturen indien hij niet de geadresseerde is. De hiërarchisch bovenliggende apparaten hebben altijd het alleenrecht op het initiëren van communicatie. Verschillende scenarios staan beschreven in figuur 6.2).



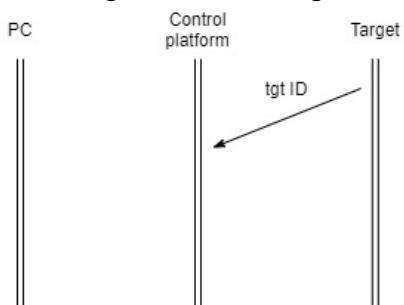
(a) Scenario 1: De PC vraagt gegevens op uit de target sensor.



(b) Scenario 2: Het controle bord vraagt gegevens op uit de sensor. Doordat het bord op de hoogte is van de verwachte responsie is een ander bestemmingsadres niet nodig.



(c) Scenario 3: De PC communiceert met het controle bord. Er wordt gecommuniceerd met het device ID van het controle board



(d) Scenario 4: Het komt niet voor dat de target of het controle board zonder instructie berichten sturen.

Figuur 6.2: Communicatie scenarios tussen de PC, het controle bord en de target sensor.

6.2 Firmware LAUNCHXL

Het kalibratiesysteem wordt aangestuurd door een CC2652R1F MCU. Deze chip is verwerkt op het launchxl platform dat de ontwikkelde hardware aanstuurt. Het systeem heeft een seriële interface met de PC voor connectie met de windows applicatie. Hier wordt de software architectuur en implementatie beschreven.

6.2.1 TI-RTOS

TI-RTOS is een schaalbaar, one-stop embedded tools ecosysteem voor TI apparaten. Het schaaft van een real-time multitasking kernel (SYS/BIOS) tot een complete RTOS oplossing. [18]

TI-RTOS definieert vier typen threads in zijn applicatie.

1. **Hardware interrupt (hwi)** Tenzij de interrupts disabled zijn onderbreekt een hwi altijd de threads met een lagere prioriteit.
2. **Software interrupt (swi)** Swi's worden onderbroken door hwi's en swi's met een hogere prioriteit.
3. **Tasks** Tasks zijn threads met lagere prioriteit software en vervullen taken die meer tijd en rekenkracht nodig hebben dan een interrupt en/of minder strenge deadlines hebben dan een interrupt functie.
4. **Idle** Achtergrondtaak met de laagste prioriteit

De applicatie bestaat uit meerdere tasks en SWI's. Naast deze threads bevat TI-RTOS meerdere drivers en functionaliteiten voor de applicatie. Een aantal essentiële functionaliteiten voor de applicatie worden nader toegelicht.

Gates zijn systemen die voorkomen dat kritieke stukken code gelijktijdig doorlopen worden. Er zijn varianten waarin de tasks, swi's of hwi's geblokkeerd worden met alle lagere prioriteit threads. Dit voorkomt dat de scheduler van taak switched tijdens kritieke stukken code. Een andere gate methode is gebaseerd op de mutual exclusive. Deze methode geeft verschillende mogelijkheden om te voorkomen dat een hogere prioriteit thread een kritiek stuk code uitvoert als een andere thread daar mee bezig is.[18]

Verder geeft TI-RTOS een aantal mogelijkheden voor task synchronisatie door middel van semaphoren en events. Beiden bieden ze de mogelijkheid om een taak te laten wachten op een bepaalde post door een andere thread of bijvoorbeeld een clock. Bij events is het echter mogelijk om te specificeren op welke events, of bepaalde sets van events, gewacht wordt. Hierbij krijgt ieder event in een eventobject een eigen ID. [18]

Naast deze beschreven functies biedt TI-RTOS alle benodigde tools gerelateerd aan timing, peripheral management en overige zaken die nodig zijn voor de ontwikkeling van een real time applicatie.

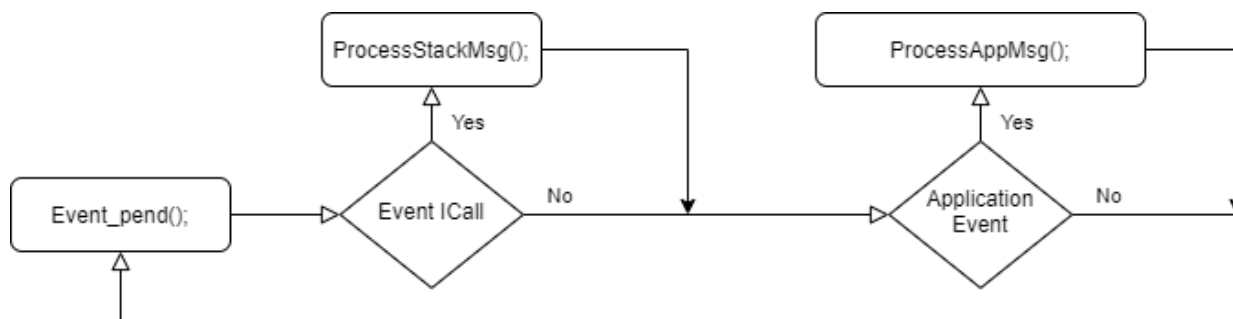
6.2.2 Software architectuur

De software is ontwikkeld volgens de architectuur die veel gebruikt wordt binnen Leiderdorp Instruments op het gekozen launchxl ontwikkelplatform. Hierbij vormen twee tasks de kern van de applicatie. De hoofdtask en de ICall task. De Indirect Call Framework (ICall) is een module die de applicatie een interface geeft met draadloze services aanwezig in de hardware[19]. Er is naast de ICall task een andere task die constant wacht op een event. Deze structuur is uitgebreid met enkele taken die nodig zijn voor het implementeren van een real-time stroommeting met een hoge samplerate.

Type	Prioriteit	Taak	Beschrijving
SWI	1	stroom sample	Interrupt sample functie voor de stroommeting
Task	5	ICall	Interface meet de draadloze communicatie stack
Task	2	Uart zend	Zendthread die data naar de PC stuurt
Task	1	Hoofdtask	Hoofdtask die de overige interfaces aanstuurt
Idle	0	Idle	Achtergrondtask

Tabel 6.1: Overzicht van de verschillende threads in de firmware applicatie

De hoofdtask is een event handler die bij twee type events reageert. (fig. 6.3) een ICall event of een systeem event. Systeem events bevatten alle niet draadloze services zoals een binnekommend bericht via de seriële interface, het verwerken van een input zoals een knop, of een getimed interval event. De event handler roept dan de juiste routines aan, afhankelijk van het type event. Zo kan er vanuit de PC de informatie worden opgevraagd van de target via de UART interface of een stroommeting worden gestart.



Figuur 6.3: Flowchart van de applicatiethread. Functies worden aangeroepen in de onderliggende event handlers.

Naam	Conditie	Uitvoering
BG_EVT_HANDLE_PC_MESSAGE	Protocol decoder heeft een bericht van de PC	PC message handler
BG_EVT_HANDLE_TGT_MESSAGE	Protocol decoder heeft een bericht van de target module	Target message handler
BG_EVT_PERIODIC	Periodiek event	Periodiek event functie

Tabel 6.2: Overzicht van de verschillende events die afgehandeld worden in de hoofdtak

Scheduling

De scheduling methode die gekozen is, is fixed-priority-scheduling. Dit is mogelijk omdat alle processen die veel ruimte opeisen van de processor in de hoofdtak voltooid kunnen worden. De benodigde processortijd van de taken die de hoofdtak *preempten* nemen niet significant veel processortijd in beslag. [11]

6.2.3 Interfacing peripherals

De CC2652 MCU heeft meerdere hardware mogelijkheden om de verschillende componenten aan te sluiten. Digitale *peripherals* kunnen op iedere digitale pin worden aangesloten om verbonden te worden met de interne modules[4]. Dit geeft vrijheid bij het ontwerp van de hardware. Bijna alle Peripherals zijn aangesloten via deze hardware modules en zijn geïnterfaced via de TI RTOS driver API's.

Één uitzondering hierop is de interface van de referentiesensor. Er zijn drie verschillende UART verbindingen nodig in het systeem en maar twee beschikbare hardware modules in de MCU[4]. Met de laagste baudrate van 9600 is de referentiesensor verbinding de verbinding waarbij de timingseisen het minst kritiek zijn. Vanwege deze reden is de referentiesensor via een softwarematige UART interface verbonden aan de MCU.

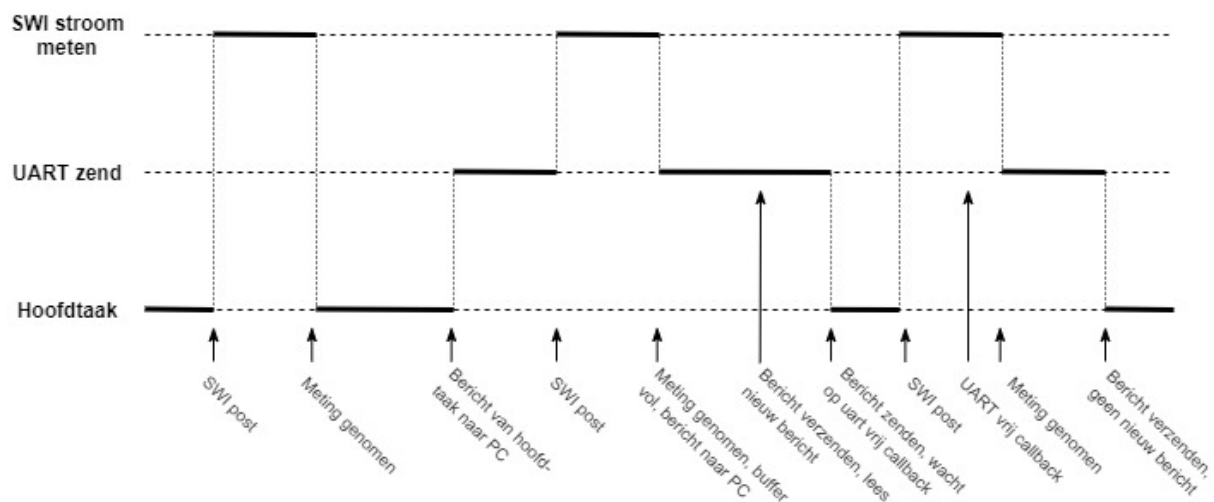
6.2.4 Data snelheid & Real-time meten

In het hoofdstuk theoretisch kader staat beschreven hoe bepaald is wat de minimale sample snelheid moet zijn om de een accurate meting te kunnen doen. Om aan de eis te voldoen dat er met 5000 samples per seconde gemeten kan worden moeten er twee functionaliteiten in de software gemaakt worden. Allereerst moeten de metingen verbonden worden aan een klok om te zorgen dat de samples op een bekend interval genomen worden. Daarnaast moet de datasnelheid tussen de PC en de kalibratie opstelling snel genoeg zijn om alle data te kunnen versturen.

Voor het timen van de samplerate is daarom een timed software interrupt gemaakt die het meten en verwerken van de data van de stroommeter regelt. Er zijn twee verschillende ADC pinnen op

de hardware verbonden met de stroommeter. Een ongefilterd en de ander met een RC-filter om de ruis te verwijderen. Bij het commando vanuit de pc applicatie om de meting te starten wordt de pin geselecteerd en wordt een klok gestart die de software interrupt post.[18]

Er is een aparte task ontwikkeld om de data en berichten van de kalibratieopstelling naar de PC te communiceren. Deze task wacht op een plaatsing van de locatie van een bericht in zijn in een gedeeld stuk geheugen met de andere taken. Als een van de andere taken een locatie van een bericht in dit gedeelde geheugen deelt wordt de thread wakker en verstuurt die het geplaatste bericht. Het gedeelde stuk geheugen is beschermd doormiddel van een gate die alle swi-taken ophoudt.



Figuur 6.4: Voorbeeld van verloop prioriteits scheduling tijdens een stroommeting waarbij de hoofdtask ook communiceert met de PC.

6.2.5 Timing deadlines stroommeting

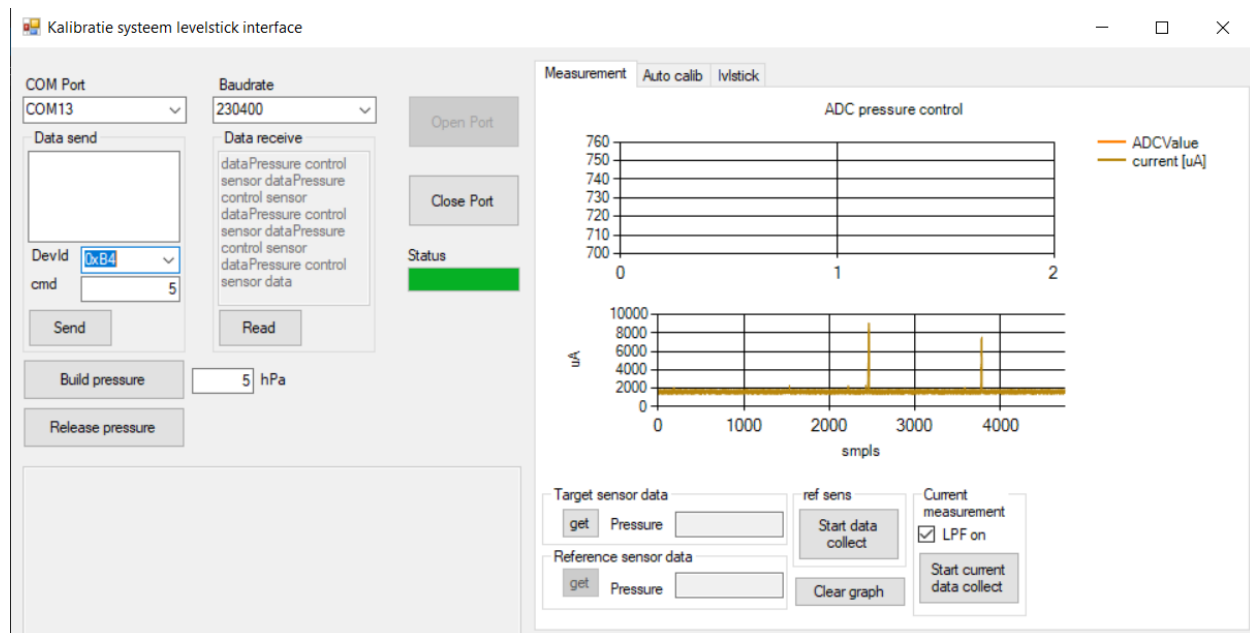
Real time operating systemen worden gecategoriseerd in de mate van impact die het overschrijden van een deadline heeft. Een RTOS wordt als *soft* beschouwd als de output nuttig is ondanks het overschrijden van de deadline. Wanneer een deadline overschrijding catastrofale gevolgen heeft dan is dat een *hard* RTOS. Als door een overschreden deadline de output zijn waarde verliest betreft het een *firm* RTOS. [20]

Gelukkig heeft het missen van deadlines in het kalibratie systeem geen catastrofale gevolgen. Wel is de vraag of bij het overschrijden van bepaalde deadlines de output zijn waarde behoud. Voor de gebruiker zijn twee zaken van de stroommeting voornamelijk interessant. Het verbruikspatroon en het gemiddelde stroomverbruik. Beide zaken worden niet significant beïnvloed door het verlies van een sample. De waarde van de meting wordt dus aangetast bij het overschrijden van een deadline maar bij beperkt voorkomen verliest de meting niet zijn waarde. Daarom wordt het behandeld als een soft Real-time Systeem en is wordt het systeem niet onderbroken bij een overschrijding van een deadline.

Om toch iets te kunnen zeggen over de mate van deadlineoverschrijding is gekeken naar de werking van drie taken die simultaan opereren tijdens een stroommeting. De deadlines zijn in kaart gebracht evenals de periode. Echter is de computatie tijd niet bekend of afhankelijk van meerdere factoren. Na een worst case analyse wordt duidelijk dat de grootste limiterende factor in het ontwerp de transmissie snelheid van de data is. De daarna volgende limiterende factor is de *ADC conversion time* van de CC2652 MCU. [21][4]

6.3 PC applicatie

Centraal in het kalibratiesysteem is de PC applicatie. Deze applicatie wordt gezien als de master module en stuurt direct of indirect alle andere onderdelen van het systeem aan.



Figuur 6.5: Interface van de ontwikkelde PC applicatie.

De PC applicatie kan vanuit de software volgens het eerder beschreven LIC-protocol over de seriële verbinding zowel de kalibratie-opstelling als de targetmodule aansturen. (fig 6.2a)

In fig. 6.5 is de user interface te zien van de PC applicatie. De interface bestaat uit twee onderdelen. Aan de linkerkant staan algemeen belangrijke zaken.

- Aansturen van het druk systeem.
- Selecteren en openen van de seriële verbinding.
- Een algemene zend- en leesfunctie over de seriële poort.
- Een textbox voor error berichten en algemene informatie.

Aan de rechterkant staat een tab-box, waarin verschillende functiespecifieke tabs kunnen worden geselecteerd. Deze keuze is gemaakt omdat alle losse functies op een pagina plaatsen een onoverzichtelijke interface geeft, en omdat de benodigde functies eenvoudig te groeperen zijn volgens het verwachte gebruik.

6.3.1 Uitbreidbaarheid en deployment

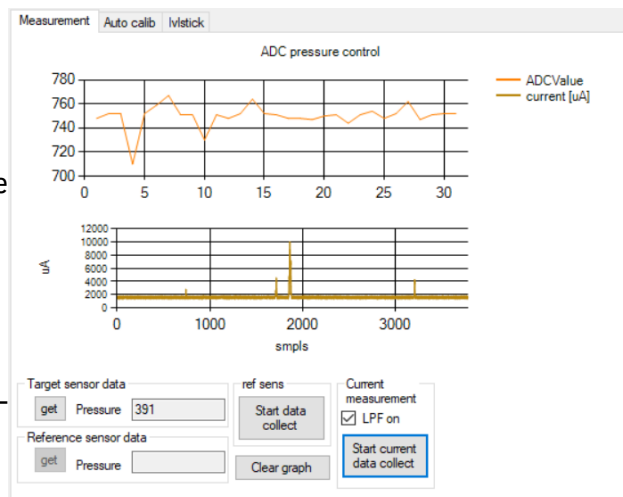
De software is ontwikkeld vanuit het idee dat de software eenvoudig aanpasbaar moet zijn voor de gebruiker. Ook moet het systeem eenvoudig te implementeren zijn in de systemen Leiderdorp Instruments. Dit is de leidende overweging in de keuze geweest over communicatie protocollen en de structuur van de commando's.

6.3.2 Features

De applicatie heeft verschillende interface tabs die verschillende functionaliteiten van het systeem mogelijk maken. Deze tabs zijn eenvoudig uitbreidbaar als er meer functies ingebouwd worden.

Meting interface

De meet-tab geeft toegang tot directe meting van de referentie sensoren en de stroommeter. Daarnaast kunnen er samples opgevraagd worden uit de target modules. De sample waarde en referentie waarde kunnen vergeleken worden om snel een indruk te krijgen van de afwijking van de target sensor. De stroommeetgrafiek maakt de inkomende stroomdata zichtbaar. Vanuit deze tab kan ook de stroommeting aan of uitgezet worden en geselecteerd of de stroommeter gefilterde of niet gefilterde data moet meten.



Figuur 6.6: Meetinterface van de applicatie

Auto kalibratie

Deze tab bevat de software voor automatische kalibratie. Vanuit een knop start een algoritme wat samples van de target- en referentiesensor opvraagt na het instellen van een bepaalde druk. hieruit wordt de offset en het verschil in schaal berekend. Deze gegevens worden vervolgens gecontroleerd door de eindgebruiker. De tab heeft de mogelijkheid om de verloopfuncties van de sensoren en de gekalibreerde waarden inzichtelijk te maken door deze te plotten.

Measurement Auto calib lvlistick

Hier komt het auto kalibratieknopje

Auto calibration start

	Reference	Target Value
Meting A	-320	-289
Meting B	20670	20568

Factor 0.00633635064316341

offset -28.3260600285867

Figuur 6.7: Autokalibratie interface van de applicatie.

Product specifiek

Measurement Auto calib lvlistick

Device

Serialnumber

Alias:

Fact. Password 123

Fact. Ser. Password VXZXWC8G92FM86KZAJNC

Revision Hw

Revision Sw

Ble Id

Read Write Verify Reset Erase

Target sensor data

Get sample Pressure

Figuur 6.8: Productspecifieke interface van de applicatie voor de Levelstick

Naast de meet en kalibratiefunctie die voornamelijk voor de Levelstick (fig. 1.1) is ontwikkeld. Zijn er ook product specifieke tabs. Hierin zitten functies voor het lezen en schrijven van systeemeigenschappen zoals serienummers, wachtwoorden, etc. Figuur 6.8 Laat de productspecifieke tab zien voor de Levelstick.

Er is met het ontwerp en opzet van de applicatie rekening gehouden dat de huidige ontwikkeltools eenvoudig omgezet kunnen worden naar de nieuwe tool.

6.3.3 PC algoritmes en protocollen

Enkele van de gebruikte protocollen en functies in de applicatie zijn verder toegelicht.

Communicatieprotocol

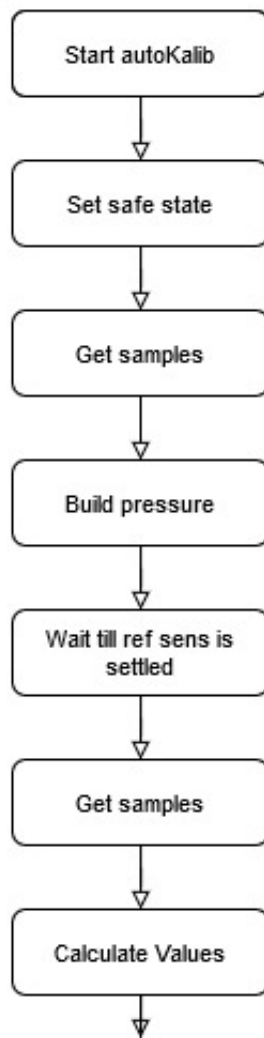
De PC applicatie communiceert via het *LIC-protocol* evenals de firmware. Ook bevat de software een messagehandler die verschillende functies uitvoert aan de hand van binnenkomende berichten. Het verschil echter met de firmware is dat er verschillende berichthandlers zijn voor verschillende device ID's (fig. 6.1) in het bericht. Dit geeft de software de mogelijkheid om verschillende commando's anders te behandelen afhankelijk van de afzender.

Automatisch kalibreren

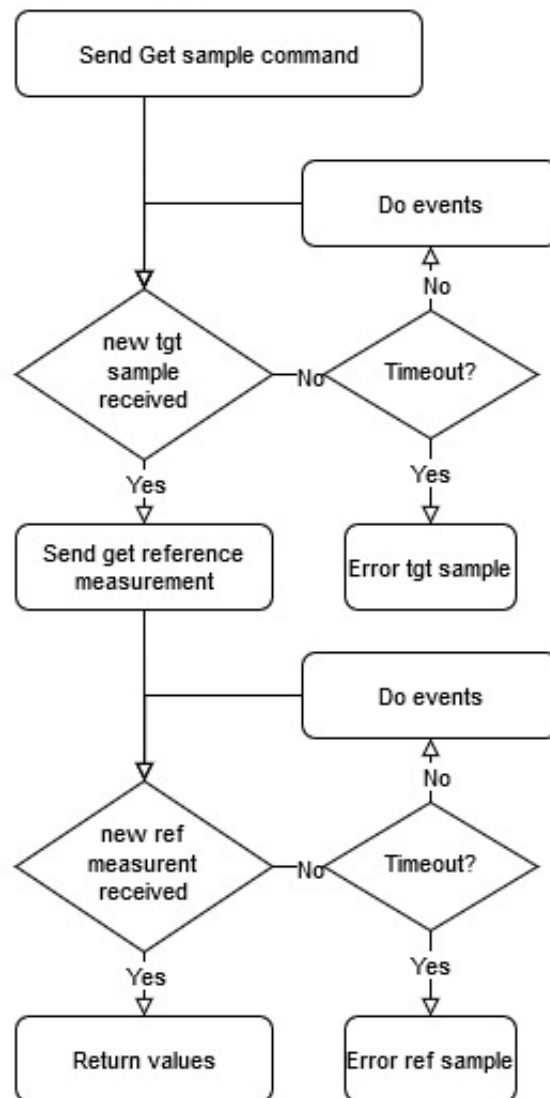
De werking van het kalibratie algoritme staat beschreven in hoofdstuk 2. In figuur 6.7 is de flowchart te zien van het algoritme. Er worden 2 metingen gedaan bij een verschillende drukwaarde. Vervolgens wordt uit de gemeten waardes via de formules 2.6 & 2.7 de factor en de offset berekend.

De functie heeft een lange doorlooptijd vanwege de sampletijd van de target sensor en de tijd die het kost voor de referentiesensor om zich te vestigen op de daadwerkelijke waarde. Hiervoor is er een progressiebalk toegevoegd op de gebruikersinterface (fig. 6.7) die inzicht geeft in de voortgang van de functie.

Autokalibration



Get samples



Figuur 6.9: Flowchart van autokalibratie functie

Hoofdstuk 7

Resultaten

Door het gehele ontwikkeltraject heen zijn er meerdere tests uitgevoerd en resultaten genoteerd om de voortgang te monitoren en het resultaat in beeld te krijgen. Dit hoofdstuk geeft een overzicht van de behaalde resultaten en de werking van het ontwikkelde systeem.

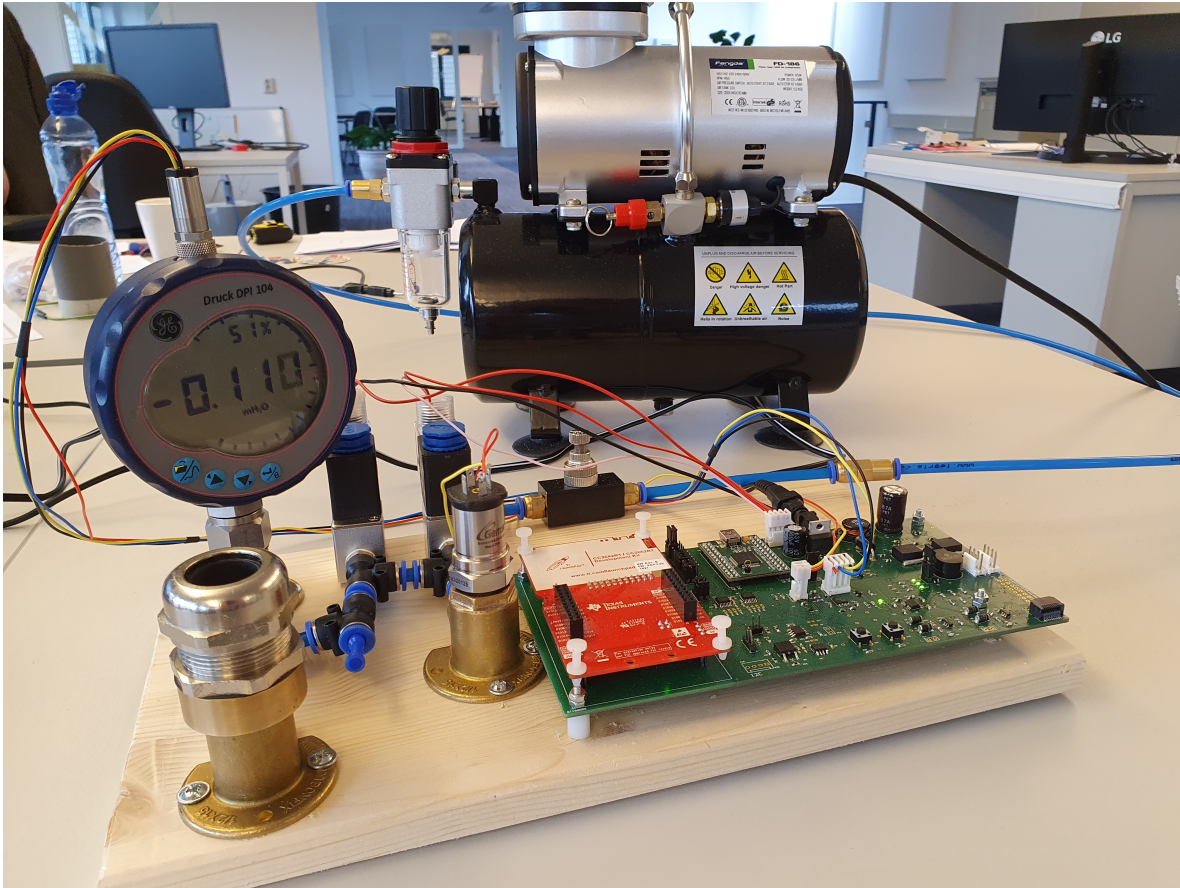
Eerst zullen de tussenresultaten besproken worden per ontwikkeld onderdeel volgens de volgorde van de rest van de scriptie. Er worden enkele tussenconclusies getrokken aan de hand van de resultaten. Verder worden sommige aanbevelingen al ingeleid. Ten slotte wordt de werking van het systeem als geheel beschouwd en worden de resultaten vergeleken met de opgestelde functionaliteitseisen.

7.1 Hardware

Om vast te stellen hoe de ontwikkelde hardware functioneert zijn verschillende tests uitgevoerd. De stroommeter is uitvoerig getest en vergeleken met de stroommeter die op het moment gebruikt wordt. Daarnaast zijn de verschillende peripherals getest door het project heen door middel van gebruik. Ten slotte zijn er metingen verricht op de digitale isolatie om hiervan de eigenschappen in kaart te brengen.

7.1.1 Stroommeter

De stroommeter vormt een belangrijk onderdeel van het project. Er is geëxperimenteerd met verschillende methodes om een praktische meter te ontwikkelen die zeer nauwkeurig is in het lagere bereik en tot de 2A kan meten. Hier worden de resultaten behandeld die na de realisatie van het systeem behaald zijn.



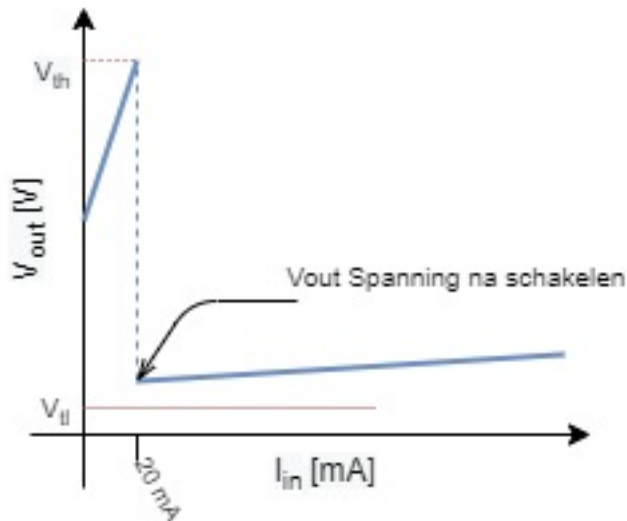
Figuur 7.1: Het geassembleerde kalibratiesysteem

Component keuze

In fig. 5.2 is het ontworpen stroommeetingscircuit te zien zoals nu geïmplementeerd op het kalibratiesysteem. Zoals beschreven in de hoofdstukken Methodes & Overwegingen en Hardware is het ontwerp proces en component selectie van de stroommeter versneld gedaan wat problemen opleverde met de implementatie. Dit heeft als gevolg gehad dat na de realisatie er enkele systeemeigenschappen zijn ontdekt die reden zijn tot een aanbeveling van een revisie van de stroommeter.

De component selectie heeft grote invloed op het resultaat van de meter. Na het testen van de opstelling zijn de componenten geëvalueerd. De OPAMP en de MOSFET zijn beide geschikt voor het gebruik in de stroommeter. De shunts zijn echter verkeerd gekozen. Het 0603 formaat wat veel gebruikt wordt voor weerstanden limiteert de keuze in precisie. Daarnaast is de shunt op de PCB te ver geplaatst van de meter en is er bij het ontwerp niet gebruik gemaakt van optimale *layout techniques*.^[5]

De MAX4239 OP AMP heeft bij de load in het stroommeetcircuit een *output voltage swing* van



Figuur 7.2: Visualisatie van het inschakelen van de lage shunt met de waardes waarop de trigger reageert.

slechts 4 mV. Omdat de IN- pin verbonden is met de GND kan de outputspanning daarom niet onder de 4mV komen. [22] Dit betekent dat de stroom pas vanaf 25 μ A gemeten kan worden. Dit is bevestigd door het gebruik van de stroommeter. In een nieuwe iteratie is het hierom aanbevolen om een lagere spanning aan de IN- van de OPAMP te verbinden.

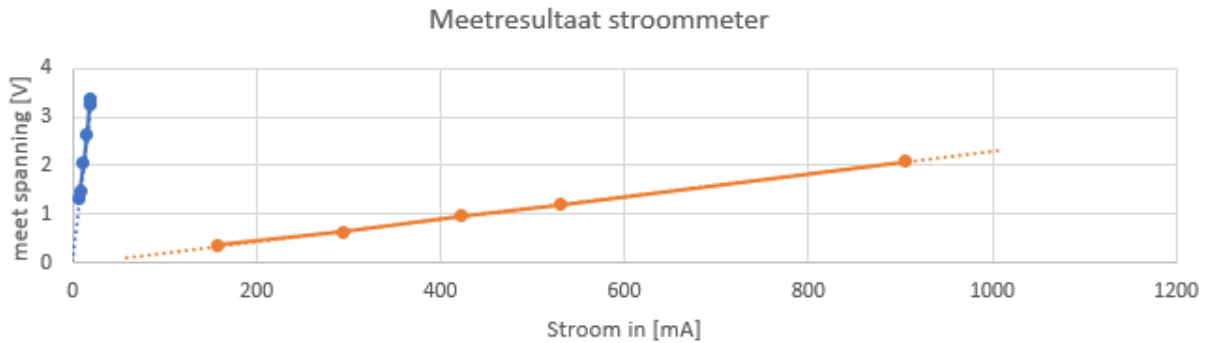
Lage threshold spanning van de trigger

Een geobserveerd probleem is de gevoeligheid van de trigger van de stroommeter. De verschillende geassembleerde stroommeters vertoonden afwijkend gedrag met identieke componenten. Er zijn drie verschillende effecten geobserveerd rond het schakelen van de shunt. Deze verschillen zijn herleid naar de lage trigger spanning van de schmitt trigger.

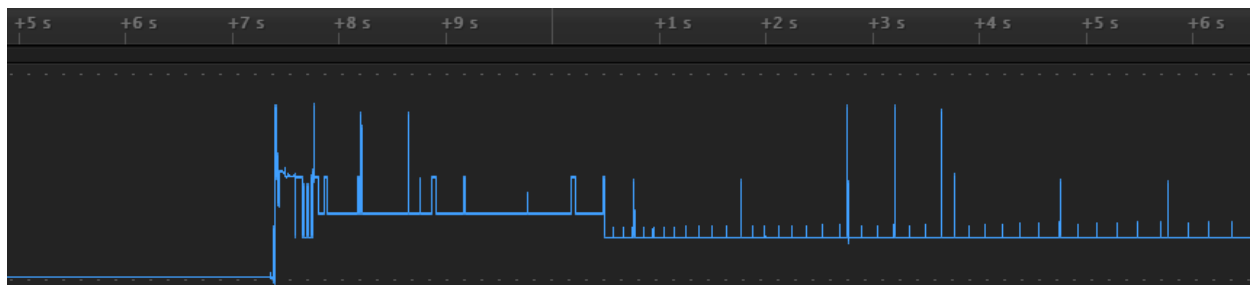
In figuur 7.2 is te zien dat de waarde van de spanning waarop de lage shunt afgeschakeld wordt (V_{tl}) ligt tussen de 0V en de V_{out} spanning na het schakelen. Dit is essentieel voor het functioneren van de stroommeter. De andere situaties zijn als volgt:

- $V_{tl} < 0$ - De lage triggerwaarde wordt nooit bereikt en daarom zal de meter over het hele bereik met de lage shunt ingeschakeld meten.
- $V_{tl} > V_{out, lageShunt}(I_{schakel})$ - Er is een gebied in het stroombereik waarin de trigger klappert tussen de hoge shunt en de lage shunt.

In formule 5.1 staat beschreven wat de relatie is tussen componenten en de lage threshold spanning. Het is te zien dat de referentie spanning veel invloed heeft de plaatsing van de lage threshold. De referentiespanning wordt gemaakt door een spanningsdeler van de 5V voedingspanning



Figuur 7.3: Meetresultaat van de test van de stroommeter met de hoge shuntwaarde(blauw) en de lage shuntwaarde(Oranje)



Figuur 7.4: De opstartstroom van de Levelstick gemeten met een referentiestroommeter.

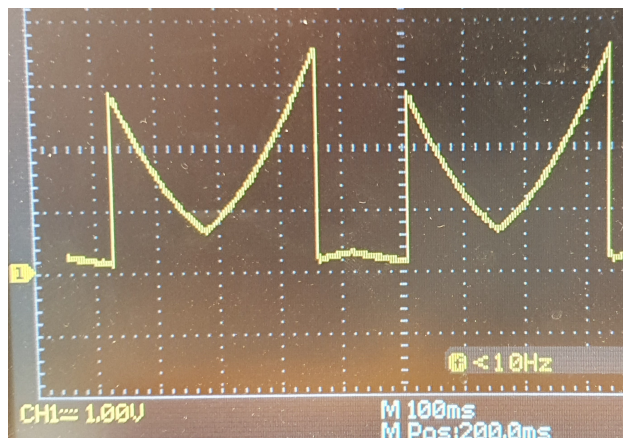
uit het powercircuit. Vastgesteld is dat deze waarde niet stabiel genoeg is om bij iedere gefabriceerde opstelling te voldoen aan $0 < V_{il} < V_{out, lageShunt}(I_{schakel})$.

Het is mogelijk om op iedere opstelling de weerstandswaarde van de spanningsdeler bij te stellen na het meten van de afwijking in referentiespanning. Er kan dan een weerstand parallel geplaatst worden. Echter is dit bij de productie van de kalibratieopstelling geen praktische oplossing. Hierom is een aanbeveling gedaan om een nieuwe iteratie van de stroommeter te ontwerpen met de kennis van de huidige iteratie.

Meetresultaten

In figuur 7.3 is te zien wat de verhouding is tussen de spanning en de stroom over het bereik van de stroommeter. Het geeft een duidelijk beeld van de twee verschillende standen van de meter. Het schakelpunt waarin de tweede shunt parallel geschakeld wordt is gevonden op 19,6 mA. Bij 14,1 mA wordt de tweede shunt weer afgeschakeld.

Figuur 7.8 bevat de metingen van de stroommeter output uit de applicatie. Er is te zien dat de geteste Levelstick een ruststroom heeft van 1,8 mA. Dat is te ver boven de specificatie van 20 uA in rust. Dit maakt het een goed voorbeeld van het gebruik van de stroommeter en de meerwaarde voor de eindgebruiker. Lekstromen zijn voortaan eenvoudig op te sporen met het gebruik van de stroommeter.



Figuur 7.5: Stroommeting met de hysteresis van het schakelen zichtbaar. De input is een zaagtand spanning naar een MOSFET. De exponentiële lijn wordt verklaard door de relatie tussen de gate-source spanning en de drain stroom.

Functie/peripheral	Testresultaat
LED's	succesvol
Drukknoppen	succesvol
ADC kalibratie IO	succesvol
Alarm/buzzer	succesvol
Valve control	succesvol
UART interface PC	tot 230400 baud
UART interface tgt	op 19200 baud
UART interface referentie sensor	op 9600 baud
I2C interface	standaard mode 100 kbps
Analoog in (stroommeter & druk regelaar)	succesvol

Tabel 7.1: Peripheral hardware resultaten

Een opvallend resultaat is dat als het stroompatroon van een door de kalibratie-opstelling gevoede target gemeten wordt zonder lowpass filter er significante ruis te zien is op de meting. Deze ruis is te herleiden naar de lineaire regulator die de interne voedingsspanning voor de target veroorzaakt. In een volgende iteratie is het daarom aangeraden om aanpassingen te doen om de ruis te verwijderen.

7.1.2 Peripherals

De verschillende peripherals zijn getest om te zien of ze hun functie vervullen. Er zijn geen problemen gevonden met de werking van de hardware van de peripherals. Tabel 7.1 laat de resultaten zien van de tests van de peripherals.

7.1.3 Digitale isolatie

De digitale isolatoren zijn functioneel getest tot de baudrate van het gebruik. Er zijn geen vervormingen in het datasignaal geconstateerd. De digitale switches schakelen de verschillende circuits nodig voor kalibratie van de ADC's succesvol af en aan zonder een verbinding te vormen met de rest van het circuit. Daarnaast is de isolatie getest. de gemeten isolatiewaarde lag in alle niet naar de grond geschakelde pinnen boven de $3\text{ M}\Omega$. Er ontstaan geen lekstromen die significante invloed hebben op de stroommeting.

7.2 Firmware PCB

De firmware draait op de CC2652 en verwerkt binnenkomende berichten van de PC. Verder stuurt de firmware de pneumatische onderdelen aan en leest het de aanwezige sensoren uit.

7.2.1 Functionaliteit

De software structuur waarin de eventhandler berichten en events afhandeld vanuit een event-queue is een structuur die veel gebruikt is binnen Leiderdorp Instruments. De gebruiker zou eenvoudig de code kunnen uitbereiden. De eventhandler is getest doormiddel van gebruik van de applicatie en werkt zoals bedoeld. De verschillende routines en functies zoals beschreven in het hoofdstuk Software zijn getest en functioneel.

Het systeem reageert correct op de binnenkomende commandos (Tab. 7.2) Berichten met het *device ID* van een targetsensor zoals een Levelstick worden doorgestuurd naar de target.

7.2.2 RTOS

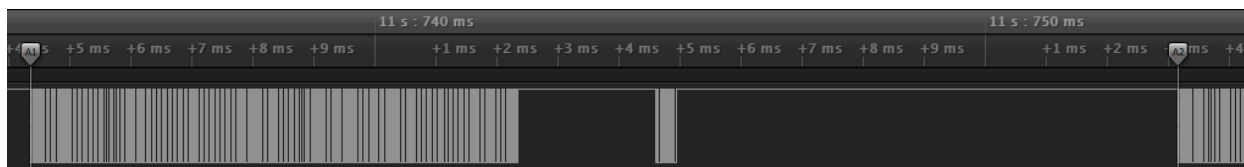
De structuur met de zend-task en de andere taken die berichten kunnen sturen werkt naar intentie. fig 7.6 laat zien dat meerdere threads toegang hebben tot de message functie en de software niet geblokeerd wordt tijdens het zenden. Ook is aangetoond dat data op een vast interval gemeten wordt en de output overeenkomt met het daadwerkelijke stroomverbruik.

7.2.3 Sample rate

De systeemeis om 5000 samples per seconde te kunnen meten is getest. De interrupt timer is afgesteld op een periode van $200\text{ }\mu\text{s}$. Met een baudrate van 230400 bit/sec over de seriële PC naar kalibratie-opstelling interface kan de benodigde datasnelheid bereikt worden.

Commando ID	Hex	Beschrijving	datablok [bytes]	Inhoud datablok
PC_BUILD_PRESSURE	0xB1	Bouw druk op	2	Waarde van de drukre- gelsensor [cV]
PC_RELEASE_PRESSURE	0xB2	Level met omge- vingsdruk	0	-
PC_GET_DATA_CURRENT	0xB3	start stroommeting	1	Instellingen zoals het LPF
PC_REP_DATA_CURRENT	0xB4	heeft te maken met enob en data opti- malisatie	176	Datalock stroommeter
PC_GET_DATA_PRESREF	0xB5	vraag een drukme- ting aan referentie- sample	0	-
PC_REP_DATA_PRESREF	0xB6	Referentiedruk ant- woord	4	Referentiedruk waarde
PC_GET_DATA_TMP	0xB7	vraag de tempera- tuur van het bord op	-	Nog niet geïmplemen- teerd
PC_REP_DATA_TMP	0xB8	Temperatuur waarde	-	Nog niet geïmplemen- teerd
PC_SET_SENSIM_PRES	0xB9	Schakel druk ADC kalibratie circuit	0	-
PC_SET_SENSIM_TMP	0xBA	Schakel tempera- tuur ADC kalibratie circuit	0	-

Tabel 7.2: De commandolijst die het kalibratiesysteem herkent.



Figuur 7.6: Datasignaal seriële verbinding bij stroommeting. tussen de datablokken van de stroommeter wordt er een bericht verstuurd van de hoofdtaak. (A1 en A2 geven de start aan van twee opeenvolgende datablokken van de stroommeting)

Een datablock van 88 samples wordt gemiddeld iedere 18,66 ms verzonden. Er is geen significant verschil in datatransmissie snelheid bij het uitblijven of versturen van berichten vanuit de hoofdtaak. Dit geeft een geteste sample snelheid van 4716 samples per seconden als de timing afgesteld is op 5000 samples per seconde. Het verschil met de theoretische samplesnelheid is niet verklaard. Een van de verklaringen kan zijn dat door deadlineoverschrijdingen samples weggegooid worden. Echter blijft bij een verhoging of verlaging van de samplerate de verhouding

tussen de daadwerkelijke en theoretische samplerate nagenoeg gelijk. Het is dus aannemelijk dat de oorzaak ligt in een afwijking in een klok of teller die de timing aanstuurt. Voor het functioneren van het systeem en het gebruik van de stroommeter vormt dit verschil echter geen probleem.

Tot 7000 samples per seconde ontstaan er geen problemen met de meting of het verloop van de rest van de software op de bovengenoemde baudrate.

Verdere optimalisatie van het datablock is mogelijk en aangeraden. Voor dit project lag de prioriteit niet bij optimalisatie voorbij de eisen.

7.3 Applicatie

De applicatie werkt als user interface en als dataverwerker. Het vormt een handige tool die de werking van de PCB aantoonst. De interface is gebruiksvriendelijk en is eenvoudig te gebruiken. Hier wordt beschreven hoe de applicatie werkt en wordt de werking van enkele van de ontwikkelde algoritmes verder toegelicht. De software is getest en werkt zoals beschreven in hoofdstuk 6.

7.3.1 Inzichtelijk maken stroommeting

Het gevonden limiet in het inzichtelijk maken van de stroommeetdata is niet de transmissiesnelheid van de data of de processorklok van de microcontroller, maar de beschikbare processorcracht in de PC die de grafiek tekent. Dit heeft te maken met het algoritme op de PC wat niet geoptimaliseerd is. Dat plot nu de grafiek bij ieder ontvangen datablock opnieuw.

7.3.2 Kalibratie-algoritme

Het kalibratie-algoritme is getest en vindt automatisch een offset en een factor uit twee metingen. Een herhaling met andere meetwaardes levert een gelijk resultaat op. Volgens de formule 2.8 is er een operatie te doen op de waarde van de targetsensor, zodat die overeenkomt met de waarde uit de referentiesensor.

	Reference	Target Value
Meting A	-320	-289
Meting B	20670	20568
Factor	0,00633635064316341	
offset	-28,3260600285867	

Figuur 7.7: Output van het kalibratiealgoritme

7.4 Acceptatie

Alle producten vormen een werkend geheel. Het systeem voldoet aan de eisen alhoewel er ruimte blijft voor uitbereiding. Dit is gecommuniceerd met de opdrachtgever en het was bij aanvang ook de verwachting van het project. Het systeem geeft inzicht in het stroomverbruik en biedt tools voor geautomatiseerde kalibratie. Tabel 7.3 vergelijkt de verwachte functionaliteiten met de resultaten.

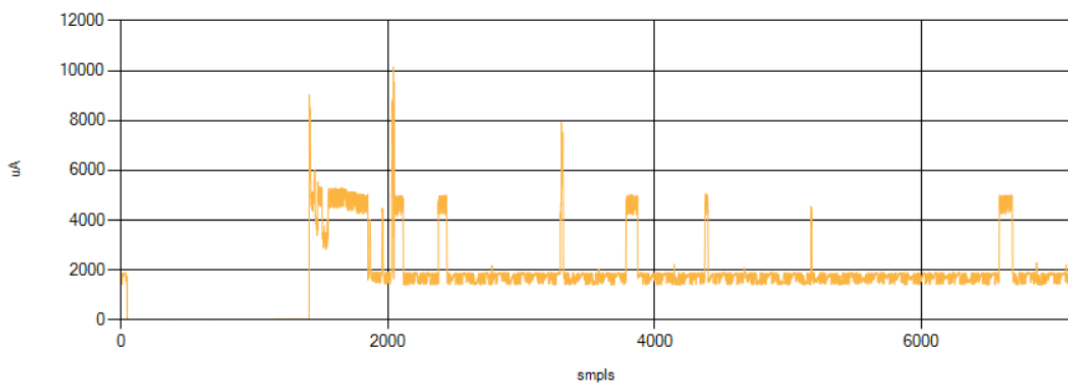
Functie	Hardware	Software	Implementatie	Getest
Automatisch kalibreren van de druksensoren	x	x	x	x
Kalibreren ADC's target sensor	x	/	x	x
Temperatuur meten	x	x	-	-
Metten van het stroomgebruik	x	x	x	x
Draadloze communicatie	x	x	N.V.T.	N.V.T.
User interface & GPIO	x	x	x	x
inzicht in communicatie target sensor	x	N.V.T.	N.V.T.	N.V.T.

Tabel 7.3: Overzicht van de mate van implementatie van de verschillende functionaliteiten. (x = voltooid; / = gedeeltelijk geïmplementeerd; - = niet aanwezig bij oplevering)

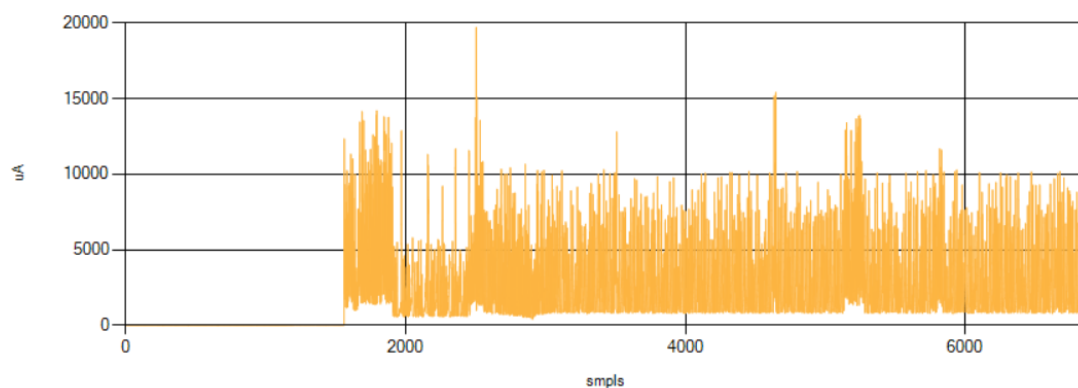
Enkele systemen zitten niet in de opgeleverde versie. Er zijn een aantal redenen waarom dit het geval is. Sommige onderdelen vallen buiten de scope van het afstuderen. Het kalibratie algoritme van ADC van de Levelstick is al aanwezig in de huidige tool en kan eenvoudig omgezet worden.

Het sniffen van de communicatieverbindingen gebeurt volgens bestaande ontwerpen van Leiderdorp Instruments. Daarnaast, door de opzet van de communicatie interface tussen de microcontroller en de PC waarop alle ontvangen berichten worden doorgestuurd, is het ook niet nodig om de communicatie te sniffen voor het gebruik van het nieuwe systeem. Op verzoek van Leiderdorp Instruments is deze functionaliteit wel op de hardware gebouwd.

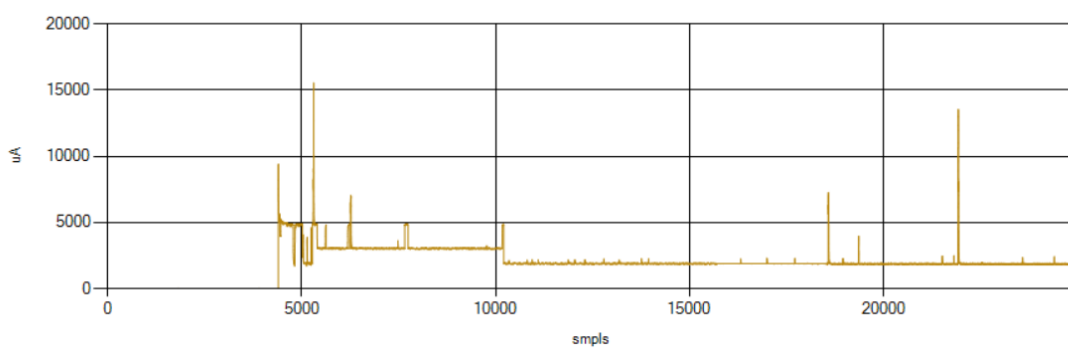
Voor de temperatuursensor is de code aanwezig, echter lag de prioriteit niet bij het implementeren hiervan. Er is daarom gekozen om op andere zaken te focussen tijdens het verloop van het project.



(a) Levelstick gevoed door het kalibratiebord, gemeten door het low pass filter.



(b) Levelstick gevoed door het kalibratiebord, ongefilterd gemeten.



(c) Opstart verbruik van een ongefilterd gemeten levelstick op batterijvoeding. Hieruit wordt geconcludeerd dat de ruis in het systeem afkomstig is van de target voeding op de PCB.

Figuur 7.8: Stroomverbruikgrafiek van een Levelstick met 2mA lekstroom bij het opstarten.

Hoofdstuk 8

Conclusie

Er is een systeem ontworpen en gerealiseerd waarin verschillende tools zitten die de ontwikkelaars en productiemedewerkers van Leiderdorp Instruments helpen in het kalibratie- en evaluatieproces. Binnenkomende producten kunnen sneller getest worden waardoor de productietijd lager ligt en de kwaliteit gewaarborgd blijft.

Het systeem is in staat om zelfstandig de kalibratiewaardes te vinden van de druk sensoren die aangesloten worden op de kalibratie-opstelling. Dit gebeurt door het maken van een referentiedruk in een pneumatische opstelling. Vanuit twee metingen op verschillende drukwaardes kan het systeem de afwijking in de schaal en de offset van een aangesloten grondwaterlogger bepalen.

De beste methode voor het meten van een breed stroombereik met een hoge resolutie in het lage bereik is onderzocht. Aan de hand van het resultaat van dit onderzoek is een stroommeetopstelling met een bereik van 2A en een resolutie van 1 uA ontworpen. De meter werkt door middel van het automatisch schakelen van de shuntweerstand. Deze opstelling is functioneel, echter zijn er een aantal punten van aanbeveling op de implementatie van de meter. Met deze aanbevelingen zou de meter aan alle eisen voldoen.

De hardware bevat meerdere meetmogelijkheden voor test doeleinden. Er zit een temperatuursensor op de hardware waarmee de interne temperatuursensor van de target vergeleken kan worden. Er kunnen verschillende weerstandshemas aan de ADC pinnen van de target geschakeld worden. Op deze manier wordt de ADC van het target device gekalibreerd. Ook heeft de kalibratieopstelling een eigen voedingscircuit en de mogelijkheid om via een communicatiesniffer inzicht te geven in de seriële communicatie signalen van het systeem.

De ontwikkelde firmware bestaat uit een event handler die verschillende routines aanroept aan de hand van externe events zoals berichten van een aangesloten PC. Een soft RTS is ontwikkeld voor het regelen van de datastroom van de stroommeter naar de PC. Deze opzet maakt het mogelijk om op de vereiste samplerate stroom te kunnen meten zonder dat de andere functionaliteiten van de kalibratieopstelling geblokkeerd worden.

Er is een PC applicatie ontwikkeld die dient als gebruikersinterface en als dataverwerkingsplatform. Deze applicatie staat in een hiërarchisch systeem bovenaan en controleert direct of indirect

de andere subsystemen van het kalibratiesysteem. Het biedt een duidelijke interface aan de gebruiker en maakt de benodigde data inzichtelijk.

Het geteste systeem vormt een nuttige toevoeging aan de tools die beschikbaar zijn voor het testen en kalibreren van de producten van Leiderdorp Instruments. Het kan gebruikt worden om snel te herkennen of de hardware lekstromen heeft. Verder kunnen de kalibratiegegevens van de fabrikant worden gecontroleerd met een druk op de autokalibratie knop.

Hoofdstuk 9

Reflectie

Zoals te lezen in de conclusie levert het project een bruikbaar systeem wat de opdrachtgever kan gebruiken om het ontwikkel en productieproces te versnellen. Toch zijn er terugkijkend op het project bepaalde zaken waarvan aanbevelingen worden meegegeven. Dit hoofdstuk bespreekt de aanbevelingen die gedaan worden om het project verder uit te breiden.

9.1 Aanbevelingen

Enkele aanbevelingen over de voortgang van het project na oplevering zijn meegegeven. Deze aanbevelingen moeten helpen de waarde van het project te vergroten en geven een indicatie welke systemen nog niet optimaal werken

9.1.1 Hardware

De stroommeting zou een stuk sneller kunnen door een stekker te plaatsen op de hardware met een pin naar de GND en de ander naar de voedingsspanning voor de target. met deze stekker kan dan een target module met batterij worden aangesloten. Iets wat met de huidige opstelling nog meerdere stekkers vereist. Een drukknop of schakelaar die de target voedingsspanning onderbreekt zou nuttig zijn voor de eindgebruiker als deze geïnteresseerd is in het opstartverbruik.

9.1.2 Stroommeter

Voor de stroommeter is het aangeraden een nieuwe design iteratie te ontwerpen om de stabiliteit van het systeem te vergroten en daarmee het bereik en precisie verder uit te kunnen bereiden. Het is aangeraden om het probleem op te lossen met de gevoelige lage trigger waarde, zoals beschreven is in het hoofdstuk resultaten. Hiervoor zijn twee potentiële oplossingen voorgesteld.

- Een referentiespanning IC gebruiken voor de referentiespanning van de trigger. Het preciezer maken van de referentie spanning en deze onafhankelijk te maken van de voeding kan er voor zorgen dat alle geproduceerde stroommeters na productie meteen binnen specificatie vallen.
- Overschakelen naar een 2-traps meting (een extra trigger en shunt) zodat er minder overlap is in het spanningsbereik. Met minder overlap in het spanningsbereik komt er meer ruimte voor de lagere trigger grens.

In de huidige opstelling is er een ongefilterde output naar de ADC en een met een LPF. Als er gekozen wordt om een LPF te gebruiken met een cutoff frequentie die lager ligt dan de samplesnelheid kan het voorkomen dat de input waarde van de ADC niet overeenkomt met de stand de trigger. Het algoritme zal dan een ver afwijkende stroomwaarde kunnen berekenen van de daadwerkelijke waarde als er gesampled wordt vlak na het schakelen van de trigger. Mocht de gebruiker toch willen filteren met een LPF waarvan de cutoff frequentie meerdere malen lager ligt dan de samplerate, is het aanbevolen om of digitaal te filteren of een andere stroommeter te gebruiken.

Ten slotte is aanbevolen om nogmaals te kijken naar de plaatsing van de componenten op de PCB. Hierin valt een significante optimalisatieslag te maken.

9.1.3 Programmeer interface

Een van de functies is het wisselen van de programmeer interface tussen de kalibratie omgeving en de target. Deze functie wordt nu vervuld door het handmatig omzetten van bruggen op de kalibratie-opstelling. Dit kan echter beter geautomatiseerd worden en direct digitaal geschakeld worden gecontroleerd door de kalibratie-opstelling MCU IO.

Bibliografie

- [1] S. Ziegler, R. Woodward, H.-C. Iu, and L. Borle, "Current sensing techniques: A review," *IEEE Sensors Journal*, May 2009.
- [2] EDinformatics, "What is hydrostatic pressure — fluid pressure and depth," 1999. https://www.edinformatics.com/math_science/hydrostatic_pressure.htm, urldate: 2020-05-24.
- [3] D. R. Maidment, *Handbook of hydrology*. McGraw-Hill, New York, NY, 1997.
- [4] Texas instruments, *CC2652R SimpleLink™ Multiprotocol 2.4 GHz Wireless MCU Datasheet*, 1 2018. Rev. F.
- [5] Texas instruments, *Simplifying Current Sensing*, 2020. slyy154a, rev. A.
- [6] T. Regan, J. M. Zimmer, and M. Stokowski, "Current sense circuit collection, making sense of current," no. AN105, 2005.
- [7] T. Kugelstadt, "Integrated logarithmic amplifiers for industrial applications," 2005.
- [8] W. Kester, Analog Devices, *Understand SINAD, ENOB, SNR, THD, THD + N, and SFDR so You Don't Get Lost in the Noise Floor*, 2009.
- [9] J. Duan, Analog Devices Inc., *Isolation in Digital Power Supply— Why and How*, 2017.
- [10] J. H. I. Graessler and T. Bruckmann, "V-models for interdisciplinary systems engineering," *Proceedings of the DESIGN 2018 15th International Design Conference*, 2018.
- [11] C. Walls, *Embedded Software: the Works*. Elsevier Science, 2012.
- [12] C. Sells and J. Gehtland, *Windows forms programming in Visual Basic .NET*. Addison-Wesley, 2004.
- [13] Chaniotakis and Cory. Introduction to Electronics, Signals, and Measurement. Spring 2006. Massachusetts Institute of Technology: MIT OpenCourseWare, <https://ocw.mit.edu/>. License: Creative Commons BY-NC-SA.
- [14] Texas instruments, *TMP112 High-Accuracy, Low-Power, Digital Temperature Sensors With SMBus and Two-Wire Serial Interface in SOT563*, 1 2009.
- [15] FTDI Chip, *FT4232H QUAD HIGH SPEED USB TO MULTIPURPOSE UART/MPSSE IC Datasheet*, 2019. FT_000060, Version 2.6.

- [16] Texas instruments, *Digital Isolator Design Guide*, 2009. SLLA284B revised. August 2018.
- [17] Datapro research corp., *IBM Binary Synchronous Communications (BSC)*, 1993.
- [18] Texas instruments, *TI-RTOS Kernel (SYS/BIOS) User's Guide*, 2 2018. Doc n. SPRUEX3U.
- [19] Texas instruments, *TI 15.4-Stack. Application Overview*, 2018. http://software-dl.ti.com/simplelink/esd/simplelink_cc26x2_sdk/2.10.00.44/exports/docs/ti154stack/html/ti154stack/application-overview.html, urldate: 2020-04-20.
- [20] P. K. M. mit K. Shukla, achit Sharma, "A review of the scopes and challenges of the modern real-time operating systems," *nternational Journal of Embedded and Real-Time Communication Systems*.
- [21] R. J. Bril, J. J. Lukkien, and W. F. J. Verhaegh, "Worst-case response time analysis of real-time tasks under fixed-priority scheduling with deferred preemption revisited," 2006.
- [22] Maxim Integrated Products, Inc, *MAX4238/MAX4239 Ultra-Low Offset/Drift, Low-Noise, Precision SOT23 Amplifiers datasheet*, 2018.

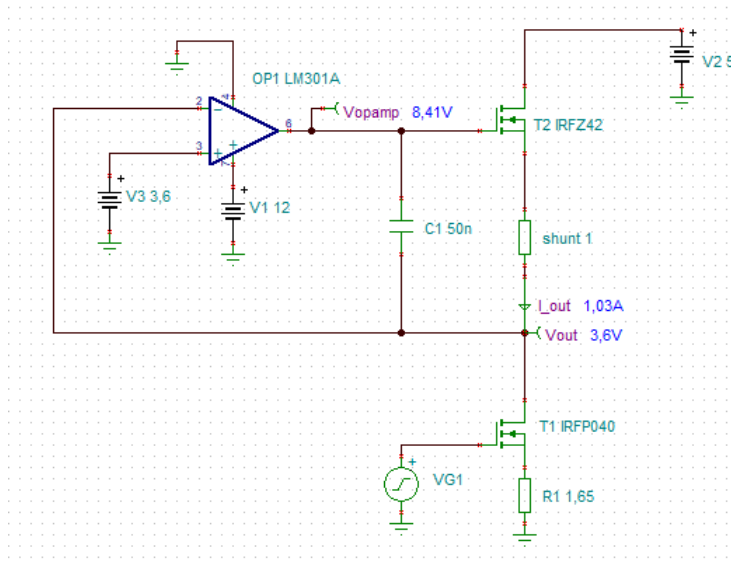
Bijlage index

Om de leesbaarheid te vergroten zijn er enkele bijlage bijgevoegd aan de scriptie die extra inzicht bieden aan het verloop van het project.

Bijlage	Document
1	Lab notes stroomcircuits
2	Ontwerptekeningen

Lab notes stroom meting regulated voltage measurement

Voor het bereiken van een stroommeting zonder spanningsval wordt een stroommeter getest aan de high side van het target device die de spanning reguleert waardoor er geen spanningsval is bij hogere stromen. Gekeken wordt naar de stabiliteit van de ingangsspanning voor de target, de precisie van de stroommeting en de hoogfrequente response tot 5 kHz.



Figuur 1 Circuit opamp gereguleerde stroom meting zonder spanningsdrop

Conclusie simulaties en berekeningen

Via zowel NPN/PNP als Mosfet regelen is het mogelijk om het de spanning stabiel te krijgen op het gewenste niveau bij lage stromen. Er kunnen oscilaties ontstaan maar door het goed kiezen van condensatorwaarden is het mogelijk om die er uit te filteren. Echter bij hoge stromen en hoge frequenties lijken er 2 effecten meet te gaan spelen.

Ten eerste kan de schakel transistor die te laat reageert ervoor zorgen dat het circuit bij het plotseling vragen van een lage stroom na een hoge stroom (Plotselinge stijging van ingangsimpedantie van de target) een spanningsboost geven van volts tot de voedingspanning van de transistor.

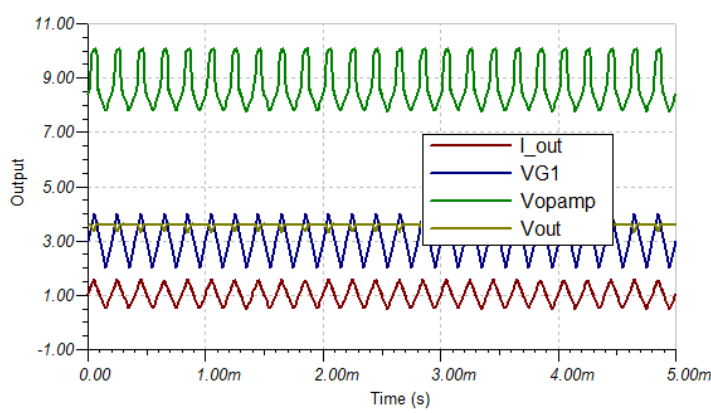
Daarnaast is er een sterk voedingscircuit of een kleine shunt vereist om de spanning op het juiste niveau te houden bij verschillende stromen. Een hogere voedingspanning versterkt het eerste beschreven effect. Een kleine shunt vereist grote amplificatie van het signaal om kleine stromen te kunnen meten.

In principe zou met een kleine shunt $< \sim 1 \text{ Ohm}$ (of variabele shunt) een stabiel systeem te ontwerpen moeten zijn met een 0-2A stroom, dat voor de maximale differentiaal van de stroom niet significante oscilaties met zich meebrengt te ontwerpen zijn.

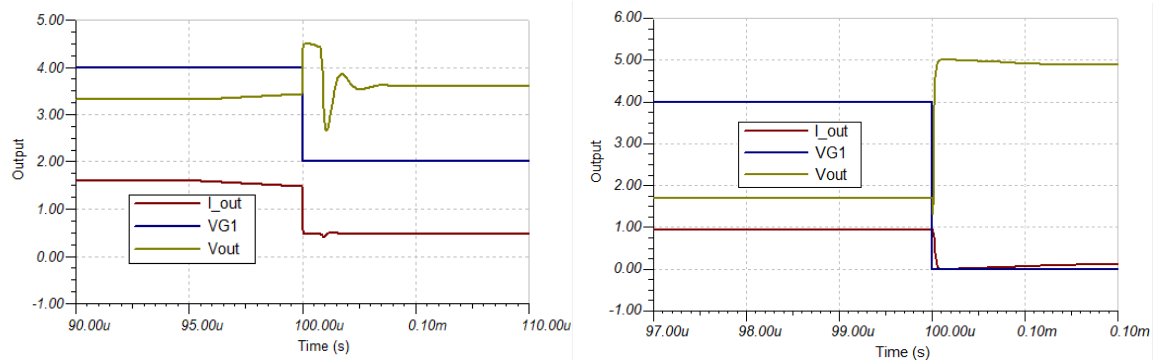
Component waardes meetopstelling

- Rshunt = 3,9 Ohm
 - OPAMP = MAX4239
- R1 = 10 Ohm FET = STp440nf (NMOS)

Resultaten

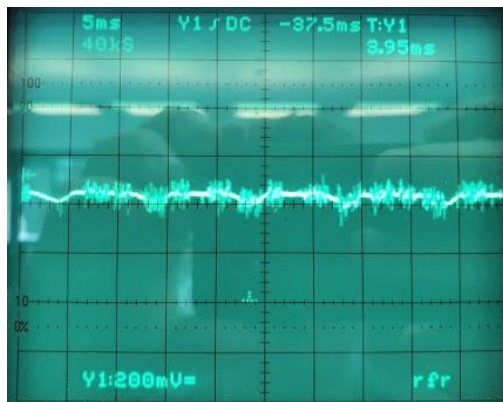


Figuur 2 Door plaatsing van condensator is het signaal redelijk stabiel te maken.

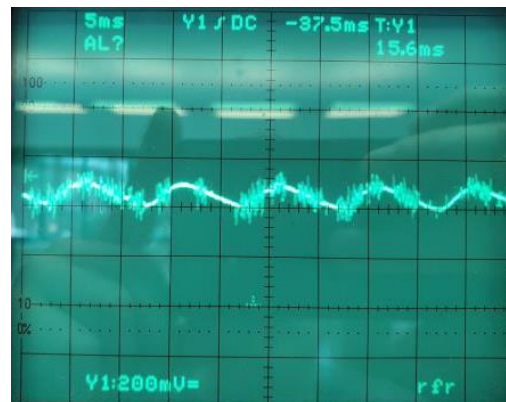


Figuur 3 a & 3 b Bij een stop in stroom ontstaat er een spanningspiek bij de V+ target module (3b met condensator)

- Eerste meetopstelling ($C_1 = 0$ F) gaf ongewenste oscillaties.



Figuur 4 Oscilaties vout na +2 seconden inschakelen voedingsspanning

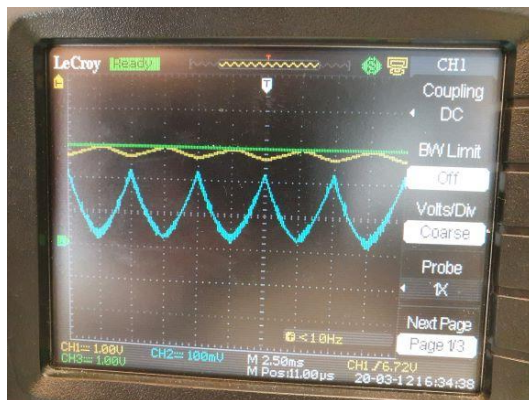


Figuur 5 Zelfde signaal ~10 seconden later

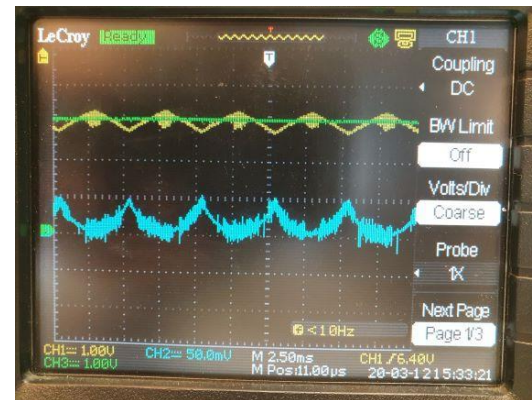
van de

- Metingen in DC met veel ruis benaderen correcte waarde. Circuit niet sterk genoeg om stromen op te vangen van meer dan 40mA
- Vout met condensator weerstand 10 uF verwijdert ruis. Nog steeds niet genoeg vermogen.

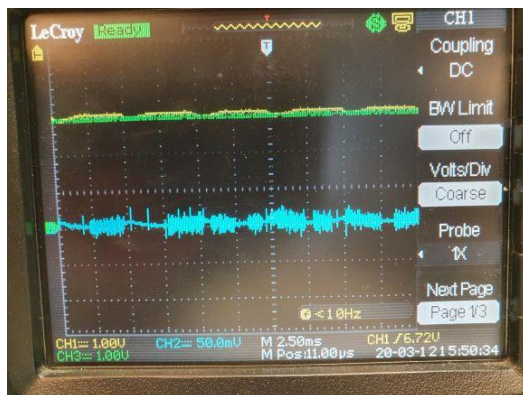
- Met condensator van vout naar gnd wordt de step respons bijzonder traag.



Figuur 7 circuit levert niet genoeg om spanning stabiel te houden (groen = Vref; geel = vout; blauw = Vr1)



Figuur 6 oscillaties in stabiele toestand, weer spanningsdip ($C1 = 0F$) (groen = Vref; geel = vout; blauw = Vr1)



Figuur 8 DC analyse $I_{out} = 0$. Systeem stabiel met Vout = Vref



Figuur 9 impuls respons met 10 uF Vout opamp (groen = Vref; geel = vout; blauw = Vr1)

- Omdat het systeem niet stabiel te krijgen was het niet mogelijk om eventuele spanningspieken te testen op hoge frequentie.

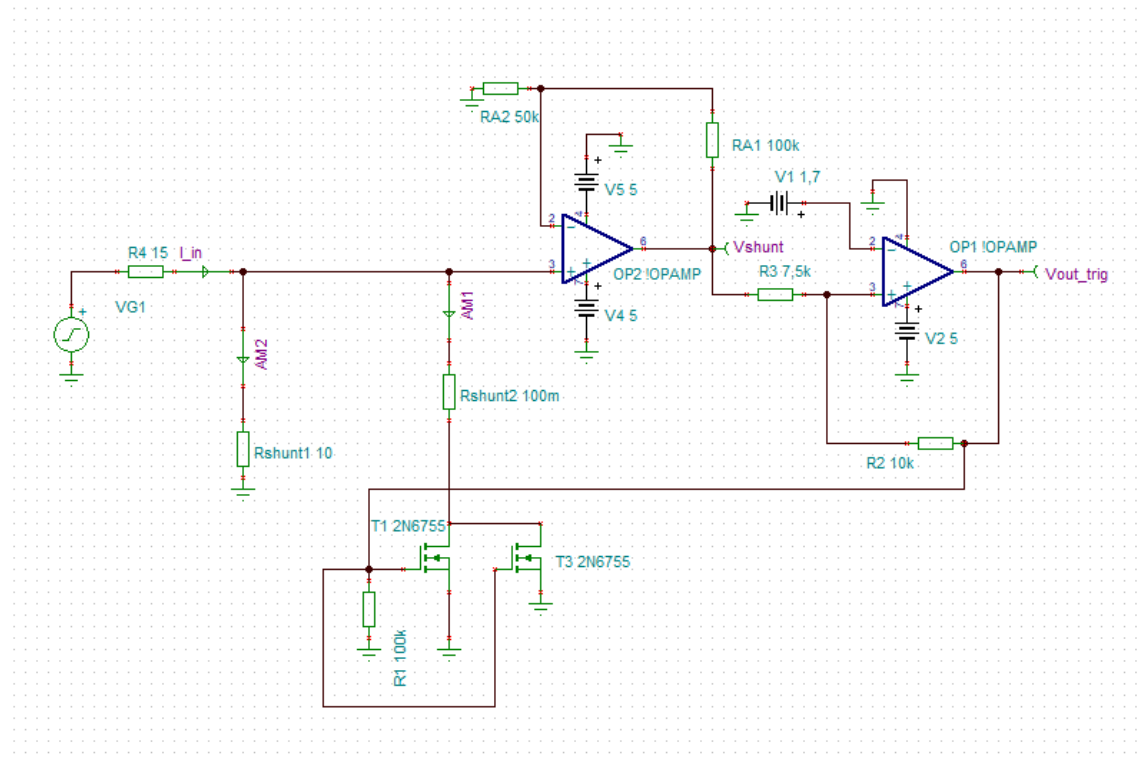
Conclusie

Met de huidige componenten is het niet geluk om een betrouwbaar systeem te bouwen. Uit de simulaties blijkt dat in theorie dit systeem gerealiseerd kan worden. Er is aangetoond dat in gelijkstroom het gewenste circuit gerealiseerd kan worden. Echter is vanwege de onstabiliteit, het gebrek aan leveren van genoeg stroom en vermogen dissipatie in meetopstelling geen gewenst circuit voor de toepassing.

Verder onderzoek naar de opstelling is niet nodig gezien de resultaten van de simulaties en metingen.

Lab notes stroom meting switch shunt

Om te bepalen of een meetsysteem met een schakelbare shunt voldoet aan de eisen van het systeem is een meting gedaan met een ontworpen systeem. Bepaald wordt of de meting om te rekenen is naar een absolute waarde, Of het schakelen van de shunt een vertraging heeft en of het systeem hoogfrequent (5khz) hetzelfde reageert als laagfrequent.



Figuur 1 circuit bevat drie delen, schakelbare shunt, versterking & schmitttrigger

Component waardes meetopstelling

Rshunt1 = 10,3 Ohm	Rshunt2 = 0,1 Ohm 1%	R1 = 100 kOhm
RA1 = 100 kOhm	RA2 = 10,0 kOhm	V1 = 2,24 V
R3 = 7,46 k Ohm	R2 = 10,0 kOhm	FET = STp440nf (NMOS)
R4/Rin = 10,4 Ohm		

Resultaten

- Schmitt trigger lage threshold spanning lag onder het nulpunt. Schmitt trigger handmatig bijgesteld doormiddel van reference voltage aanpassen.
- functiegenerator kan niet genoeg vermogen leveren; gelimiteerd tot 100mA
- laagfrequente tests komen overeen met simulaties en berekeningen. Systeem schakelt snel en de spanningsval over de shunt blijft laag.
- Step response laat vertraging van schakelen shunt zien van ~10 us (uitersten tussen 16 & 7 us)
- Hoogfrequente respons laat variabele schakeltijd zien van de shunt resistor (Te zien door pieken amplitudeverschil direct na het schakelen fig.5)



Figuur 2 100Hz meting, blauw = ingangsspanning met 10 Ohm load groen = Vshunt amplified.



Figuur 3 step responsie. te zien is dat de schmitt trigger na ~10 us de lage shunt inschakeld



Figuur 5 1kHz meting, te zien is een variabele tijd tussen schakelen shunt



Figuur 4 5kHz meting shunt schakeld zichtbaar later dan bij andere metingen

Conclusie

De resultaten laten zien dat het goed mogelijk is om een automatisch schakelbare shunt te gebruiken om over 6 decades stroom te meten. Zowel hoog als laagfrequent komt de gemeten uitgangswaarde overeen met de berekende versterkingsfactor.

De responstijd van de shunt is echter wel variabel. De gemiddelde tijd gemeten is 10 us en afgeleid is dat de afwijking ongeveer 5us kan verschillen. Ook zal er bepaald moeten worden wat de goede weerstandswaarden zijn. Zodat de spanningsval geen invloed heeft op het gebruik en de meting het volle bereik kan meten.

Wel is er vanwege de schakeltijd een bewerking nodig van het signaal afhankelijk van de stand van de transistor. Dit zal een digitale bewerking moeten zijn.

Lab notes stroom meting variabele shunt

De eerste metingen testen of de versterking van het signaal overeenkomt met de simulaties en berekeningen. Er wordt gezocht naar een opstelling die vanaf een bepaalde stroomwaarde lin de versterkingsfactor v_{out}/i_{in} verandert door de impedantie van de shunt te verminderen. Dit gebeurt door het gebruik van de cutoff en active region van een npn transistor in de shunt opstelling.

Verder wordt de responsie gemeten van een bloksignaal om de stap responsie te bepalen. De stroombron wordt gesimuleerd door een functiegenerator en een weerstand.

Formules

Relatie tussen stroom en spanning in cutoff region npn:

$$V_{out_amp} = A_{opamp} I_{in} R_{shunt} = \left(1 + \frac{R_{A1}}{R_{A2}}\right) I_{in} (R_{S1} + R_{S2})$$

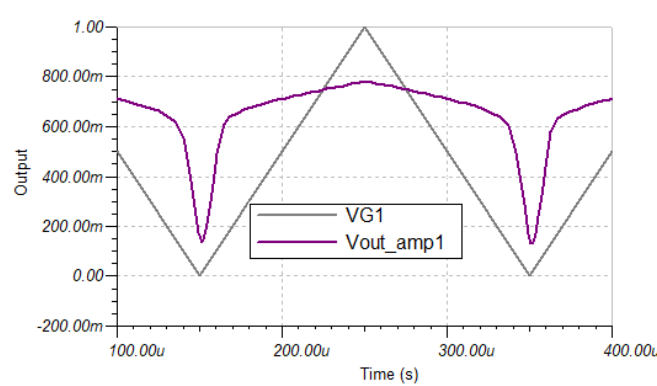
Voor de relatie tussen de stroom en spanning geldt

$$V_{out_amp} = (I_{in} R_{S1} + R_{S2} (I_{in} - I_c)) A_{opamp}$$

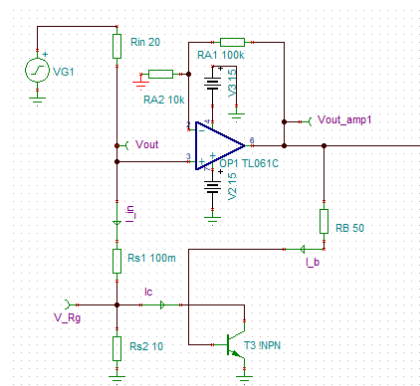
$$I_c = \beta I_b = \beta \frac{V_{outamp} - V_{don}}{R_B}$$

Simulaties

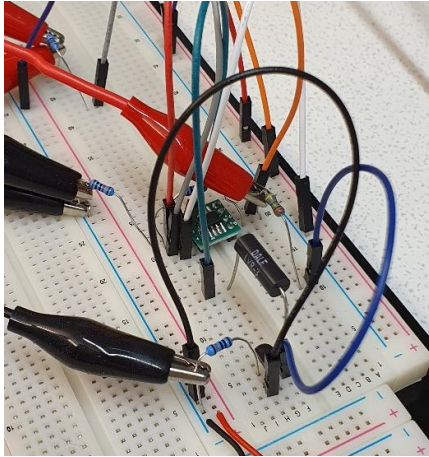
Simulaties geven een dubbele lineaire relatie tussen de stroom



Figuur 2 Relatie tussen stroom (afhankelijk van VG1) en output spanning van de versterker (Vout amp1)



Figuur 1 Schema van het ontworpen circuit



meetopstelling

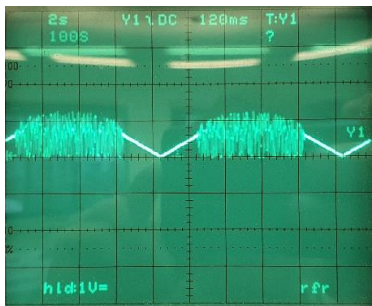
- $R_b = 47,6 \text{ Ohm}$
 - $R_{a1} = 101 \text{ k Ohm}$
 - $R_{a2} = 10,0 \text{ k Ohm}$
 - $R_{s1} = 0,1 \text{ Ohm } 0,1\%$
 - $R_{s2} = 10,8 \text{ Ohm}$
- Op-amp = Max4239
NPN
 $V_s = 5V$

Figuur 3 meetopstelling

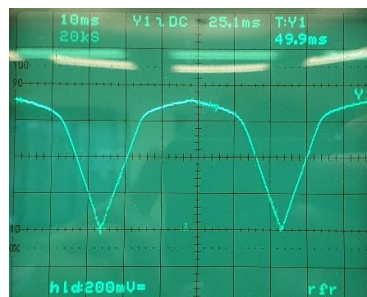
Resultaten

1. Meting gaf oscillaties bij $V_{out} > V_{th}$ (Sawtooth; $f_0 = 0.1 \text{ Hz}$; $I_{pp} = 1 \text{ mA}$)
 - a. Oscillaties bij V_{out} & V_{shunt} .

R_b vervangen door RC low pass filter met $R = R_b$ & $C = 10 \text{ uF}$;

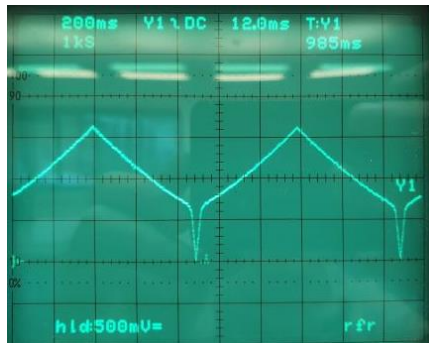


Figuur 5 Meting 1 V_{out} vanaf 0,7 V VBC oscillaties.

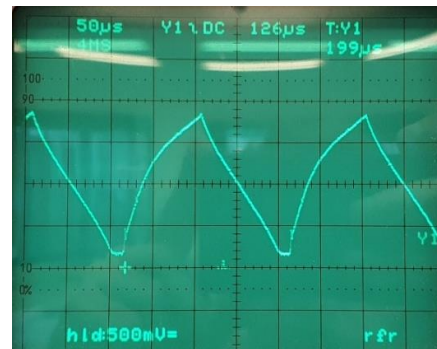


Figuur 4 Meting 2 V_{out} heeft Overeenkomst met berekening en simulaties (laagfrequent) na toepassen RC filter tussen de OPAMP en NPN

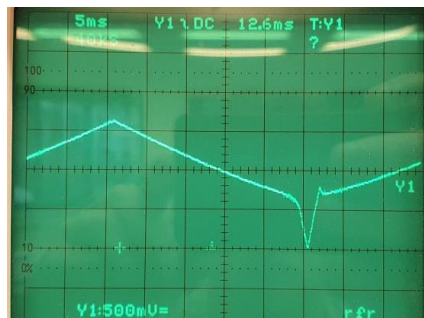
2. Bij een lage frequentie overeenkomst met simulatie en berekening (Sawtooth; $f = 20 \text{ Hz}$; $I_{pp} = 1 \text{ mA}$)
 - a. V_{shunt} piek gemeten op 70 mV
3. Vanaf 100 Hz vervormt het output signaal. Patroon suggereert te lage slew rate.
4. Meting hogere input stroom (sawtooth; $I_{pp} = 400 \text{ mA}$; $f = 20 \text{ Hz}$)
 - a. Duidelijke verandering in I_{in}/V_{out} . Benadering van lineairiteit in bereik van zowel cutoff als active npn region. Kleine exponentiele groei te zien active region van de npn
 - b. V_{shunt} piek gemeten op 150 mV



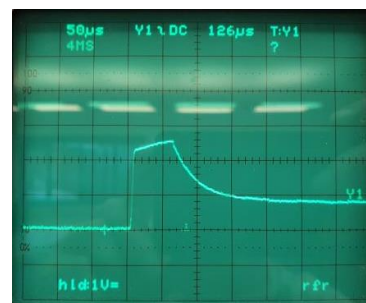
Figuur 7 Meting sawtooth current met input stroom 0-0,4 A. 1Hz.



Figuur 6 hoogfrequente meting, vervorming rond het schakelpunt.

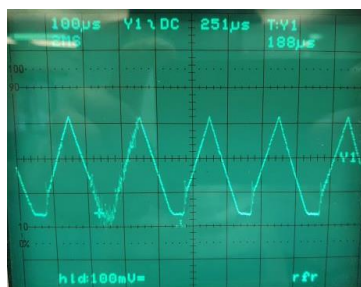


Figuur 9 vanaf +- 20 Hz overshoot in meting lin 0-400mA sawtooth

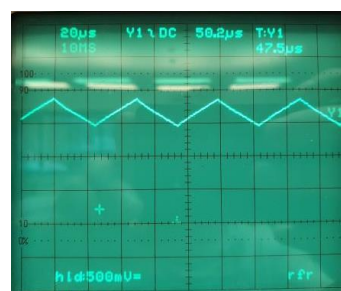


Figuur 8 stap responsie, vanaf 200 is de waarde binnen 5% van uiteindelijke waarde

- Input blokspanning gaf aan dat er voor ongeveer 200 μ S een overshoot is.



Figuur 11 lineariteit in cutoff region hoogfrequent

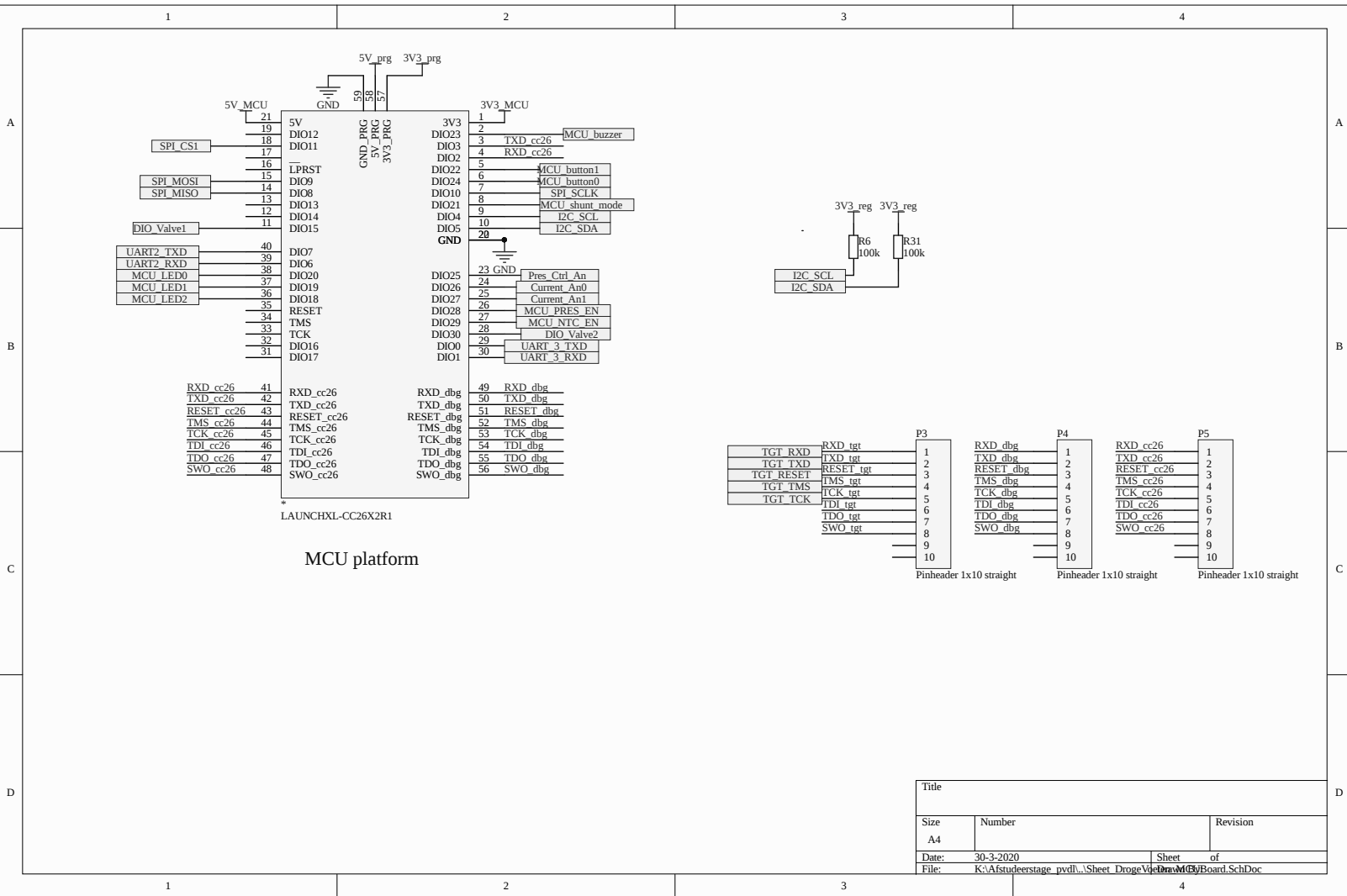


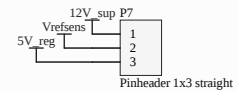
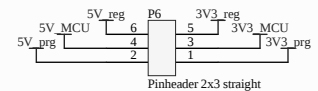
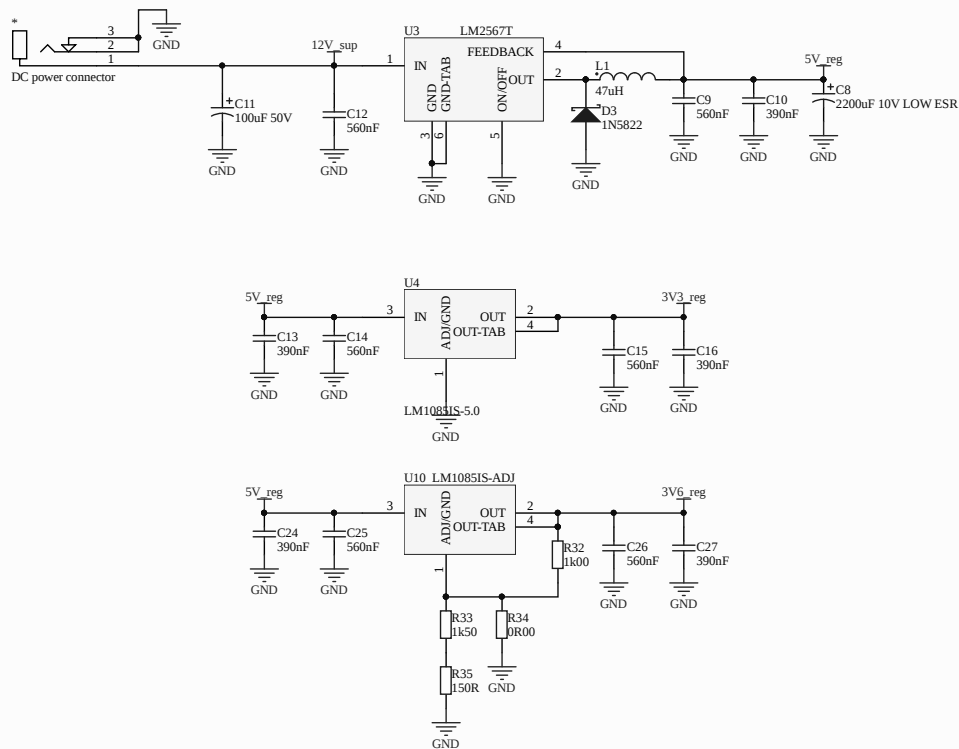
Figuur 10 Lineariteit in active region hoogfrequent

- Gekeken naar lineariteit in cutoff region. Voor cutoff region het signaal is van laag tot hoogfrequent lineair (getest 0-20 kHz). Benaderen van de 0 vlakt het signaal af. Oorzaak dat de V- van de opamp (aan GND) bereikt is en het signaal dus niet versterkt kan worden.
- Gekeken naar de lineariteit in de active region. Hier is het signaal goed versterkt van laag tot hoog frequent (Getest 0-200 kHz)
- Temperatuursinvloed bekeken. Vout/in daalt bij afkoelen npn transistor

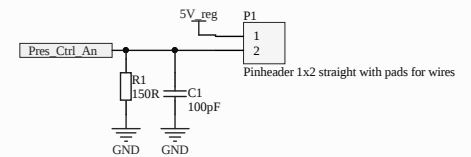
Conclusie

De gewenste relatie tussen stroom en spanning is te realiseren voor een lage frequentie. De waardes zijn linear genoeg om de gemeten waardes om te kunnen rekenen naar een absolute waarde. Ook is een zuivere versterking hoogfrequent te realiseren als de signaal output sterkte of in de active region of in de cutoff region

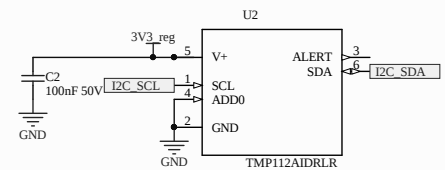




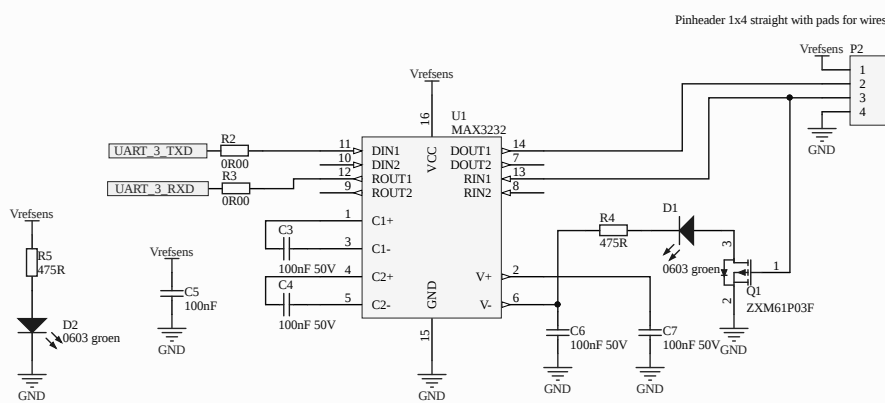
Title		
Size A4	Number	Revision
Date:	30-3-2020	Sheet of
File:	K:\Afstudeerstage_pvd\...Sheet DrogeVee\...SchDoc	



Pressure Control sensor

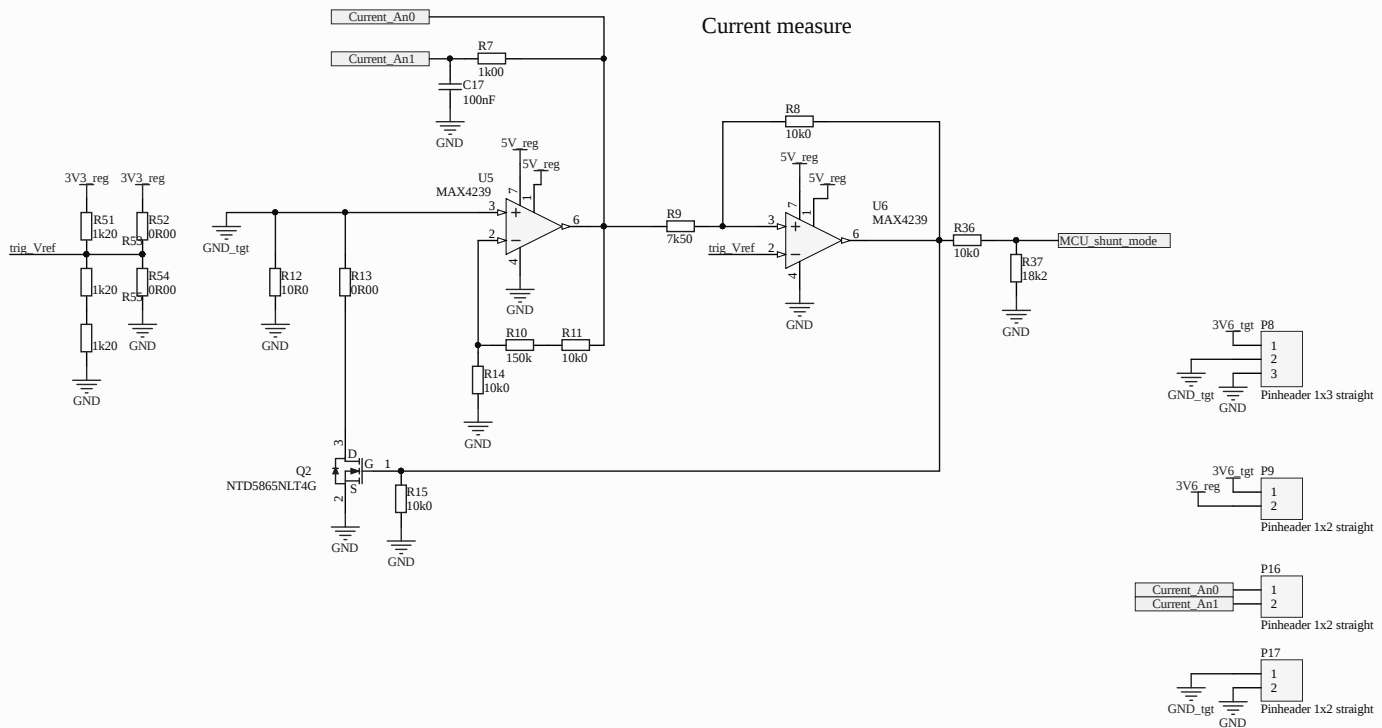


Temp sensor

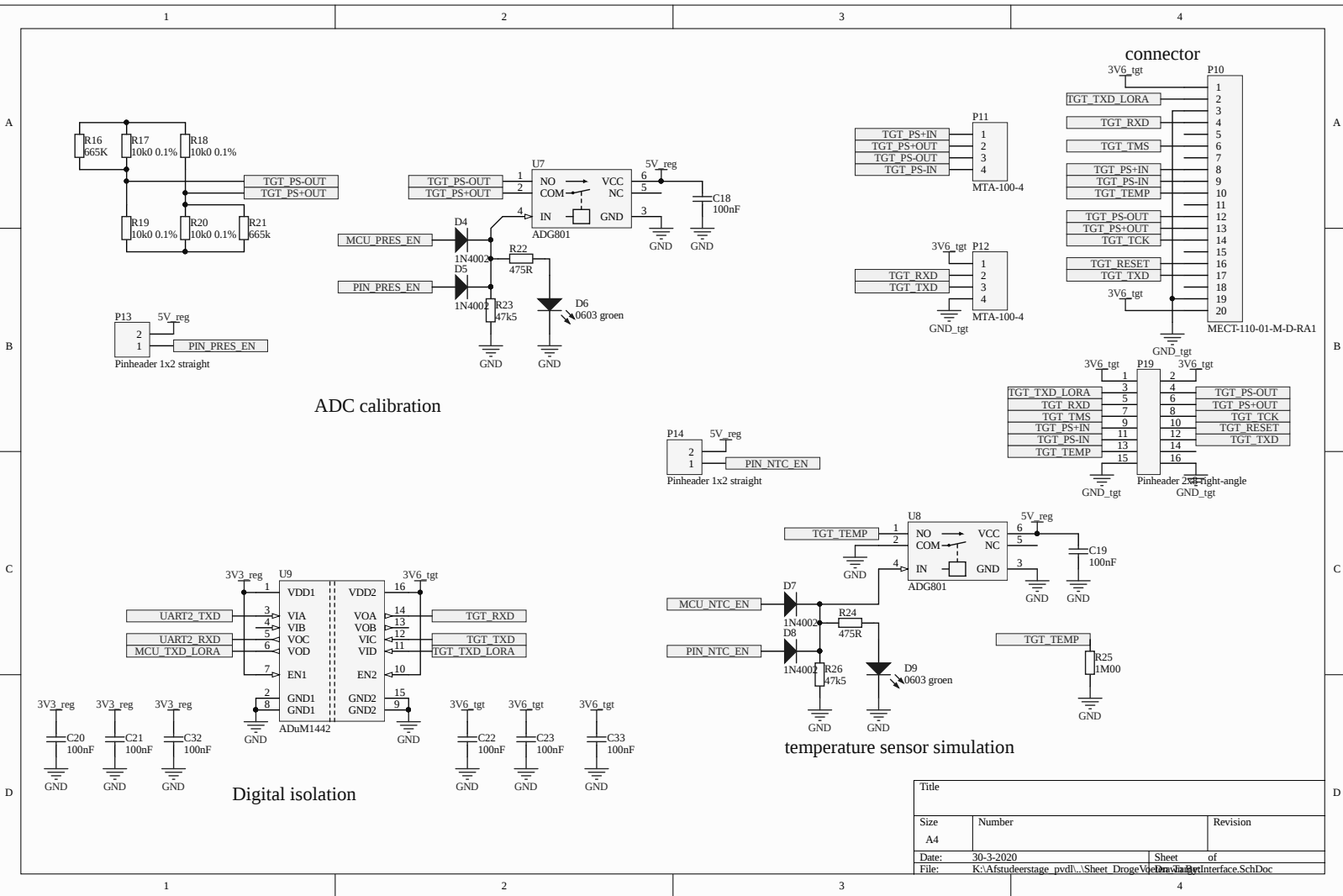


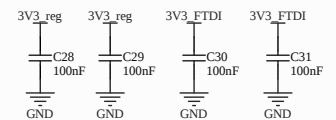
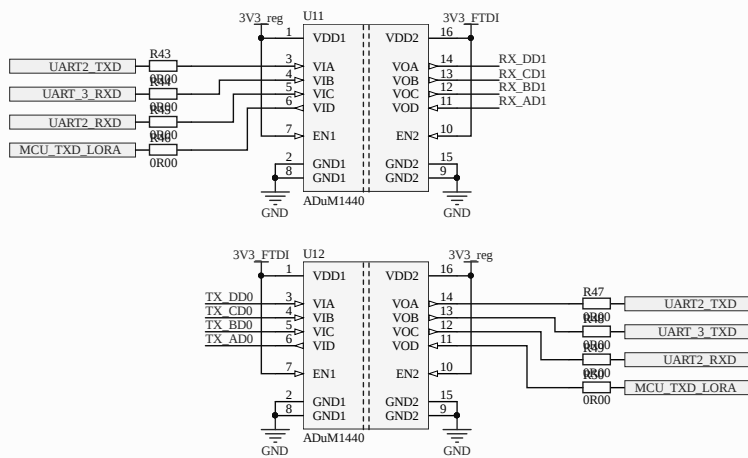
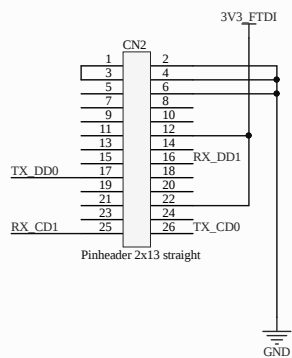
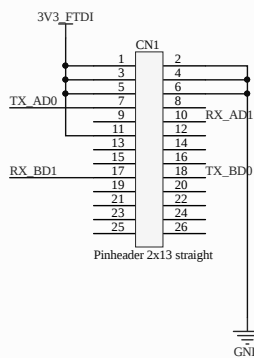
Pressure reference sensor interface

Title		
Size A4	Number	Revision
Date:	30-3-2020	Sheet of
File:	K:\Afstudeerstage_pvd\1_Sheet DrogeVeerdr\1_SchDoc	

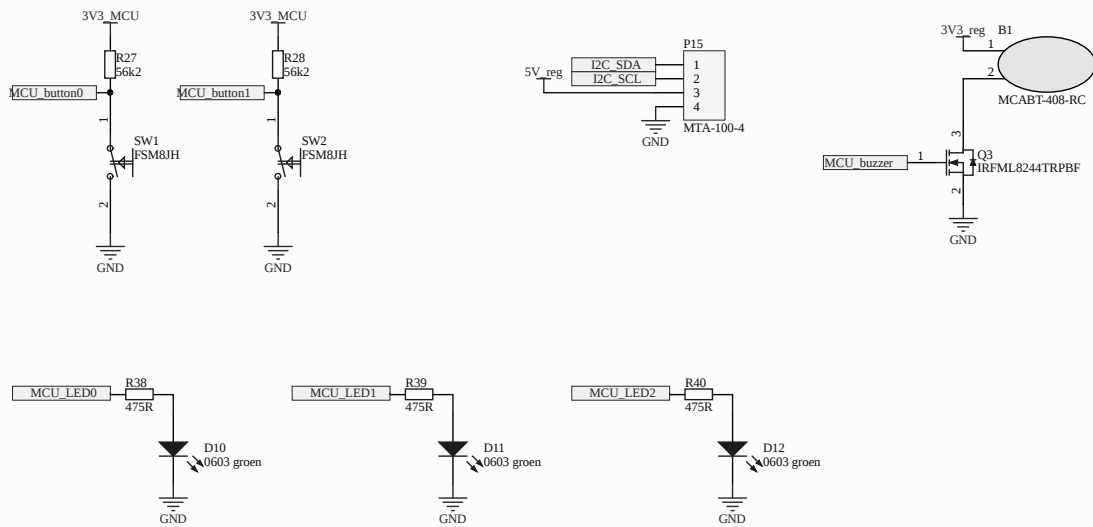


Title		
Size	Number	Revision
A4		
Date:	30-3-2020	Sheet of
File:	K:\Afstudeerstage pvdL\Sheet DrogeVeld\Bor2.SchDoc	

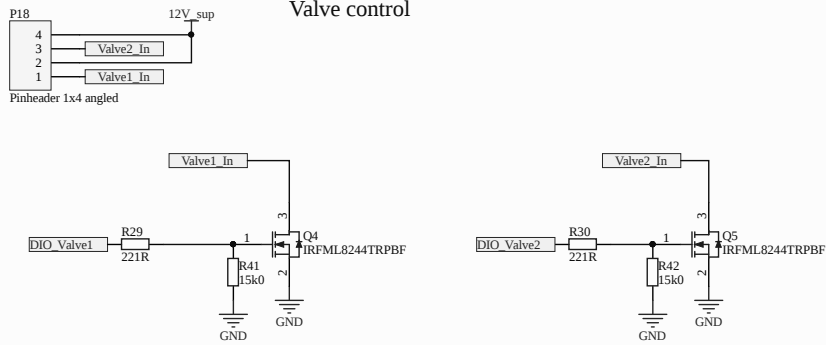




Title		
Size A4	Number	Revision
Date: 30-3-2020	Sheet 1	of 1
File: K:\Afstudeerstage_pvdL\Sheet_DrogeVeld\Sniffer.SchDoc		



Title		
Size	Number	Revision
A4		
Date:	30-3-2020	Sheet of
File:	K:\Afstudeerstage_pvdL\Sheet_Droge_Veld\BchDoc	



Compressor power

Title		
Size	Number	Revision
A4		
Date:	30-3-2020	Sheet of
File:	K:\Afstudeerstage_pvdL\Sheet_DrogeVeld\Drawings\SchDoc	

BIJLAGE 4 Bedrijfsbeoordeling uitvoering afstudeeropdracht

De Haagse Hogeschool, Faculteit voor Technology, Innovation & Society Delft

Naam student	Pieter van der Lingen
Studentnummer	14094258
Opleiding student	Elektrotechniek
Afstudeer periode	Shift 3 8-2-2020 tot 29-5-2020
Naam bedrijf	Leidendorp Instruments
Naam bedrijfsmentor	Hans Liefeling

Wat is uw oordeel over de prestatie van de student tijdens de afstudeerperiode, onderscheiden naar de volgende punten:

O = onvoldoende; T = twijfelachtig; V = voldoende; G = goed; U = uitstekend

	O	T	V	G	U
Inzicht				X	
Systematische aanpak				X	
Kwaliteit gegevensverzameling			X		
Kwaliteit (tussen)rapportage			X		
Theoretische kennis				X	
Praktische inzicht				X	
Nauwkeurigheid/zorgvuldigheid				X	
Houding en optreden			X		
Zelfstandigheid				X	
Werktempo				X	
Totale beoordeling					

Naam student	Pieter van der Lingen
Studentnummer	14094258

Competentieverslag afstuderen

Terugblik op de competentieontwikkeling in het afstudeertraject.

Student: Pieter van der Lingen

Student nummet: 14094258

Inleiding

Voor het behalen van het afstuderen is het van belang dat de competenties Analyseren, Ontwerpen, Realiseren op niveau 3 en managen en onderzoeken op niveau 2 worden bewezen. In het plan van aanpak staat beschreven wat de verwachting was op het gebied van competentiebewijzen. Dit document geeft de uiteindelijke resultaten met verwijzingen naar de verschillende bewijsstukken met een reflectie.

Analyseren

Bij aanvang van de stage was er nog geen duidelijk pakket van eisen. Verder was er gekeken met de gebruikers van het systeem naar eventuele uitbereidingen aan de hand van diens wensen. Er is een doelstelling geformuleerd, eisen vastgesteld van de verschillende onderdelen en systemen zijn geanalyseerd waarin het kalibratiesysteem geplaatst gaat worden.

Taak	Relatie tot competentie	Aard van de taak	Aard van de context	Mate van zelfstandigheid
Formuleren van een heldere doelstelling	Formuleren van een heldere doelstelling.	Licht complex.	Onbekend, Multidisciplinaire over wegingen	Zelfstandig
Opstellen pakket van eisen	Selecteren van relevante aspecten. Opstellen van een programma van eisen	Complex.	Bekend; complex	Zelfstandig
Analyse van huidige staat van dienst en huidig geïmplementeerde oplossingen	Modeleren van een proces/product	Complex, ongestructureerd, verbeterd de normen en past die aan de situatie aan	Onbekend, multidisciplinair in de praktijk	Zelfstandig
Analyse van nieuwe oplossing en verbetering van dienst	Modeleren van een proces/product. Aangeven van bedrijfseconomische en vak gerelateerde aspecten.	Ongestructureerd, verbeterd de normen en past die aan de situatie aan	Onbekend, multidisciplinair in de praktijk	Zelfstandig

Reflectie

Deze competentie is vervuld zoals beschreven in het plan van aanpak. Een toevoeging die tijdens het project is uitgevoerd is dan analyse van de kwaliteit van het ontwerp. Het eerste PCB ontwerp is niet

zorgvuldig genoeg gedaan en dit heeft later geleid tot een analyse van het niet werkende gedrag. Hierbij is het product opnieuw gemodelleerd.

Bewijsstukken

- Doelstelling is beschreven in de scriptie.
- Beschrijving van de eisen.
- Beschrijving van de softe eigenschappen/De randzaken en het systeem. Dit toont aan dat de bestaande omgeving geanalyseerd is waarin het systeem geplaatst wordt

Ontwerpen

De meeste activiteiten in de stage vallen onder de competentie ontwerpen. Er moet voor de opdrachtgever een functioneel en technisch ontwerp gemaakt gaan worden, Dat voldoet aan de technische- en bedrijfseisen van de opdrachtgever. Ook zal het project gerealiseerd worden en daarmee worden de vaardigheden dus op niveau getoetst.

Taak	Relatie tot competentie	Aard van de taak	Aard van de context	Mate van zelfstandigheid
Functioneel ontwerp	Vanuit de eisen tot een conceptoplossing komen.	Complex, ongestructureerd, verbeterd de normen en past die aan de situatie aan	Onbekend, Complex Multidisciplinaire over wegingen	Zelfstandig (Opdrachtgever is op de hoogte van voortgang)
Technisch ontwerp	Maken van een geallieerd ontwerp vanuit de concept oplossing	Complex, ongestructureerd, verbeterd de normen en past die aan de situatie aan	Onbekend, Complex Multidisciplinaire over wegingen	Zelfstandig (Opdrachtgever is op de hoogte van voortgang)
Verificatie ontwerp	Het ontwerp wordt geverifieerd aan de hand van de eisen	gestructureerd, complex	Bekend, complex	Zelfstandig

Reflectie

Het ontwerp is getest en er het ontwerp is door de acceptatie heengekomen. Het geteste ontwerp toont in overeenkomst met de ontwerptekeningen aan dat de het competentie niveau bereikt is.

Bewijsstukken

- De scriptie
- Ontwerptekeningen
- De gerealiseerde opstelling

Realiseren

Vanuit het ontwerp is het product gerealiseerd. Hierbij zijn keuzes gemaakt voor de productiemethoden en componenten die binnen de mogelijkheden vallen van het bedrijf. Daarna wordt verwacht dat deze methoden en middelen gebruikt worden voor de assemblage van het proces.

Taak	Relatie tot competentie	Aard van de taak	Aard van de context	Mate van zelfstandigheid
Keuzes maken in materialen, methoden, normen en processen	Passend gebruik maken van voorgenoemde benodigdheden	Complex, ongestructureerd, verbeterd de normen en past die aan de situatie aan	Onbekend, Complex Multidisciplinaire over wegingen	Zelfstandig
Assembleren van de testopstelling	Assembleren van componenten tot een integraal product	Complex, ongestructureerd. Gebruikt bestaande normen.	Bepaalde onbekende aspecten, complex. Multidisciplinair. (Pneumatisch aspect)	Zelfstandig
Verifiëren product	Verifiëren en valideren product T.O.V. de opgetelde eisen	Complex, ongestructureerd. Gebruikt bestaande normen.	Bekend, complex	Zelfstandig

Reflectie

De afwegingsmethoden en vaardigheden die verbonden zijn met de competentie realiseren zijn aangetoond doormiddel van de gerealiseerde opstelling. Hierin zijn verstandige keuzes gemaakt omtrent productie en materialen. Daarnaast is aangetoond dat de afstuderende student in staat is tot het verifiëren van zijn eigen ontwerp doormiddel van gestructureerd testen.

Bewijsstukken

- In de scriptie zijn de keuzes omtrent productiemethoden toegelicht.
- De gerealiseerde opstelling en de testresultaten

Managen

Het managen is een lastige competentie aangezien dit een zelfstandige opdracht is. Het sturen van processen is daarom beperkt. Wel worden verschillende project management tools en planningsmethoden gebruikt om de voortgang te monitoren. Hierbij heeft de student aan de hand van zelfcontrole en feedback de processen die die uitvoert bijgestuurd. Het Project wordt ook professioneel aangepakt en dus heeft de student zijn beschikbare resources optimaal toegepast voor een goed project resultaat.

Taak	Relatie tot competentie	Aard van de taak	Aard van de context	Mate van zelfstandigheid
Opzetten planning	Opzetten van een deelproject; kwantificeren van tijd, geld en resources; opzetten van documentatie	Complex, ongestructureerd	Bekend, Complex, Multidisciplinair in de praktijk	Zelfstandig
Voortgangs-monitoring	Monitoren en bijsturen van activiteiten	Complex, ongestructureerd, verbeterd de normen en past die aan de situatie aan	Bekend, Complex, Multidisciplinair in de praktijk	Zelfstandig
Professionele aanpak	Taak- en procesgerichte communicatie	Complex, Past bekende methoden toe op wisselende situaties	Bekend, complex	Zelfstandig

Reflectie

Tijdens het verloop zijn er meerdere obstakels opgedaan die de student en de projectplanning onder druk hebben gezet. Hierin is zelfstandig proactief op gereageerd en dit draagt bij aan het resultaat.

De ontvangen feedback wijst op een professionele houding. Het resultaat dat overeenkomt met het opgezette plan wijst naar een goede planning.

Bewijsstukken

- De scriptie beschrijft kort en bondig de projectorganisatie
- De resultaten wijzen op een structurele aanpak en komen overeen met de opgestelde planning in het Plan van Aanpak.
- De bedrijfsbeoordeling wijst naar een systematische en professionele houding.

Onderzoeken

Taak	Relatie tot competentie	Aard van de taak	Aard van de context	Mate van zelfstandigheid
Ontwerponderzoek	zelfstandig literatuur selecteren en verkrijgen	Complex, ongestructureerd	Onbekend, complex	Zelfstandig
Verwerken van resultaten en testen	Opzet van experimenten, rapportage van resultaten	Complex, ongestructureerd	Bekend, Complex, Multidisciplinair in de praktijk	Zelfstandig

Reflectie

Het ontwerponderzoek werd na analyse van de opdracht verder uitgebreid. In de scriptie is diep ingegaan op het verichte onderzoek naar de stroommeter. Hierbij is vooraf een literatuurstudie gedaan waaraan de resultaten verschillende experimenten zijn uitgevoerd.

Dit heeft bijgedragen aan het ontwerp.

Bewijsstukken

- Hoofdstuk 2 van de scriptie.
- De Lab notes van de experimenten.
- De bronverwijzing.