

2017 • 2018
Faculteit Industriële ingenieurswetenschappen
master in de industriële wetenschappen: elektronica-ICT

Masterthesis

Development of modular and flexible HTOL setup

PROMOTOR :

Prof. dr. ir. Luc CLAESEN

PROMOTOR :

ing. Kevin HAESEVOETS

COPROMOTOR :

ing. Nard ACHTEN

Berkay Aras

Scriptie ingediend tot het behalen van de graad van master in de industriële wetenschappen: elektronica-ICT

De transnationale Universiteit Limburg is een uniek samenwerkingsverband van twee universiteiten in twee landen: de Universiteit Hasselt en Maastricht University.



Universiteit Hasselt | Campus Diepenbeek | Agoralaan Gebouw D | BE-3590 Diepenbeek
Universiteit Hasselt | Campus Hasselt | Martelarenlaan 42 | BE-3500 Hasselt



2017•2018

Faculteit Industriële ingenieurswetenschappen
master in de industriële wetenschappen: elektronica-ICT

Masterthesis

Development of modular and flexible HTOL setup

PROMOTOR :

Prof. dr. ir. Luc CLAESEN

PROMOTOR :

ing. Kevin HAESEVOETS

COPROMOTOR :

ing. Nard ACHTEN

Berkay Aras

Scriptie ingediend tot het behalen van de graad van master in de industriële wetenschappen: elektronica-ICT



KU LEUVEN

Woord vooraf

In de laatste fase van mijn opleiding heb ik dankzij Melexis Technologies de mogelijkheid gekregen om mijn theoretische kennis toe te passen in de praktijk. Het was een bijzonder leerrijke periode waar ik ondergedompeld werd in de bedrijfswereld. Ik wil in de eerste plaats mijn externe promotor, ing. Kevin Haesevoets, bedanken voor de steun en de begeleiding van dit uitdagende project. Ik wil ook graag mijn externe copromotor, ing. Nard Achten, bedanken voor de hulp en de technische expertise. Beide promotoren hebben mij gedurende 8 maanden de mogelijkheid gegeven om een onderdeel te zijn van de Product Verification afdeling. Ik wil ook heel de Product Verification afdeling bedanken voor de aangename stageperiode.

Prof. dr. ir. Luc Claesen kan ik natuurlijk niet vergeten. Ik wil mijn interne promotor duizendmaal bedanken voor zijn steun in de afgelopen maanden. Het is mede dankzij hem dat ik zover ben geraakt.

Ten slotte wil ik mijn ouders en mijn broer bedanken voor alles wat zij voor mij gedaan hebben.

Nogmaals bedankt!

Berkay Aras

Juni, 2018

Inhoudsopgave

Lijst van tabellen	5
Lijst van figuren.....	7
Verklarende woordenlijst	9
Abstract	11
Abstract in English.....	13
1 Inleiding	15
1.1 Situering	15
1.2 Probleemstelling.....	15
1.3 Doelstellingen.....	16
1.4 Materiaal en methode.....	16
1.4.1 Materiaal	16
1.4.2 Methode	19
2 Literatuuronderzoek	21
2.1 Stress test kwalificatie voor geïntegreerde schakelingen	21
2.1.1 Algemene testflow	21
2.1.2 High-Temperature Operating Life test (HTOL)	22
2.2 Druksensoren	25
2.2.1 Drukmetingen.....	25
2.2.2 Druksensor technologie.....	26
2.2.3 Melexis gamma.....	28
2.3 I2C-communicatieprotocol.....	31
2.3.1 Open drain topologie.....	31
2.3.2 Signalen	32
2.3.3 Keuze pull-up weerstanden.....	33
2.4 Temperatuurmetingen	35
2.4.1 Halfgeleider gebaseerde sensoren.....	35
2.4.2 Thermistor	35
2.4.3 Thermokoppel	36
2.4.4 Resistance temperature detector	36
2.4.5 Overzicht.....	39

3	Hardware ontwerp.....	41
3.1	Chip-PCB	41
3.1.1	Schematische voorstelling.....	41
3.1.2	Hardware implementatie	43
3.2	Adapter-PCB	44
3.2.1	Schematische voorstelling.....	44
3.2.2	Hardware implementatie	45
3.3	Relais-PCB.....	47
3.3.1	Schakelmatrix	47
3.3.2	Stuurmechanisme.....	50
3.3.3	Hardware implementatie	54
4	Software ontwerp.....	57
4.1	Arduino software.....	57
4.2	Labview software	58
4.2.1	Architectuur.....	58
4.2.2	User interface	61
4.2.3	Toevoeging nieuw test type	64
5	Resultaten	65
5.1	Karakterisatie 12131BC	65
5.2	Karakterisatie MLX90818	67
6	Besluit	69
	Referenties	71
	Bijlagen.....	75
	Bijlage A: AEC-Q100 kwalificatie test plan	76
	Bijlage B: Handleiding HTOL-setup.....	77

Lijst van tabellen

Tabel 1: Testgroeperingen van stresstesten	22
Tabel 2: Mogelijke karakterisatiemetingen voor discrete sensoren	28
Tabel 3: Mogelijke karakterisatiemetingen voor applicatiemodus.....	30
Tabel 4: Mogelijke karakterisatiemetingen voor testmodus	30
Tabel 5: Tolerantieklassen voor IEC751/ITS90	37
Tabel 6: Toleranties voor verschillende temperaturen klasse A en B - IEC751/ITS90	38
Tabel 7: Overzicht van temperatuursensoren.....	40
Tabel 8: Pinnen per sensor type.....	42
Tabel 9: Overzicht I/O's PCA9505.....	52
Tabel 10: Seriële commando's	57
Tabel 11: Logfile 12131BC	65
Tabel 12: Logfile MLX90818	67

Lijst van figuren

Figuur 1: Arduino UNO	17
Figuur 2: Keithley 2000 multimeter	17
Figuur 3: PTC-04 programmer	18
Figuur 4: Flow voor stresstesten	21
Figuur 5: Statisch HTOL type	22
Figuur 6: Dynamisch HTOL type	23
Figuur 7: Monitored HTOL type.....	23
Figuur 8: In-situ tested HTOL type.....	23
Figuur 9: HTOL-test in AEC standaard	24
Figuur 10: Drie type drukmetingen	26
Figuur 11: Diafragma met 4 piezoweerstanden.....	27
Figuur 12: Wheatstone-brugconfiguratie van 4 piezoweerstanden	27
Figuur 13: MLX90816 discrete druksensor.....	28
Figuur 14: MLX90809 geïntegreerde druksensor.....	29
Figuur 15: Fast channel SENT message	30
Figuur 16: Het omlaaghalen van de SCL/SDA-lijn.....	31
Figuur 17: Het omhooghalen van de SCL/SDA-lijn	31
Figuur 18: De start en stop conditie van de I2C-bus	32
Figuur 19: De dataoverdracht bij de I2C-bus.....	32
Figuur 20: Het acknowledge-mechanisme van de I2C-bus	32
Figuur 21: De spanningsniveaus voor een hoog en laag signaal	33
Figuur 22: Het equivalent circuit van een open drain driver	33
Figuur 23: De laadcurve van de capaciteit door een weerstand.....	34
Figuur 24: Thermokoppel met hot en cold junction	36
Figuur 25: De weerstand-temperatuur curve van Pt100	37
Figuur 26: Tweedraadsmeting van een weerstand.....	38
Figuur 27: Driedraadsmeting van een weerstand.....	39
Figuur 28: Vierdraadsmeting van een weerstand	39
Figuur 29: Schematische weergave van een socket; links voor discrete sensoren; rechts voor geïntegreerde sensoren	41
Figuur 30: Schematische weergave van flat cable connectoren.....	42
Figuur 31: Layout weergave van de chip-PCB	43
Figuur 32: 3D-weergave van de chip-PCB	44
Figuur 33: Schematische weergave van QFN-socket	45
Figuur 34: Pinout van pin headers.....	45
Figuur 35: Layout weergave van de adapter-PCB (onder)	45
Figuur 36: Layout weergave van de adapter-PCB (boven).....	46
Figuur 37: 3D-weergave van de adapter-PCB	46
Figuur 38: Overzicht schakelmatrix.....	47
Figuur 39: Testbussen.....	47
Figuur 40: Relais voor chip 1	48

Figuur 41: Relais voor Pt100.....	48
Figuur 42: Pinout van instrumenten	49
Figuur 43: Overzicht instrumentenmatrix.....	49
Figuur 44: Stuurmechanisme van PCA9505	50
Figuur 45: Schematische overzicht van PCA9505.....	50
Figuur 46: Schematische overzicht van SN74ABT16244	51
Figuur 47: Eerste byte PCA9505	52
Figuur 48: Tweede byte PCA9505	52
Figuur 49: Schrijven naar een specifieke register	53
Figuur 50: Shiftregister op basis van D-flipflops.....	53
Figuur 51: Layout weergave van de relais-PCB	54
Figuur 52: Overzicht hardware.....	55
Figuur 53: Labview architectuur.....	58
Figuur 54: Flowchart van de toestandsmachine	59
Figuur 55: Datastructuur voor projecten	60
Figuur 56: Labview-code voor dynamisch oproeping van een test VI	60
Figuur 57: Initialize-tab.....	61
Figuur 58: Projects-tab	62
Figuur 59: Visualization test-tab.....	63
Figuur 60: Visualization overview-tab	63
Figuur 61: Visualisatie chip 1 – 12131	65
Figuur 62: Visualisatie chip 1 – 12131 - detail.....	66
Figuur 63: Visualisatie alle chips – 12131.....	66
Figuur 64: Visualisatie chip 2 – MLX90818.....	67
Figuur 65: Visualisatie chip 2 – MLX90818 - detail.....	68
Figuur 66: Visualisatie alle chips – MLX90818.....	68

Verklarende woordenlijst

ADC: Analoog-digitaalomzetter

DAC: Digitaal-analoogomzetter

GPIB: General Purpose Interface Bus.

HTOL: High-Temperature Operating Life

MEMS: Micro-elektromechanisch systeem

PCB: Printed circuit board

RTD: Resistance temperature detector

SENT: Single Edge Nibble Transmission. Een protocol voor dataoverdracht

VI: Virtual Instrument. Een benaming voor Labview-programma's

Abstract

De Product Verification afdeling van Melexis ontwikkelt systemen om sensoren te karakteriseren en te verifiëren. Om de betrouwbaarheid en de kwaliteit van de producten te garanderen, moeten de chips enkele betrouwbaarheidstesten doorstaan. De “High-Temperature Operating Life”-test is één van de belangrijke methoden om de intrinsieke betrouwbaarheid te onderzoeken. Het hoofddoel van deze masterthesis is een flexibele en modulaire HTOL-opstelling te ontwikkelen die zowel discrete als geïntegreerde druksensoren kan karakteriseren.

De huidige HTOL-setup, bestaande uit een chip- en relaisbord, maakt het mogelijk om 114 chips te karakteriseren. Vaak moeten er kleinere hoeveelheden chips getest worden waarvan de testprocedures niet op hetzelfde moment starten. Hierdoor is het noodzakelijk om chipborden bij te plaatsen in de oven. Het grote nadeel is dat elk bord bestaat uit een volledige aparte setup met zijn eigen relaisbord, meetinstrumenten en een laptop. Bovendien is het systeem niet flexibel genoeg om eenvoudig verschillende types sensoren te verifiëren.

Een modulair HTOL-systeem is ontwikkeld waarbij de chip- en relaisborden gestapeld worden. Het systeem is flexibel opgebouwd zodat er tijdens een lopende test extra borden met nieuwe chips en relais ingeplugd kunnen worden. Het I²C-communicatieprotocol in combinatie met D-flipflops is gebruikt om de schakelmatrices te controleren en een plug-and-play configuratie te verzekeren. Per project wordt er een logfile bijgehouden die op zijn beurt geanalyseerd kan worden in Labview.

Abstract in English

The Product Verification department of Melexis develops systems to characterize and to verify sensors. To assure the reliability and the quality of the products, the chips need to endure several reliability tests. The High-Temperature Operating Life test is one of the important methods to determine the intrinsic reliability. The main purpose of this Master's thesis is to develop a flexible and modular HTOL setup which is able to characterize discrete and integrated pressure sensors.

The current HTOL setup, which consists of a chip and relay board, allows to characterize 114 chips. There is often need to test smaller quantities of chips whose test procedures do not start at the same time. Due to this issue, it is necessary to place extra chip boards in the climate chamber. The major disadvantage is that each board consists of a separate setup with own relay board, measurement instruments and a laptop. Furthermore, the system is not flexible enough to characterize different types of sensors.

A modular HTOL system is developed in which the chip and relay boards are stacked. The system is built flexibly in order to be able to plug in extra boards with new chips and relays during an ongoing test. The I²C communication protocol in addition to D flip-flops is used to control the switch matrices and to assure plug-and-play configuration. A log file, which is kept for each project, can be analyzed in Labview.

1 Inleiding

1.1 Situering

Deze masterproef wordt uitgevoerd in opdracht van Melexis Technologies te Tessenderlo. Melexis is een wereldwijd actief technologiebedrijf dat instaat voor micro-elektronica oplossingen in verschillende sectoren. Het bedrijf is één van de wereldleiders op het vlak van sensortechnologie en IC-toepassingen voor de auto-industrie. Hiernaast speelt Melexis ook een belangrijke rol in de industriële en de medische sector [1].

Het Product Verification departement houdt zich bezig met de karakterisatie en de verificatie van de verschillende sensoren. Alvorens de klanten de chips kunnen integreren in hun toepassingen, moet Melexis de kwaliteit en de betrouwbaarheid van hun producten garanderen. De chips moeten afhankelijk van de toepassingen verschillende betrouwbaarheidstesten doorstaan die beschreven worden in de standaarden van de Joint Electron Device Engineering Council en/of Automotive Electronics Council [2], [3].

De “High-Temperature Operating Life”-test (HTOL) is één van de belangrijke methoden om de intrinsieke betrouwbaarheid te onderzoeken en te karakteriseren. In deze test wordt de levensduur van de chip gesimuleerd aan de hand van enkele factoren. In een oven wordt een sample van de geproduceerde chips onder spanning gelegd en opgewarmd tot een hogere temperatuur. Gedurende welbepaalde tijd (typisch 1000 uren) worden periodisch enkele parameters opgevraagd en/of opgemeten. Op basis van deze parameters is het mogelijk om de betrouwbaarheid van de chips te karakteriseren en de werking te verifiëren.

1.2 Probleemstelling

De bestaande HTOL-setup, opgesteld in de Product Verification afdeling, is in staat om 114 druksensoren te karakteriseren. Deze setup bestaat uit een bord in de oven waar maximaal 114 chips op passen, een relaisbord om de chips één voor één op te meten en enkele *flat cables* om beide borden met elkaar te verbinden. Maar vaak moeten er kleinere aantallen getest worden waarbij de verschillende batches ook parallel lopen. Deze starten echter niet op hetzelfde moment, waardoor het noodzakelijk is om chipborden bij te plaatsen in de oven. Het grote nadeel is dat elk bord een volledige aparte setup is met zijn eigen relaisbord, meetinstrumenten en een laptop. In de praktijk is dit zeer omslachtig en economisch onverantwoord omdat er meerdere randapparaten nodig zijn. Aangezien alle chip-sockets ook meestal niet gebruikt worden, is het financieel niet voordelig om te werken met de grote PCB's.

Aanvullend op het vorige probleem is dat de software en de hardware ontworpen is om één type chip te verifiëren met een bepaalde test. Hierdoor is het onmogelijk om verschillende types sensoren te karakteriseren binnen hetzelfde HTOL-systeem. De afdeling druksensoren moet wel regelmatig verschillende types chips testen. Hiervoor worden er chipborden op maat gemaakt en in de praktijk telkens gewisseld. Bovendien wordt de software ook volledig aangepast voor een andere test type. Dit proces is niet flexibel genoeg en bemoeilijkt eveneens de volledige karakterisatie van bepaalde sensoren omdat het systeem daarvoor niet optimaal bestemd is.

1.3 Doelstellingen

De hoofddoelstelling van deze masterthesis is om een flexibele en modulaire HTOL-opstelling te ontwikkelen die efficiënt implementeerbaar is in het werkveld. Om dit te realiseren wordt de hoofddoelstelling opgesplitst in twee deeldoelstellingen.

- Hardware ontwerp

Een PCB met 12 chipsockets moet ontwikkeld worden om deze te plaatsen in een oven. De chips zullen uitgelezen worden met behulp van een relaisbord dat de nodige elektrische verbindingen zal realiseren. Beide borden moeten zodanig ontworpen zijn dat het mogelijk is om deze te stapelen en uit te breiden door ze in elkaar te steken en uit te lezen met één laptop en maximaal twee meetinstrumenten: een multimeter en een PTC-04 programmer. Deze setup moet ook multifunctioneel ontworpen zijn om zowel discrete als geïntegreerde sensoren te kunnen karakteriseren.

- Software ontwerp

De Labview-software moet in staat zijn om de gestapelde chipborden uit te lezen door de verschillende relais juist te schakelen en toelaten om eenvoudig nieuwe projecten bij te voegen. Het systeem moet flexibel zijn zodat er tijdens een lopende test extra borden met nieuwe chips en relais ingeplugd kunnen worden. Hierbij moet er rekening gehouden worden met de verschillende logbestanden. Als resultaat van de test moet er per project één logfile geproduceerd worden met de specifieke parameters. Deze parameters zouden ook gevisualiseerd moeten worden in de software.

1.4 Materiaal en methode

1.4.1 Materiaal

Verschillende materialen werden gebruikt om deze opstelling te realiseren. Bij het hardware ontwerp werd er veelvuldig gebruik gemaakt van enkele elektronische componenten zoals condensatoren, relais, diodes en weerstanden. De functionaliteiten van deze componenten zullen later in dit eindwerk uitvoerig besproken worden. Andere belangrijke materialen die gebruikt werden, zijn hieronder beschreven.

- Arduino UNO

Arduino UNO, die zichtbaar is in figuur 1, is een *open-source* experimenteerbord dat ontwikkeld is door Arduino.CC. Dit bord is gebaseerd op de ATmega328p *microprocessor* en bevat naast 14 digitale input/output (I/O) pinnen ook 6 analoge ingangen. Het bord kan geprogrammeerd worden met behulp van de Arduino Integrated Development Environment via een *USB*-kabel. De voeding wordt verzorgd door de *USB*-poort van de computer (5V). Het is ook mogelijk om de *barrel jack* te gebruiken als een voedingsbron. In dit geval is het wel aangeraden om een spanningsniveau te hanteren tussen 7 en 12V. De interne regulator zal dit niveau automatisch omvormen tot 5V [4].



Figuur 1: Arduino UNO [4]

- Keithley 2000 multimeter met GPIB-USB controller

De verschillende parameters van de druksensoren moeten opgemeten worden door middel van een multimeter. In het labo van Melexis was de Keithley 2000 multimeter ter beschikking. Dit is een kwaliteitsmultimeter met een groot meetbereik en hoge nauwkeurigheid. Het DC-spanningsbereik varieert van 100 nV tot 1kV en het DC-weerstands bereik van 100 $\mu\Omega$ tot 100M Ω [5]. In figuur 2 is deze meettoestel zichtbaar. De Keithley 2000 multimeter ondersteunt ook de IEEE 488 of General Purpose Interface Bus (GPIB). Om dit meetinstrument te integreren in de software, wordt er gebruik gemaakt worden van de GPIB-controller van National Instruments [6].



Figuur 2: Keithley 2000 multimeter [5, p. 1]

- PCA9505 integrated circuit

De PCA9505 IC is een 40-bit parallel input/output poort expansie, speciaal ontworpen voor het aansturen via de I²C-bus. De 40 I/O poorten zijn opgedeeld in 5 delen, met elk 8 poorten. Elk poort kan op zijn beurt geprogrammeerd worden als een ingang of een uitgang waarbij de uitgangen bij 5V voedingsspanning 10 mA à 15 mA stroom kunnen leveren [7]. In deze toepassing wordt deze IC gebruikt om het grote aantal relais te schakelen op basis van de geprogrammeerde logica in Labview en Arduino.

- SN74ABT16244 integrated circuit

De SN74ABT16244 IC is een 16-bit parallel niet-inverterende buffer, speciaal ontworpen voor geheugen drivers, klok drivers en bus georiënteerde zenders en ontvangers. Afhankelijk van de gekozen mode, kan deze IC gebruikt worden als vier 4-bit buffer, twee 8-bit buffer of één 16-bit buffer. Deze buffer is in staat om grotere stromen (32/64 mA) te leveren dan de PCA9505 IC [8]. In deze toepassing wordt deze IC gebruikt om meerdere relais met één I/O aan te sturen en om bepaalde relais bij opstart aan te zetten.

- PTC-04 Programmer

De PTC-04 programmer is ontworpen door Melexis om de geïntegreerde schakelingen nauwkeurig te kalibreren. Deze programmer bevat zijn eigen regelbare spanningsbronnen en meetcircuits om bepaalde parameters uit te lezen. Door de ingebouwde flexibiliteit is het mogelijk om een dochterbord te schakelen tussen de programmer en de interface. Deze zorgt voor specifieke functionaliteiten die ingeschakeld kunnen worden in de verschillende toepassingen. Voor de druksensoren wordt er gebruik gemaakt van het PTC04-DB-PRESSURE01 dochterbord [9]. Het gebruik van de PTC-04 programmer en het bijhorende dochterbord is onontbeerlijk omdat de geïntegreerde sensoren niet gekarakteriseerd kunnen worden met een klassieke multimeter. In figuur 3 is deze programmer weergegeven.



Figuur 3: PTC-04 programmer [9, p. 1]

1.4.2 Methode

Om deze masterproef af te ronden, werd er een opsplitsing gemaakt tussen het hardware en software ontwerp. Specifieke stappenplannen werden gevolgd om deze onderdelen te kunnen vervolledigen. Het hardware ontwerp werd gedaan met behulp van Altium Designer. Dit is een programma dat gebruikt wordt bij Melexis voor het ontwerpen van PCB's. De software werd geprogrammeerd in de Labview omgeving van National Instruments. Er werd ook een beperkte code geschreven voor de Arduino UNO. De keuze van al deze tools was heel evident aangezien Melexis alle licenties ter beschikking had en het Product Verification departement er veel kennis over beschikte.

I. Hardware ontwerp

- a. **Schematics tekenen en componenten kiezen:** De elektronische schakelingen werden getekend om de logica van de HTOL-opstelling te implementeren. De benodigde componenten werden gelijktijdig gekozen op basis van de beschikbaarheden bij het bedrijf. Er werden ook enkele onderdelen besteld bij externe leveranciers.
- b. **Layouts tekenen:** Op basis van de schematics werden de layouts getekend van de chip, adapter en relaisborden. In deze fase werden de locaties van de componenten vastgelegd en een efficiënte routing van de printbanen gedaan.
- c. **Assembly PCB's:** De componenten werden gesoldeerd op de ontwikkelde PCB's. Alle chip-relais bordparen werden ook onderling verbonden met enkele flat cables. Hierna kon deze borden gestapeld worden om een modulair HTOL-systeem te creëren.
- d. **Testfase:** In de laatste fase werd er nagekeken of de PCB's geen defecten vertoonden. Testen met een multimeter werden uitgevoerd om na te gaan of alle verbindingen goed gelegd waren.

II. Software ontwerp

- a. **Stappenplan opmaken:** Vooraleer te beginnen aan de ontwikkeling van de software, moest er heel uitvoerig nagedacht worden over de architectuur die er geïmplementeerd kon worden. Er werd een stappenplan uitgewerkt om de software efficiënt te implementeren.
- b. **Ontwikkeling HTOL-setup software:** De software werd ontwikkeld om een welbepaalde chipbord uit te lezen. Dit kon gerealiseerd worden door de juiste relais te schakelen en de nodige instrumenten aan te spreken. De aansturing van het systeem werd gebaseerd op de seriële communicatie tussen de Labview-software en de Arduino.
- c. **Optimalisatie voor een variabel aantal borden:** Om het systeem flexibel te maken, werd de software geoptimaliseerd zodanig dat er tijdens een lopende meting nieuwe projecten aangemaakt kunnen worden en eventueel extra borden ingeplugd kunnen worden. De parameters worden per project geschreven naar een CSV-bestand.

- d. Testfase en integratie:** De testfase diende ervoor om de ontworpen software te verifiëren met de bijhorende hardware. Het systeem werd geëvalueerd aan de hand van enkele testsensoren en gecontroleerd op mogelijke bugs. In de laatste fase werd er een handleiding geschreven voor de operatoren.

2 Literatuuronderzoek

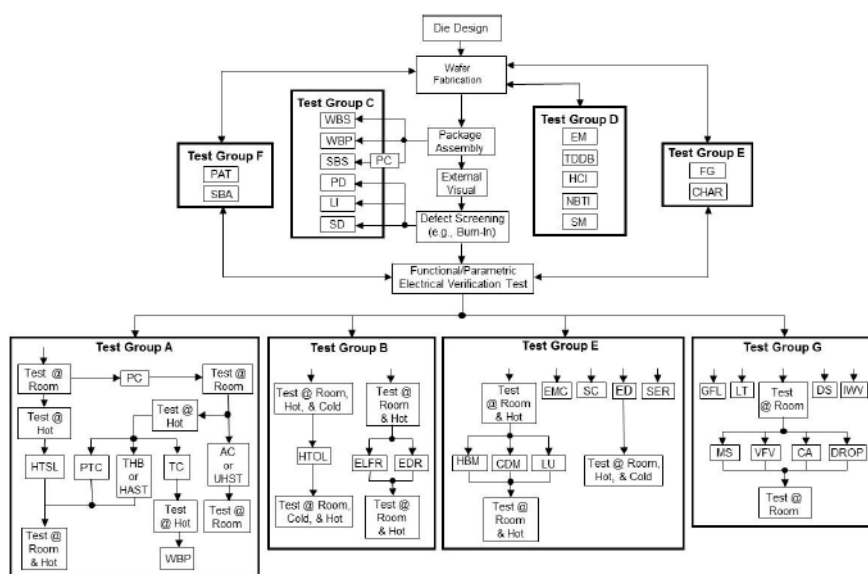
In dit hoofdstuk wordt een introductie gegeven over de betrouwbaarheidstesten van de geïntegreerde schakelingen. Hierbij wordt de nadruk gelegd op de “High-Temperature Operating Life”-test die de kern van deze thesis vormt. Volgend op dit onderdeel, worden de verschillende types druksensoren besproken die mogelijk onderworpen worden aan deze test. Hierna komen er hoofdstukken die aandacht besteden aan enkele technische aspecten die voorkomen in dit project. Er wordt achtergrondinformatie gegeven over het I2C-communicatieprotocol en de temperatuursensoren.

2.1 Stress test kwalificatie voor geïntegreerde schakelingen

Elke chip die ontworpen wordt door Melexis Technologies moet een aantal kwalificatietesten doorstaan alvorens deze in grote hoeveelheden geproduceerd kunnen worden om daarna te kunnen leveren aan de klanten. Het doel van deze stresstesten is de betrouwbaarheid van de producten te onderzoeken en te garanderen. Het is mogelijk om fouten op te sporen en/of het ontwerp te optimaliseren aan de hand van een kwalificatierapport zoals te zien in bijlage A [3, p. 30]. De testen die uitgevoerd moeten worden, worden beschreven in de standaarden van de Joint Electron Device Engineering Council en/of Automotive Electronics Council [2], [3].

2.1.1 Algemene testflow

Het testdiagram wordt weergegeven in figuur 4. Afhankelijk van het productieproces van de chip zullen welbepaalde testen van één of meerdere testgroepen uitgevoerd moeten worden. Het is op te merken dat niet alle testen binnen één testgroep uitgevoerd worden. Zo kan bijvoorbeeld het type verpakking een rol spelen bij het aantal uit te voeren testen binnen een groep. Er worden 7 verschillende testgroeperingen onderscheiden zoals te zien in tabel 1.



Figuur 4: Flow voor stresstesten [3, p. 9]

Tabel 1: Testgroeperingen van stresstesten [3, pp. 10-16]

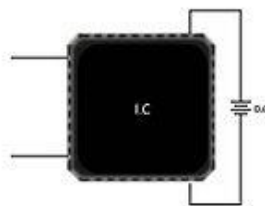
Testgroep	Benaming
A	Accelerated Environment Stress Tests
B	Accelerated Lifetime Simulation Tests
C	Package Assembly Integrity Tests
D	Die Fabrication Reliability Tests
E	Electrical Verification Tests
F	Defect Screening Tests
G	Cavity Package Integrity Tests

De standaarden speciëren bij elke test in een welbepaalde testgroep de criteria waarmee er rekening moet gehouden worden. Hierbij maakt men onderscheid tussen de “sample size”, het aantal “waferlots”, de acceptatiecriteria, de testmethode en de additionele vereisten [3, pp. 10-16]. De sample size bepaalt het aantal chips dat getest moet worden. Hiernaast wordt er ook gespecificeerd uit hoeveel waferlots deze moeten komen. Zowel het aantal chips als het aantal lots zijn typisch gekozen dat het kwalificatierapport statistisch relevant is en het proces gerelateerde afwijkingen niet meegenomen worden [3, p. 37]. De acceptatiecriteria omschrijven wanneer de test met succes afgerond is. Zo kan bijvoorbeeld de test maar bij 0 “fails” geaccepteerd worden terwijl andere bij 2 fails. Ten slotte wordt de testmethode gespecificeerd en mogelijke additionele vereisten vastgelegd. Extra nota’s bij een test kunnen verwijzen naar opmerkingen en uitzonderingen voor bepaalde geïntegreerde schakelingen. Zo zijn er ook een aantal testen die altijd uitgevoerd worden bij hermetisch en plastic verpakte IC’s. De electrostatic discharge test (ESD), de latch-up test (LU) en de electrical distribution test (ED) zijn voorbeelden ervan [3, p. 8]. De klant kan afhankelijk van zijn ervaring altijd extra testen aanvragen bij de producent, ook al is het niet vereist in de standaard.

2.1.2 High-Temperature Operating Life test (HTOL)

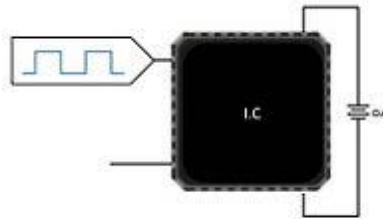
De HTOL of “High-Temperature Operating Life”-test is een test om de intrinsieke betrouwbaarheid van de geïntegreerde schakeling te onderzoeken en te karakteriseren. In dit onderzoek wordt de performantie van de chip geëxamineerd door deze schakeling gedurende een welbepaalde tijd te belasten met een maximumspanning en een hoge temperatuur. De examinatie gebeurt op vaste tijdsintervallen waarbij er bepaalde parameters van de chip opgemeten/opgevraagd worden. Afhankelijk van de geïntegreerde schakeling en het testdoel kunnen verschillende types HTOL testen onderscheiden worden [10]. Figuren 5,6,7 en 8 tonen de meest gebruikte methoden.

Statisch type: Het IC wordt constant belast.



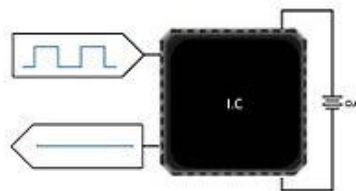
Figuur 5: Statisch HTOL type [10]

Dynamisch type: Het IC wordt getoggeled op basis van bepaalde input.



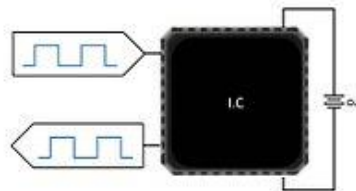
Figuur 6: Dynamisch HTOL type [10]

Monitored type: Het IC wordt getoggeled en real-time feedback wordt verkregen.



Figuur 7: Monitored HTOL type [10]

In-situ tested type: Het IC wordt getoggeled en reactief feedback wordt verkregen.



Figuur 8: In-situ tested HTOL type [10]

De HTOL-test hoort bij groep B nl. de Accelerated Lifetime Simulation Tests [3, p. 12]. In figuur 9 zijn de criteria ervan weergegeven. Hierbij kan men zien dat er telkens 77 samples vereist zijn uit 3 waferlots (in totaal 231 chips). De test wordt met succes afgerond als er geen enkele chip faalt na de lange HTOL-test. De testmethode wordt beschreven in JEDEC JESD22-A108 standaard [2]. De nota's verwijzen naar het feit dat de HTOL-test bestemd is voor hermetische, plastic en solder ball surface mount packaged devices. Er wordt ook een opmerking gegeven dat dit een destructieve test is. De chips mogen na de test niet meer opnieuw gebruikt worden voor eender welk doeleinde.

TEST GROUP B – ACCELERATED LIFETIME SIMULATION TESTS								
STRESS	ABV	#	NOTES	SAMPLE SIZE / LOT	NUMBER OF LOTS	ACCEPT CRITERIA	TEST METHOD	ADDITIONAL REQUIREMENTS
High Temperature Operating Life	HTOL	B1	H, P, B, D, G, K	77	3	0 Fails	JEDEC JESD22-A108	<p>For devices containing NVM, endurance preconditioning must be performed before HTOL per Q100-005.</p> <p>Grade 0: +150°C T_a for 1000 hours. Grade 1: +125°C T_a for 1000 hours. Grade 2: +105°C T_a for 1000 hours. Grade 3: +85°C T_a for 1000 hours.</p> <p>HTOL NOTES:</p> <p>1) HTOL stress times for the appropriate grade T_a are the min requirement; the T_j of the test (measured or calculated) should be available.</p> <p>2) T_j may be used instead of T_a when performing HTOL provided that T_j of the device under HTOL conditions is equal to or higher than the T_j maximum operating (T_{jopmax}) of the particular device, but below the absolute maximum T_j.</p> <p>3) If T_j is used to set the HTOL conditions, the minimum stress of 1000 hours at the T_a of the device is to be shown using activation energy of 0.7eV or other value technically justified.</p> <p>4) V_{ce} (max) at which dc and ac parametrics are guaranteed. Thermal shut-down shall not occur during this test. TEST before and after HTOL at room, cold, and hot temperature (in that order).</p>

Figuur 9: HTOL-test in AEC standaard [3, p. 12]

De duur en de temperatuur van de test hangt nauw samen met de verwachte gebruiksduur en de gebruikstemperatuur van de sensor. Uiteindelijk is het de bedoeling dat de HTOL-test de levensduur van de chip simuleert aan de hand van de temperatuur, de spanning en eventueel de dynamische toggeling. In de AEC-standaard wordt weergegeven dat 1393 uren HTOL-test overeenkomt met een gemiddelde levensduur van 15 jaren (of 12000 gebruiksuren) bij een gebruikstemperatuur van 87 °C. De richtlijn staat ook op 1000 uren indien er geen missieprofiel beschikbaar is. Deze relatie kan bepaald worden aan de van de Arrhenius-vergelijking [3, p. 40]:

$$A_f = \exp\left(\frac{E_a}{k_b} \cdot \left(\frac{1}{T_u} - \frac{1}{T_t}\right)\right)$$

Modelparameters:

$$k_b \text{ (Constante van Boltzmann)} = 8,61733 \cdot 10^{-5} \frac{eV}{K}$$

$$E_a \text{ (Activatie energie)} = 0,7eV - \text{typische waarde gebaseerd op faalmechanisme}$$

Stressparameter:

$$T_t \text{ (Junctie temperatuur in testomgeving)} = 398,15 \text{ K (= 125°C)}$$

Missieparameters (mission profile):

$$T_u \text{ (Gemiddelde junctie temperatuur in gebruiksomgeving)} = 360,15 \text{ K (= 87°C)}$$

$$t_u \text{ (Gemiddelde gebruiksduur)} = 12000 \text{ uren (bijv. over 15 jaren)}$$

De acceleratie factor A_f kan uitgerekend worden door de bovenstaande parameters in te vullen:

$$A_f = \exp\left(\frac{E_a}{k_b} \cdot \left(\frac{1}{T_u} - \frac{1}{T_t}\right)\right) = \exp\left(\frac{0,7 \text{ eV}}{8,61733 \cdot 10^{-5} \frac{\text{eV}}{\text{K}}} \cdot \left(\frac{1}{360,15 \text{ K}} - \frac{1}{398,15 \text{ K}}\right)\right) = 8,60787$$

De nodige testtijd t_t wordt uitgerekend door de gemiddelde gebruiksduur t_u te delen door de acceleratie factor A_f :

$$t_t = \frac{t_u}{A_f} = \frac{12000 \text{ uren}}{8,60787} = \mathbf{1394 \text{ uren}}$$

Het is op te merken dat de berekende testtijd iets hoger ligt dan wat de AEC-standaard oplegt (1000 uren bij geen mission profile). Dit betekent dat er een bepaalde verstrenging is wat betreft de testuren. Indien er een ander missieprofiel beschikbaar is, kunnen deze parameters ingevuld worden in de Arrhenius-vergelijking. De stressparameter kan ook verschillen afhankelijk van de testoven en het chip type. Alle metingen moeten zo snel mogelijk gebeuren in het begin, gedurende het interval en op het einde van de test. Op basis van deze metingen kunnen driftanalyses gedaan worden en de chips geëvalueerd worden. Indien er tijdsafwijkingen zijn, zal zich dit vertalen in extra testuren zoals opgelegd door de JEDEC JESD22-A108 [2, p. 5].

2.2 Druksensoren

De HTOL-test wordt bij Melexis gebruikt om de druksensoren te onderzoeken en te karakteriseren. Daarom is het belangrijk om een zicht te hebben op de producten van Melexis en de technologie achter de druksensoren. In dit hoofdstuk wordt er technische achtergrondinformatie gegeven over deze sensoren en enkele voorbeelden gegeven uit de MLX-gamma van Melexis.

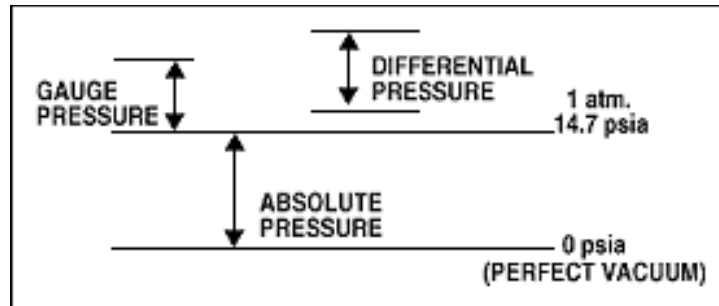
2.2.1 Drukmetingen

Een druksensor is een toestel om de druk van vloeistoffen en gasen te meten. Het is ook mogelijk om te spreken over een omvormer omdat een druksensor een conversie uitvoert. Deze zet de druk om in een ander, meestal elektrisch signaal dat makkelijk interpreteerbaar is door andere systemen. De druk wordt gedefinieerd als kracht per oppervlakte-eenheid en kan uitgedrukt worden in verschillende eenheden. De SI-eenheid van druk is Pascal (Pa) maar afhankelijk van de toepassing kunnen ook andere eenheden gebruikt worden. Zo wordt bar en atmosfeer (atm) ook vaak gebruikt [11].

Het is belangrijk om op te merken dat er verschillende types druksensoren onderscheiden kunnen worden op basis van de type drukmeting dat deze toestellen doen. In figuur 10 zijn drie verschillende drukmetingen weergegeven [11].

- Een *absolute druksensor* doet een drukmeting relatief t.o.v. het perfecte vacuüm. Voorbeelden hiervan zijn toestellen die de atmosferische druk opmeten.
- Een *differentiële druksensor* meet een druk relatief t.o.v. een ander druk.

- Een *relatieve druksensor (gauge pressure sensor)* doet een drukmeting relatief t.o.v. de atmosferische druk (= 1 atm). Een sensor die de bandenspanning controleert, is een voorbeeld ervan. De druk in de band wordt relatief gemeten ten opzichte van de atmosferische druk.



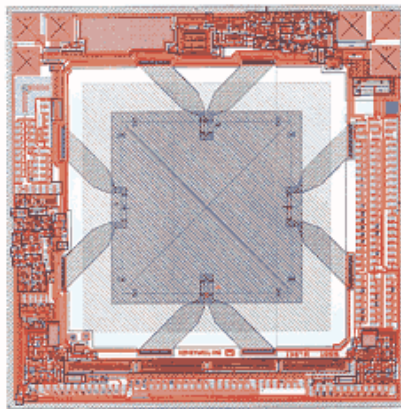
Figuur 10: Drie type drukmetingen [11]

2.2.2 Druksensor technologie

De druksensoren kunnen ook onderscheiden worden op basis van de technologie die erachter schuilt. Er wordt een onderscheid gemaakt tussen twee belangrijke aspecten van de sensor: de force collector en de transducer. De druk moet op één of ander manier opgevangen worden in de collector (zoals met de Bourdon-buis, capsule, diafragma..). Deze zal afhankelijk van de gekozen techniek een verandering teweegbrengen die opgemeten kan worden. Deze laatste is het transducer-principe van de sensor die voor een omzetting zorgt [12]. Er bestaan ook sensoren die niet het pure force collector principe gebruiken. Deze vallen terug op andere eigenschappen om de druk te bepalen [13]. Er zijn tientallen technieken die gebruikt worden in de druksensoren. In de onderstaande lijst worden er enkele veelgebruikte soorten weergegeven en een beknopte verklaring gegeven [11]. Het is niet de bedoeling om in detail te treden, maar om een algemeen overzicht te geven.

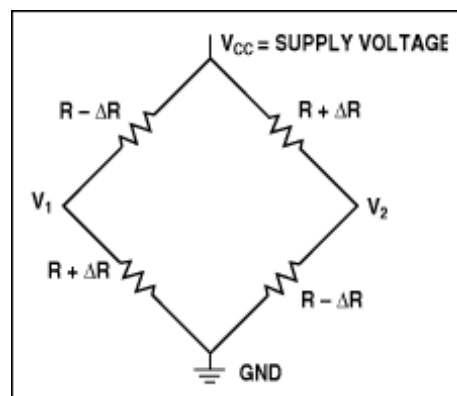
- Een *potentiometrische druksensor*: Deze sensor maakt gebruik van een veer op een resistief element of een potentiometer. Door de druk zal deze veer bewegen en resulteren in een specifieke spanningsdeling die opgemeten kan worden.
- Een *inductieve druksensor*: De variatie in de inductantie of de inductieve koppeling wordt gebruikt om de druk te karakteriseren.
- Een *capacitieve druksensor*: Een variabele condensator wordt typisch gevormd met behulp van een diafragma. Het diafragma vormt één zijde van de condensator. De druk zorgt voor de afbuiging van het diafragma dat op zijn beurt de capaciteit beïnvloedt. De waarde van de condensator kan gerelateerd worden met de druk.
- Een *piezoelektrische druksensor*: Deze sensor gebruikt het piezoelektrische effect in bepaalde materialen om de druk te bepalen. Deze elementen zijn in staat om spanning (ten gevolge van druk) te vertalen in een elektrische potentiaal en omgekeerd. Typisch worden hiervoor kwarts en keramische materialen gebruikt. Het is wel belangrijk om op te merken dat dit effect enkel zichtbaar is als de input verandert. Juist daarom worden deze sensoren gebruikt in hoog dynamische drukmetingen.

- Een *piezoresistieve druksensor*: Deze sensor maakt gebruik van het piezoresistieve effect (op rekstrookjes) om de druk te bepalen. Dit effect stelt dat de elektrische weerstand verandert ten gevolge van de spanning die over het materiaal aangelegd wordt. Deze relatie wordt gebruikt om de druk te karakteriseren. Deze variabele weerstanden worden meestal in een Wheatstone brug configuratie aangesloten om de sensitiviteit voor fouten te verminderen en het uitleesmechanisme te vergemakkelijken [13]. Dit type sensor wordt vaak gebruikt in de halfgeleiderindustrie (o.a. bij Melexis) waarbij de rekstrookjes worden geïntegreerd in het silicium diafragma. In figuur 11 is een IC te zien waarbij vier piezo-elementen zijn gevormd op het siliciumoppervlak.



Figuur 11: Diafragma met 4 piezoweerstanden [11]

Wanneer het diafragma vervormt, zorgt dit voor tangentiële of radiale spanningen op bepaalde piezoweerstanden die in Wheatstone-brugconfiguratie met elkaar verbonden zijn, zoals te zien is in figuur 12. Deze spanningen zorgen ervoor dat deze zich vertalen in positieve of negatieve weerstandsveranderingen ΔR . Deze weerstandsveranderingen vertalen zich op hun beurt in elektrische spanningsveranderingen over de weerstanden die makkelijk opgemeten kunnen worden met een nauwkeurige spanningsmeter. De opgemeten spanning V_{OUT} karakteriseert de druk die op het diafragma wordt uitgeoefend.



Figuur 12: Wheatstone-brugconfiguratie van 4 piezoweerstanden [11]

$$\frac{V_{OUT}}{V_{CC}} = \frac{\Delta R}{R} \text{ waarbij } V_{OUT} = V1 - V2$$

Tegenwoordig wordt de MEMS-technologie veelvuldig gebruikt om de druksensoren te vervaardigen (> 90%). De piezoresistieve en de capacitieve methode zijn de meest gebruikte sensortechnieken in deze sensoren. De reden voor het gebruik van MEMS-technologie is het feit dat er veel voordelen aan verbonden zijn aan deze manier van vervaardiging. De piezoresistieve MEMS-druksensoren hebben typisch een kleine verpakking, een lage kost en een hoge sensitiviteit [12].

2.2.3 Melexis gamma

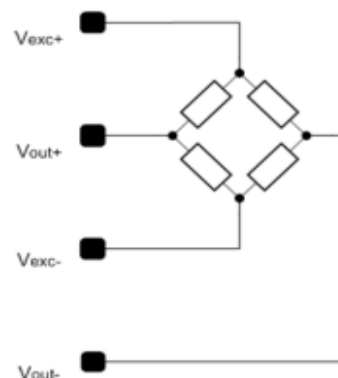
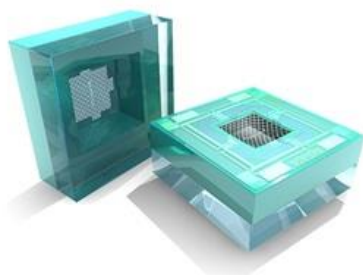
De druksensoren kunnen onderscheiden worden op basis van het type drukmeting en de druksensor technologie zoals besproken in de voorgaande paragrafen. Bij de karakterisatie van de halfgeleider druksensoren wordt er bij Melexis een andere onderverdeling gemaakt. Er wordt een onderscheid gemaakt tussen de discrete en de geïntegreerde druksensoren. Het is namelijk heel belangrijk om te weten welk type druksensor er getest wordt zodanig dat er juiste parameters opgevraagd en/of opgemeten kunnen worden door middel van correcte instrumenten.

2.2.3.1 Discrete druksensoren

In figuur 13 is de MLX90816 discrete druksensor weergegeven. Dit is een hoog accurate absolute sensor die een meetbereik heeft tussen 0 en 50 bar. De druksensor technologie is gebaseerd op de piezoresistiviteit zoals uitgelegd in het vorige deel [14]. De discrete sensoren zijn kenmerkend micromachined MEMS-sensoren waarbij de piezo-elementen in Wheatstone-brugconfiguratie zijn aangesloten. Deze vorm van sensor heeft typisch 4 verbindingen: Vexc+ (of VDD), Vexc- (of GND), Vout+ (of INP) en Vout- (of INM). Bij de HTOL-test worden deze type chips gekarakteriseerd door middel van enkele spanningsmetingen die gemeten worden door een multimeter. Aan de hand van deze metingen kan men nagaan hoe de druksensor functioneert tijdens de HTOL-test. In tabel 2 zijn deze metingen weergegeven.

Tabel 2: Mogelijke karakterisatiemetingen voor discrete sensoren

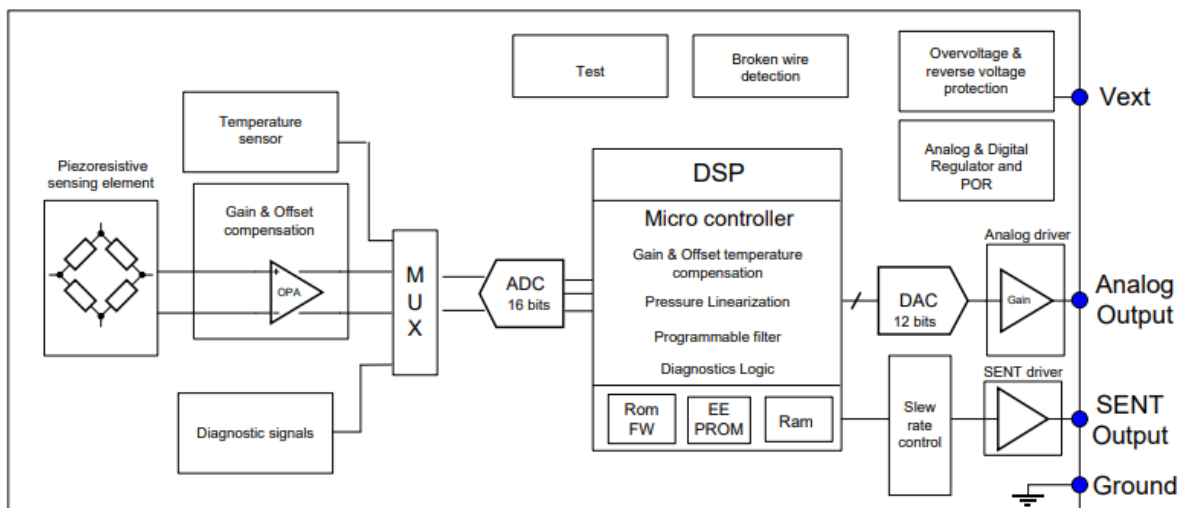
Differentiele spanningsmeting	$V_{DIFF/OUT} = V_{OUT+} - V_{OUT-}$
INM spanningsmeting	$V_{INM} = V_{OUT-} - V_{EXC-}$
INP spanningsmeting	$V_{INP} = V_{OUT+} - V_{EXC-}$
Voedingsspanningsmeting	$V_{SUPPLY} = V_{EXC+} - V_{EXC-}$



Figuur 13: MLX90816 discrete druksensor [14, p. 1]

2.2.3.2 Geïntegreerde druksensoren

De geïntegreerde sensoren gaan een stapje verder. Naast het piezoresistieve sensing element, worden er ook andere onderdelen voorzien zoals een microcontroller, spanningsregelaars en een ADC/DAC. Er wordt hier typisch gesproken over “fully integrated” IC waarbij er onderscheid gemaakt wordt tussen het MEMS en het CMOS-gedeelte. Deze type sensoren kunnen niet enkel gekarakteriseerd worden met behulp van een multimeter. Er wordt bij Melexis gebruik gemaakt van de PTC-04 programmer om bepaalde parameters op te meten en/of op te vragen. Merk op dat deze programmer niet het enige toestel is om deze sensoren te kunnen uitlezen. In figuur 14 is de schematische voorstelling van MLX90809 geïntegreerde, relatieve druksensor weergegeven. Er wordt duidelijk opgemerkt dat er niet enkel een discrete Wheatstone brug (piezo resistieve sensing element) aanwezig is. Zo worden er ook blokken voorzien voor gain, offset en temperatuur compensaties in samenwerking met een ADC/DAC en een microcontroller. Als output wordt er een analog (Aout) en digitaal (SENT) signaal voorzien [15].



Figuur 14: MLX90809 geïntegreerde druksensor [15, p. 2]

Figuur 14 illustreert dat de signalen van Wheatstone brug niet als dusdanig gebruikt worden. Er is een tussenkomst van een microcontroller en de bijhorende ADC/DAC. Juist daarom worden deze sensoren op een andere manier gekarakteriseerd. Deze vorm van sensor heeft kenmerkend 6 verbindingen: Vext (of VDD), GND, Aout, TX (of SENT), Must en TMLX. Sommigen hebben additioneel nog een sense lijn voor de ground nl. GND-ref en een NTC-pin. Het is ook mogelijk dat er bepaalde pinnen ontbreken. Er wordt hier een onderscheid gemaakt tussen de applicatie- en de testmodus. Bij elk van deze modi kunnen specifieke parameters opgemeten of opgevraagd worden zoals weergegeven in tabel 3 en 4. Het voorvoegsel “multimeter” wijst erop dat deze meting gedaan wordt met behulp van de multimeter terwijl PTC wijst op het gebruik van de PTC-04 programmer. Soms is het mogelijk om beide te gebruiken. Dit komt door het feit dat de PTC-04 programmer ook analoge spanningen kan opmeten maar de nauwkeurigheid en de resolutie is lager dan die van een kwaliteitsmultimeter zoals Keithley 2000 [9, p. 6].

Merk op dat de sensor standaard in de applicatiemodus terecht komt wanneer deze gevoed wordt. De outputs TX en AOUT kunnen dan gebruikt worden om de sensor te karakteriseren. Om in testmodus over te gaan, moet men gebruik maken van de testpin must. Met deze pin kan men communiceren met de chip en instellingen doorgeven om bepaalde spanningen of waarden uit te lezen. Zo is het mogelijk om bijvoorbeeld analoge spanningen van de Wheatstone brug op TX,TMLX of Aout pinnen te zetten die daarna opgemeten kunnen worden met een multimeter of een PTC-04. Er kunnen ook interne registers opgevraagd worden via de digitale TX of TMLX pinnen

Applicatiemodus

Tabel 3: Mogelijke karakterisatiemetingen voor applicatiemodus

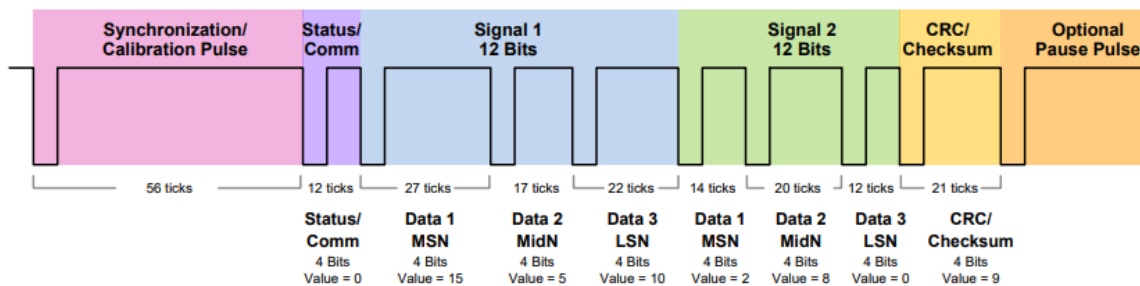
Instrument	Pin	Type
Multimeter (of PTC)	Aout	analoog
PTC	Tx (of SENT)	digitaal

Testmodus

Tabel 4: Mogelijke karakterisatiemetingen voor testmodus

Instrument	Pin	Type
Multimeter (of PTC)	Tx (of SENT)	analoog
Multimeter (of PTC)	TMLX	analoog
Multimeter (of PTC)	Aout	analoog
PTC	Tx (of SENT)	digitaal
PTC	TMLX	digitaal

Indien een geïntegreerde sensor over een digitale SENT uitgang beschikt, kan deze sensor eenvoudig gekarakteriseerd worden door gebruik te maken van deze pin (applicatiemodus). Deze maakt gebruik van het Single Edge Nibble Transmission (SENT) protocol waarbij de gegevens in verschillende nibbles (4 bits) worden overgedragen. De gegevens kunnen zowel in fast als slow channel overgedragen worden. In figuur 15 wordt een overzicht van een fast channel transmissie weergegeven. Zo is het te zien dat er 2 signalen van 12 bits (bijvoorbeeld druk en temperatuur) worden gezonden. Het is belangrijk om op te merken dat dit protocol werkt met een tijdseenheid nl. tick time. Het aantal ticks bepaalt de exacte waarde van de nibble [16].



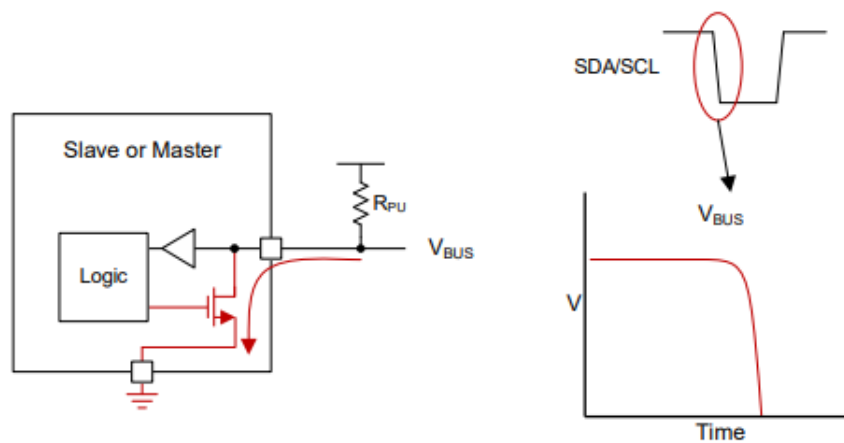
Figuur 15: Fast channel SENT message [16, p. 1]

2.3 I2C-communicatieprotocol

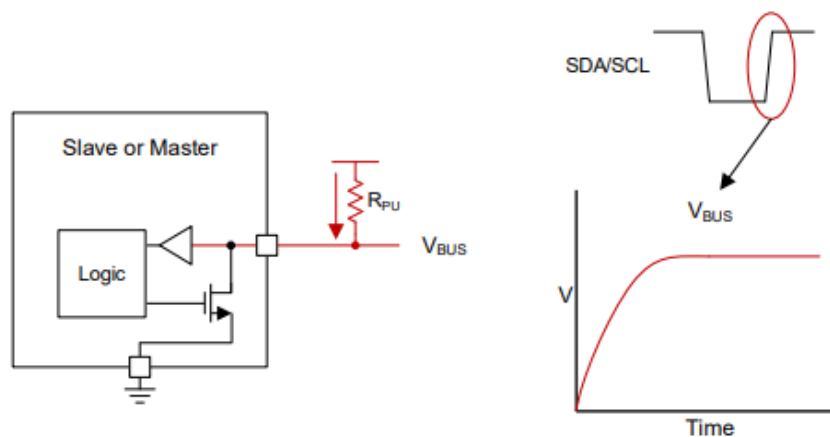
Het stuurmechanisme van het HTOL-systeem is gebaseerd op het I2C-protocol. In de literatuurstudie wordt er daarom aandacht besteed om deze protocol te beschrijven. In dit hoofdstuk zal een introductie gegeven worden over de werking van het protocol en de stappen die gezet zijn om een stabiele en robuuste configuratie te verzekeren met de bijhorende pull-up weerstanden.

2.3.1 Open drain topologie

Het I2C-communicatieprotocol bestaat uit 2 bidirectionele signaallijnen: SDA en SCL. Het kloksignaal (SCL) wordt normaal verzorgd door de bus-master terwijl de datasignaal (SDA) zowel door de master als door de slave gecontroleerd kunnen worden. In uitzonderlijke situaties kan de SCL-lijn ook beïnvloed worden door de slave d.m.v. clock stretching [17]. Het I2C-protocol gebruikt een open drain topologie. Dit betekent dat de master of de slave de communicatielijnen enkel omlaag kunnen halen en niet hoog kunnen zetten. Juist daarom is het noodzakelijk om pull-up weerstanden te voorzien op de SDA en SCL lijnen [18, p. 2]. Figuur 16 toont de werking van het omlaaghalen waarbij de master of de slave de SDA/SCL-lijn naar de grond trekt via de transistor. Figuur 17 toont dat de lijn terug omhoog getrokken wordt via de pull-up weerstand die zich bevindt tussen de SDA/SCL-lijn en de voeding.



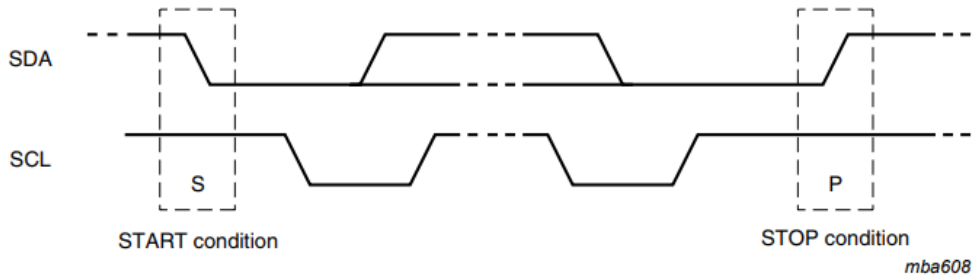
Figuur 16: Het omlaaghalen van de SCL/SDA-lijn [18, p. 2]



Figuur 17: Het omhooghalen van de SCL/SDA-lijn [18, p. 3]

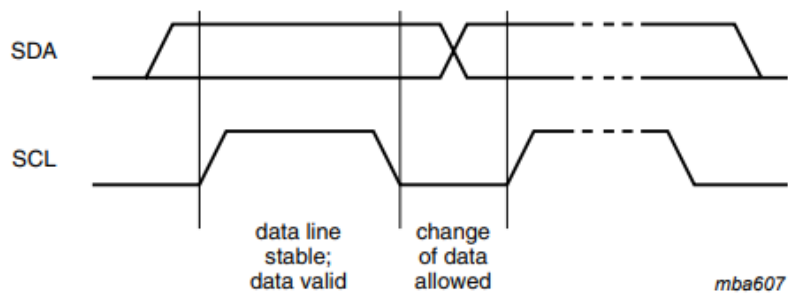
2.3.2 Signalen

Om de communicatie te laten starten moet de start conditie gegeven worden. Dit gebeurt wanneer de datalijn van hoog naar laag gaat en de kloklijn hoog blijft. De stop conditie wordt verkregen wanneer er juist het tegenovergestelde gebeurt. De datalijn gaat van laag naar hoog terwijl de kloklijn hoog blijft [7]. In figuur 18 zijn deze condities weergegeven. Merk op dat de beide communicatielijnen hoog blijven wanneer de I2C-bus niet gebruikt wordt.



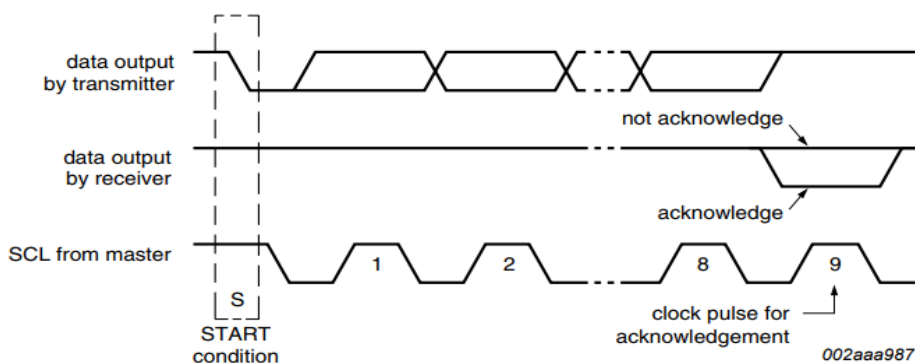
Figuur 18: De start en stop conditie van de I2C-bus [7, p. 14]

Elke bit wordt overgedragen gedurende één klokpuls. De datalijn kan enkel veranderen als de kloklijn laag is [7].



Figuur 19: De dataoverdracht bij de I2C-bus [7, p. 14]

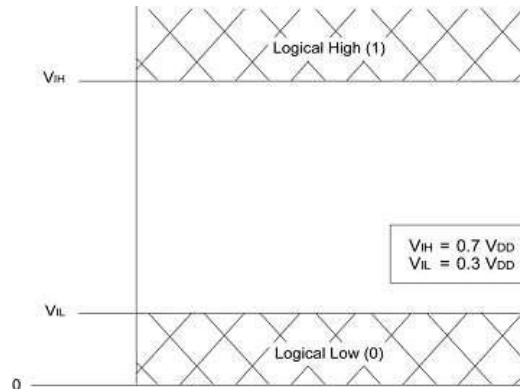
Het I2C-communicatieprotocol legt geen limiet op aantal bytes die verzonden worden tussen de start en de stop conditie. Elk byte wordt gevolgd door een acknowledge bit. De master transmitter zorgt voor een extra klokpuls terwijl de slave receiver de datalijn naar omlaag haalt voor ACK [7].



Figuur 20: Het acknowledge-mechanisme van de I2C-bus [7, p. 15]

2.3.3 Keuze pull-up weerstanden

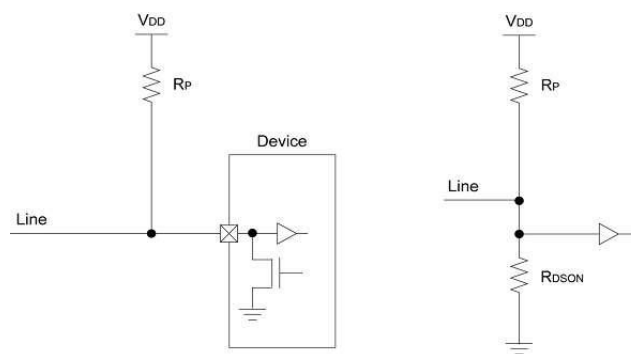
De keuze van de pull-up weerstanden hangen af van drie factoren: de voedingspanning (V_{DD}), de totale bus capaciteit (C_{BUS}) en totale high level input stroom (I_{IH}). Het I2C-protocol interpreteert een signaal laag als dit lager is dan V_{IL} en hoog als dit hoger is dan V_{IH} . Alle waarden die tussen deze twee spanningsniveaus liggen, zijn onbepaald. Typisch is V_{IL} 30% van de voedingspanning terwijl V_{IH} 70% van de voedingspanning is [19]. In figuur 21 zijn deze niveaus weergegeven.



Figuur 21: De spanningsniveaus voor een hoog en laag signaal [19]

2.3.3.1 Voedingspanning (V_{DD})

De voedingspanning limiteert de minimale waarde van de pull-up weerstanden. Zoals te zien in figuur 22, ontstaat er in feite een spanningsdeling tussen de pull-up weerstand en de transistor wanneer de slave of master de lijn omlaag wil halen. Een te lage pull-up weerstand zal zorgen dat de lijn niet voldoende omlaaggehaald kan worden. Vaak is $R_{DS(ON)}$ van de transistor niet gespecificeerd in het datasheet van de I2C-device. Elk I2C-device specificeert wel een maximum spanningsval V_{OL} over de transistor bij een maximale sink stroom I_{OL} [19]. Voor de PCA9505 is dit gelijk aan 0.4V bij een stroom van 20mA [7, p. 21]. Voor de Arduino UNO (ATmega328P) is dit gelijk aan 0.55V bij een stroom van 20mA [20, p. 390]. De voedingspanning is gelijk aan 5V.



Figuur 22: Het equivalent circuit van een open drain driver [19]

De minimale weerstandswaarde kan bepaald worden door middel van de volgende vergelijking. Indien de sink stromen verschillen per device, wordt de minimale weerstandswaarde $R_{P(MIN)}$ gekozen op basis van de laagste sink stroom I_{OL} .

$$R_{P(MIN)} = \frac{V_{DD} - V_{OL}}{I_{OL}} = \frac{5V - 0,4V}{0,020A} = 230 \Omega$$

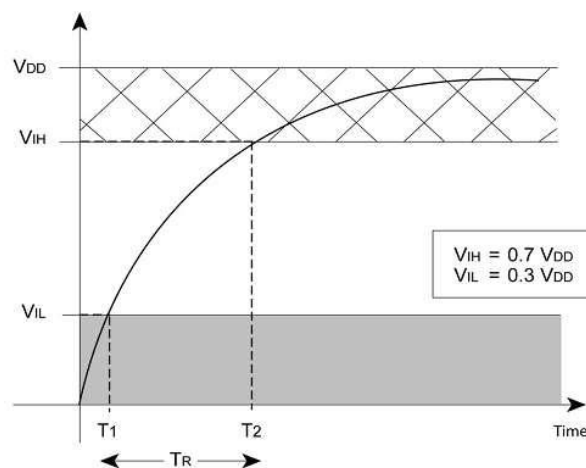
2.3.3.2 Bus capaciteit (C_{BUS})

De totale bus-capaciteit speelt een belangrijke rol wanneer de pull-up weerstand de lijn omhoog moet halen. Omwille van deze capaciteit kan de lijn niet ogenblikkelijk omhooggehaald worden. De pull-up weerstand en de bus-capaciteit vormen een RC-kring. Een te hoge pull-up weerstand zal zorgen dat de lijn niet snel genoeg omhooggehaald kan worden omwille van de te grote RC-constante. Bij hogere frequenties speelt dit een cruciale rol omdat de stijgtijd dan veel korter is. Merk op dat de totale bus-capaciteit niet enkel door de pinnen bepaald wordt, maar ook de PCB-banen, die een niet-verwaarloosbare capaciteitswaarde hebben [19].

Om de maximale pull-up weerstand te bepalen, wordt er vertrokken van de vergelijking van het laden van een capaciteit door een weerstand. Figuur 23 toont dit laadmechanisme waarbij de begintijd t_1 en de eindtijd t_2 gekozen worden op basis van twee spanningsniveaus nl. $0.3 * V_{DD}$ en $0.7 * V_{DD}$.

Algemene vergelijking: $V(t) = V_{DD} * (1 - e^{-\frac{t}{RC}})$

Herleiding naar t: $t = -RC * \ln(1 - \frac{V(t)}{V_{DD}})$



Figuur 23: De laadcurve van de capaciteit door een weerstand [19]

Een algemene formule wordt afgeleid voor de tijden t_1 en t_2 door de bijhorende spanningsniveaus in te vullen in de vergelijking en de stijgtijd T_r te bepalen.

Voor $0.3 * V_{DD}$ is dit gelijk aan: $t_1 = 0.3566749 \times RC$

Voor $0.7 * V_{DD}$ is dit gelijk aan: $t_2 = 1.2039729 \times RC$

Stijgtijd $T_r = t_2 - t_1 = 0.8473 \times RC$

In het datasheet van de I2C-communicatieprotocol wordt er gespecificeerd wat de maximale stijgtijd moet zijn voor de verschillende modi. Voor de standaard modus is dit gelijk aan 1000 ns terwijl voor de fast modus is dit gelijk aan 300 ns [21, p. 48]. Indien de bus capaciteit gelijk is aan 400 pf, kan de maximale weerstandswaarde als volgt uitgerekend worden voor de standaard modus:

$$R_{P(MAX)} = \frac{T_r}{0.8473 * C} = \frac{1000ns}{0.8473 * 400pf} = 2950 \Omega$$

2.3.3.3 High level input stroom (I_{IH})

De digitale inputs van de I2C-devices hebben een bepaalde leakage current. Wanneer de SDA of SCL-lijn hoog is, loopt er daarom nog altijd een kleine stroom door de pull-up weerstanden. Deze leakage stroom limiteert de maximale pull-up waarde omdat de logische 1 altijd boven de V_{IH} moet blijven [19]. Vaak wordt er ook een marge genomen boven de V_{IH} . Dit is typisch gelijk aan $0.2 * V_{DD}$. De maximale leakage current voor de PCA9505 en de Arduino UNO zijn beschreven in de datasheets en zijn beide gelijk aan $1\mu A$ [7, p. 21], [20, p. 366]. De totale high level input stroom I_{IH} kan uitgerekend worden door de som te maken van alle leakage currents. Voor 10 devices is dit gelijk aan $10\mu A$.

$$R_{P(MAX)} = \frac{V_{DD} - (V_{IH} + V_{MARGE})}{I_{IH(totaal)}} = \frac{5V - (3.5V + 1V)}{10\mu A} = 50\text{ k}\Omega$$

2.3.3.4 Weerstands-range

Op basis van de vorige vergelijkingen kan er een geschikte pull-up weerstand gekozen worden. Rekening houdend met de bovengrens, kan deze weerstand voldoende hoog gekozen worden om zo de vermogendissipatie te verminderen en een stabiele werking te verzekeren met de open drain drivers. Voor Arduino UNO wordt een pull-up weerstand aangeraden vanaf 1000Ω .

$$R_{P(MIN)} < R < R_{P(MAX)}$$

2.4 Temperatuurmetingen

De temperatuurmetingen zijn cruciaal omdat de HTOL-testen gebaseerd zijn op deze parameter. Juist daarom moet de temperatuur van verschillende borden in de oven geregistreerd worden. In dit hoofdstuk wordt een overzicht gegeven van de belangrijkste technieken om de temperatuur te meten.

2.4.1 Halfgeleider gebaseerde sensoren

Voor eenvoudige temperatuurmetingen kan er gebruik gemaakt worden van halfgeleider gebaseerde temperatuursensoren. Deze type sensoren hebben vaak een lineaire karakteristiek in een beperkt temperatuur gebied (-40 tot $120/150\text{ }^\circ\text{C}$), een lage nauwkeurigheid (1 tot $5\text{ }^\circ\text{C}$) en een lage kostprijs. De meeste sensoren zijn gebaseerd op de temperatuur afhankelijke I-V karakteristiek van de diode. Wanneer twee transistoren werken op dezelfde verhoudingen van collector stroomdichtheden, dan kan de absolute temperatuur gerelateerd worden tot het verschil van basis-emitter spanningen. Op basis van deze spanning kan er dan een bepaalde output gegeven worden [22].

De DS18B20 temperatuur sensor is een courante halfgeleider gebaseerde sensor. Deze sensor maakt gebruik van een 1-Wire interface waarbij er maar één communicatielijn nodig is. De 9 tot 12 bit (afhankelijk van de gekozen resolutie) digitale data representeert de opgemeten temperatuur. De maximale meting is beperkt tot 125°C . Verschillende sensoren kunnen ook aangesloten worden op dezelfde bus. Dit is mogelijk gemaakt door elke DS18B20 een unieke 64-bit code toe te kennen [23].

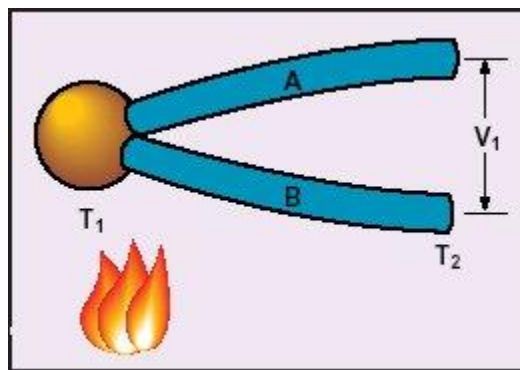
2.4.2 Thermistor

Een thermistor is een sensor waarbij de weerstand varieert op basis van de temperatuur. Er worden twee types onderscheiden. Bij een NTC thermistor wordt er een weerstandsvaling waargenomen bij

een temperatuurstijging terwijl bij een PTC thermistor wordt er een weerstandsstijging waargenomen. Het is op te merken dat er enkele fundamentele verschillen zijn met de resistance temperature detectors of RTD's die ook gebaseerd zijn op dezelfde weerstandveranderingsprincipe. De RTD's bestaan uit pure metalen terwijl de thermistoren meestal bestaan uit keramische materialen of polymeren. Een thermistor heeft typisch een temperatuurbereik dat veel beperkter is (260 °C) en hij heeft een niet-lineaire karakteristiek [24].

2.4.3 Thermokoppel

Een thermokoppel bestaat uit 2 verschillende geleiders die met elkaar verbonden zijn in één punt. In figuur 24 is een schematische overzicht weergegeven. Het sensing element is de verbinding van twee metalen T1 en de meting wordt gedaan op T2. Deze worden respectievelijk "hot" en "cold junction" genoemd. De cold junction wordt gehouden op een referentie temperatuur en wordt aangesloten op de spanningsmeter. Wanneer de hot junction opgewarmd wordt zal dit leiden tot een spanningsval V_1 die opgemeten kan worden. Op basis van dit thermo-elektrisch effect kan de temperatuur op de hot junction bepaald worden door gebruik te maken van de opgemeten spanning en de referentie temperatuur op de cold junction [24].

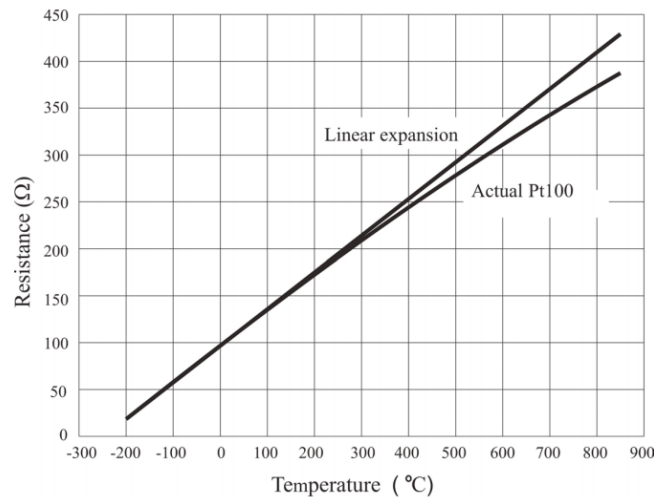


Figuur 24: Thermokoppel met hot en cold junction [24]

Er kunnen verschillende thermokoppels onderscheiden worden op basis van de gebruikte legeringen. Elk legeringscombinatie wordt omschreven met een letter (B, E, J, K, R, S, T, en N) en heeft een specifieke bereik en nauwkeurigheid. De thermokoppel wordt gekenmerkt door grote meetbereik maar lage nauwkeurigheid (1 tot 5 °C) [24].

2.4.4 Resistance temperature detector

De resistance temperature detector (RTD) is net zoals een thermistor, een element waarbij zijn weerstand varieert met de temperatuur. De RTD's zijn meestal gemaakt van koper, nikkel of platina. De beste RTD's zijn gemaakt van platina omwille van betere lineariteit en stabiliteit. Hoewel RTD's redelijk duur zijn tegenover de andere type temperatuursensoren, bieden deze type sensoren de hoogste nauwkeurigheden in een effectief groot meetbereik [24]. De accurate karakteristiek tussen de weerstand en de temperatuur wordt gebruikt om de temperatuur te bepalen. De Pt100-curve is redelijk lineair, maar op hogere temperaturen neemt de lineariteit af zoals te zien in figuur 25 [25].



Figuur 25: De weerstand-temperatuur curve van Pt100 [25, p. 347]

De meest bekende RTD's zijn Pt100 en Pt1000. Deze zijn gemaakt van platina en zijn gekalibreerd op respectievelijk 100 ohm en 1000 ohm bij 0 °C. Afhankelijk van de gebruikte platina kwaliteit kan de RTD gekarakteriseerd worden door middel van de α -coëfficiënt, die de genormaliseerde helling tussen 0 en 100 °C weergeeft [26].

$$\alpha = \frac{R_{100} - R_0}{100^\circ\text{C} * R_0} \text{ waarbij } R_0 = \text{weerstand op } 0^\circ\text{C}$$

waarbij R_{100} = weerstand op 100°C

Typisch is deze α -waarde gelijk aan $3,85 * 10^{-3} \Omega/(\Omega \cdot ^\circ\text{C})$. Dit betekent dat de weerstandswaarde gemiddeld 0,385 ohm verandert per graad Celsius tussen 0 en 100 °C. De relatie tussen de weerstand en temperatuur wordt accurater beschreven met behulp van de Callendar-Van Dusen vergelijkingen [26]. Door de weerstandswaarde R in te vullen in de vergelijking kan de bijhorende temperatuur bepaald worden.

Voor $t > 0^\circ\text{C}$: $R = R_0 (1 + At + Bt^2)$

Voor $t < 0^\circ\text{C}$: $R = R_0 (1 + At + Bt^2 + C (t - 100) t^3)$

Voor Pt100 met een α -waarde gelijk aan $3,85 * 10^{-3} \Omega/(\Omega \cdot ^\circ\text{C})$ zijn deze coëfficiënten volgens IEC751/ITS90 standaard gelijk aan:

$$A = 3.9083 \cdot 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$$

$$B = -5.775 \cdot 10^{-7} \text{ } ^\circ\text{C}^{-2}$$

$$C = -4.183 \cdot 10^{-12} \text{ } ^\circ\text{C}^{-4}$$

De toleranties of fouten op temperatuur worden beschreven door middel van verschillende klassen. Voor IEC751/ITS90 zijn deze toleranties opgesplitst in 2 klassen zoals weergegeven in tabel 5 en 6.

Tabel 5: Tolerantieklassen voor IEC751/ITS90 [27, p. 3]

Klasse	Tolerantie in °C
A	$0,15 + 0,002 T $
B	$0,30 + 0,005 T $

Tabel 6: Toleranties voor verschillende temperaturen klasse A en B - IEC751/ITS90 [27, p. 3]

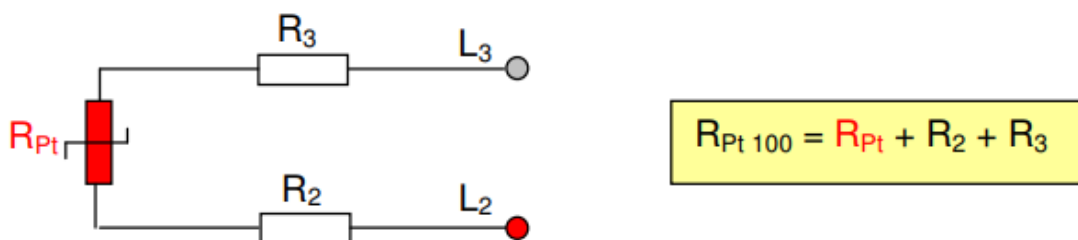
Temperature (°C)	Tolerance			
	Class A		Class B	
	(± °C)	(± Ω)	(± °C)	(± Ω)
-200	0.55	0.24	1.3	0.56
-100	0.35	0.14	0.8	0.32
0	0.15	0.06	0.3	0.12
100	0.35	0.13	0.8	0.30
200	0.55	0.20	1.3	0.48
300	0.75	0.27	1.8	0.64
400	0.95	0.33	2.3	0.79
500	1.15	0.38	2.8	0.93
600	1.35	0.43	3.3	1.06
650	1.45	0.46	3.6	1.13
700	-	-	3.8	1.17
800	-	-	4.3	1.28
850	-	-	4.6	1.34

Weerstandsmetingen

Om de temperatuur met grote nauwkeurigheid te bepalen, moet de variabele weerstand met veel precisie en nauwkeurigheid opgemeten worden. Voor Pt100 verandert de weerstandwaarde maar met een tiende per graad Celsius terwijl voor Pt1000 is dit een factor 10 groter. Er bestaan verschillende technieken om de weerstandwaarde te bepalen met behulp van een weerstandsmeter. Deze meter stuurt een kleine stroom en meet de bijhorende spanning op. Op basis van de wet van Ohm kan de weerstandwaarde bepaald worden.

Een weerstandmeting volgens het 2-wire principe, zoals te zien in figuur 26, wordt enkel gebruikt wanneer de meting niet accuraat moet gebeuren. Door dit meetprincipe wordt naast de Pt100 ook de weerstandwaarden van de draden opgemeten. Dit resulteert in een hogere waarde, wat op zijn beurt tot foutieve temperatuurmetingen kan leiden [28].

2-wire connection

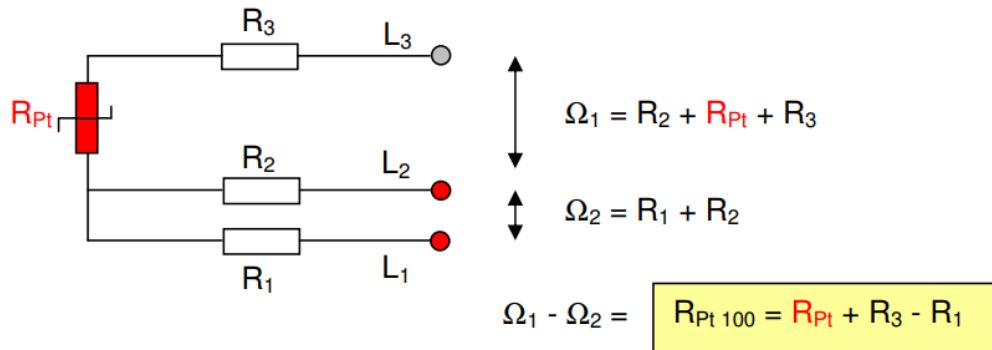


Figuur 26: Tweedraadsmeting van een weerstand [28, p. 1]

Een 3-wire weerstandmeting kan gebruikt worden om de voorgaande fouten te elimineren. Hierbij wordt één zijde van de Pt100 opgesplitst in 2 draden. De weerstandsmeter doet in feite twee weerstandmetingen en trekt deze van elkaar af. Het eerste meting is tussen L3 en L2 waarbij net zoals bij 2-wire methode de Pt100 weerstand wordt opgemeten samen met de draadweerstand. De tweede meting gebeurt tussen L1 en L2 waarbij enkel de draadweerstand worden opgemeten. Door deze van elkaar af te trekken bekomt men de weerstand van de Pt100. Merk op dat dit enkel

mogelijk is als alle draden even lang zijn dus $R_1=R_2=R_3$. In de meeste applicaties is een 3-wire meting voldoende [28]. Een schematische overzicht van de 3-wire methode is weergegeven in figuur 27. Voor een hogere nauwkeurigheid moet men overgaan naar een 4-wire weerstandsmeting.

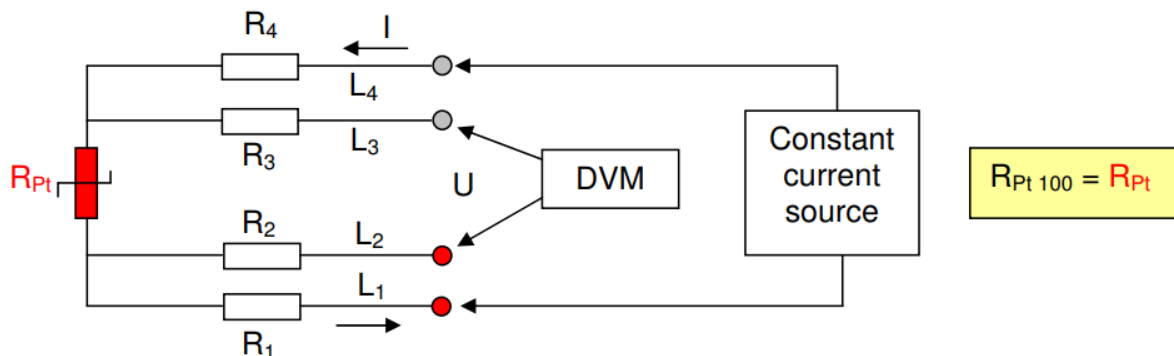
3-wire connection



Figuur 27: Driedraadsmeting van een weerstand [28, p. 1]

De 4-wire weerstandsmeting, zoals te zien in figuur 28, is de beste methode om de weerstand van Pt100 te bepalen. Hierbij wordt er gebruik gemaakt van 4 draden. 2 draden (L1 en L4) wordt gebruikt om een constante stroom te leveren en andere 2 draden (L2 en L3) wordt gebruikt om de spanning over Pt100 op te meten. Aangezien een spanningsmeting hoog impedant gebeurt, hebben de draadweerstand R2 en R3 geen invloed op de spanningsmeting en zijn verwaarloosbaar [28].

4-wire connection



Figuur 28: Vierdraadsmeting van een weerstand [28, p. 1]

2.4.5 Overzicht

In de volgende tabel is een overzicht weergegeven van de belangrijke methoden om temperatuur op te meten. Hierbij worden er bepaalde belangrijke parameters vergeleken. Afhankelijk van de toepassing kan er een specifieke methode gekozen worden.

Tabel 7: Overzicht van temperatuursensoren [24], [29]

Eigenschappen	Platina RTD	Thermistor	Thermokoppel	IC
Materiaal	Platina	Keramisch	2 verschillende legeringen	Silicium
Bereik	-200°C tot 500°C	-40°C tot 260°C	-270°C tot 1750°C	-55°C tot 150°C
Sensitiviteit	2 mV/°C	40 mV/°C	0.05 mV/°C	~1 mV/°C of ~1 uA/°C
Nauwkeurigheid	-45 tot 100°C: ±0.5°C; 100 tot 500°C: ±1.5°C; 500 tot 1200°C: ±3°C	-45 tot 100°C: ±0.5°C; Snelle verslechtering na 100°C	0 tot 275°C: ±1.5 °C - ±4°C; 275 tot 1260°C: ±0.5 - ±0.75%	±2 °C
Lineariteit	Goed	Slecht	Gemiddeld	Goed
Prijsklasse	Hoog	Laag tot gemiddeld	Laag	Laag

Voor de nieuwe generatie HTOL-setup wordt er gebruik gemaakt van de platina RTD (Pt100) omwille van hoge nauwkeurigheid over een ideaal bereik tot 180 °C, simpel uitleesmechanisme en hoge stabiliteit. Een IC-gebaseerde sensor kan niet gebruikt worden omwille van lage meetbereik. Een thermistor is eveneens niet de optimale keuze omwille van lage nauwkeurigheid bij temperaturen hoger dan 100 °C en lage stabiliteit. De meetovens kunnen gemakkelijk tot 150-180 °C gaan. Een thermokoppel wordt niet verkozen omwille van de lagere nauwkeurigheid en het complexere uitleesmechanisme.

3 Hardware ontwerp

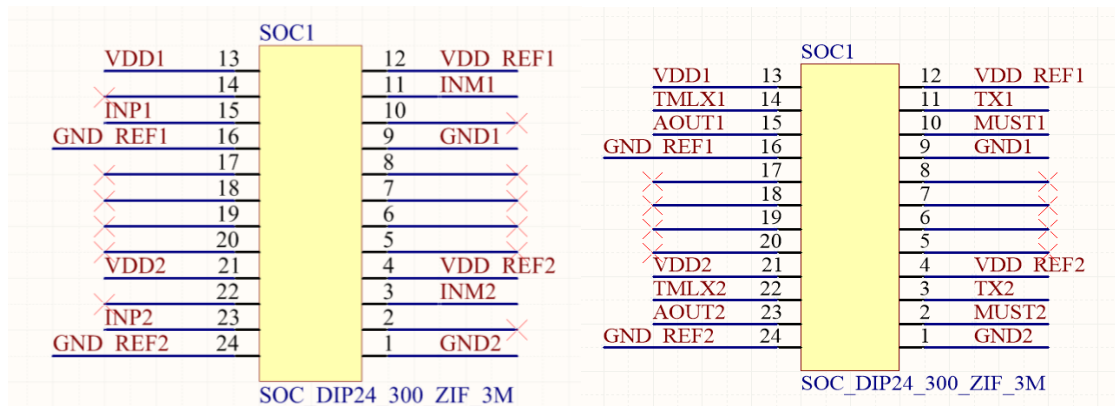
Het hardware ontwerp bestaat uit de ontwikkeling van 3 soorten PCB's. In de eerste sectie wordt informatie gegeven over de chipborden die in de ovens geïnstalleerd worden. Daarna worden de adapterborden voor de geïntegreerde sensoren voorgesteld. In de laatste paragraaf worden de relaisborden in detail behandeld.

3.1 Chip-PCB

De chipborden worden gebruikt om de geïntegreerde en discrete sensoren in te pluggen. Deze borden worden gestapeld om zo ook de hoogte te kunnen gebruiken van de ovens. De signalen van de sensoren worden met behulp van flat cables overgebracht naar de relais-PCB's. Merk op dat er geen elektrische verbindingen zijn tussen de chipborden. Elk chipbord opereert onafhankelijk en is gekoppeld met een welbepaald relaisbord.

3.1.1 Schematische voorstelling

De temperatuur in de oven kan oplopen tot 150-170 °C. Daarom is er gebruikt gemaakt van de hogetemperatuursockets van Aries Electronics die temperaturen kunnen verdragen tot 250°C [30]. Er zijn in totaal 6 sockets voorzien waarbij per socket 2 sensoren ingeplugd kunnen worden. Een schematische overzicht is weergegeven in figuur 29 voor zowel discrete als voor geïntegreerde sensoren. Zo worden de bovenste en onderste 8 pinnen gebruikt om twee sensoren in te pluggen.



Figuur 29: Schematische weergave van een socket; links voor discrete sensoren; rechts voor geïntegreerde sensoren

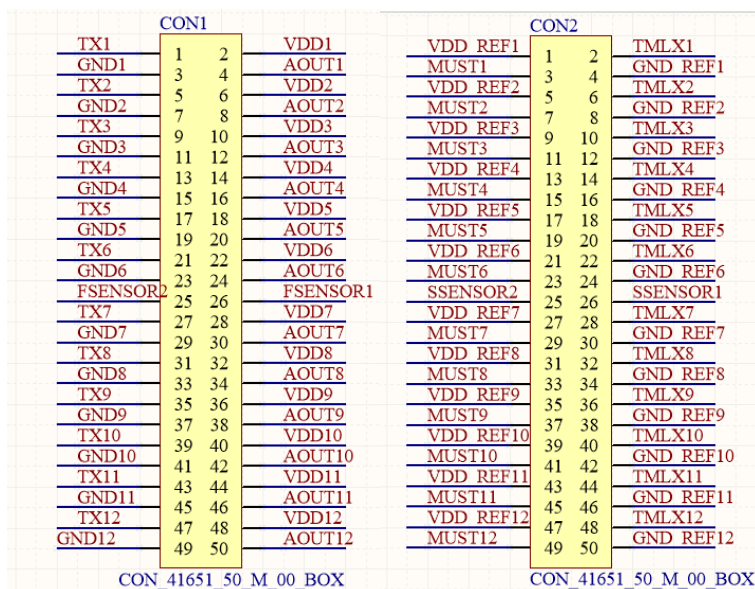
De pinnen zijn zodanig gekozen dat zowel geïntegreerde als discrete sensoren gekarakteriseerd kunnen worden. Zoals besproken in de literatuurstudie sectie 2.2.3, verschillen per type sensor het aantal pinnen voor de karakterisatie. In tabel 8 is een overzicht weergegeven van alle pinnen. Merk op dat de VDD, GND, VDD-REF en GND-REF pinnen identiek zijn. De VDD en GND pinnen worden gebruikt om de sensor te voeden en de VDD-REF en GND-REF pinnen worden gebruikt als senselijnen voor respectievelijk VDD en GND.

Tabel 8: Pinnen per sensor type

Sensor Type	Pinnen
Discreet sensor	VDD, GND, VDD-ref, GND-REF, INP, INM
Geïntegreerde sensor	VDD, GND, VDD-ref, GND-REF, AOUT, TX, MUST, TMLX

De discrete sensoren kunnen rechtstreeks ingeplugd worden in de sockets omdat deze in DIP verpakking voorkomen. Hierbij wordt er gebruikt gemaakt van 6 pinnen zoals ook weergegeven in de linkerkant van figuur 29. De geïntegreerde sensoren kunnen niet rechtstreeks ingeplugd worden in de sockets. Deze komen typisch in DFN14 package waardoor er een conversie moet uitgevoerd worden door middel van een adapter-PCB. Deze zal in de volgende sectie uitvoerig besproken worden. Merk op dat de geïntegreerde sensoren meer pinnen hebben, maar dit is zeker niet altijd het geval. Zo is het mogelijk dat er enkele pinnen ontbreken. In de rechterzijde van figuur 29 zijn alle pinnen weergegeven. Aangezien elk socket voor beide type sensoren gebruikt wordt, worden in feite 2 van de 8 pinnen multifunctioneel gebruikt. Indien er aangenomen wordt dat een bepaalde sensor ingeplugd wordt in de bovenste socket in figuur 29, kan pin 15 zowel INP als AOUT opgevat worden. Dit is analoog voor pin 11 waarbij INM en TX door elkaar gebruikt kan worden. Deze benamingen zijn dus afhankelijk van de type sensor dat ingeplugd wordt. Om misverstanden te voorkomen, zal er in deze thesis vanaf nu altijd gesproken worden van AOUT en TX pinnen.

Alle pinnen van de sockets worden geconnecteerd met twee flat cable connectoren. Deze signalen zullen met behulp van twee flat cables overgedragen worden naar de relaismatrix van het bijhorende relaisbord. De connectoren zijn zodanig geordend dat de differentiële spanningsmeting voor discrete sensoren zou mogelijk zijn indien er gebruikt gemaakt wordt van één flat cable. Zo bevat de eerste connector VDD, GND, TX (of INM) en AOUT (of INP) signalen en de tweede connector bevat VDD-REF, GND-REF, MUST en TMLX signalen van alle sensoren, zoals ook weergegeven in figuur 30.

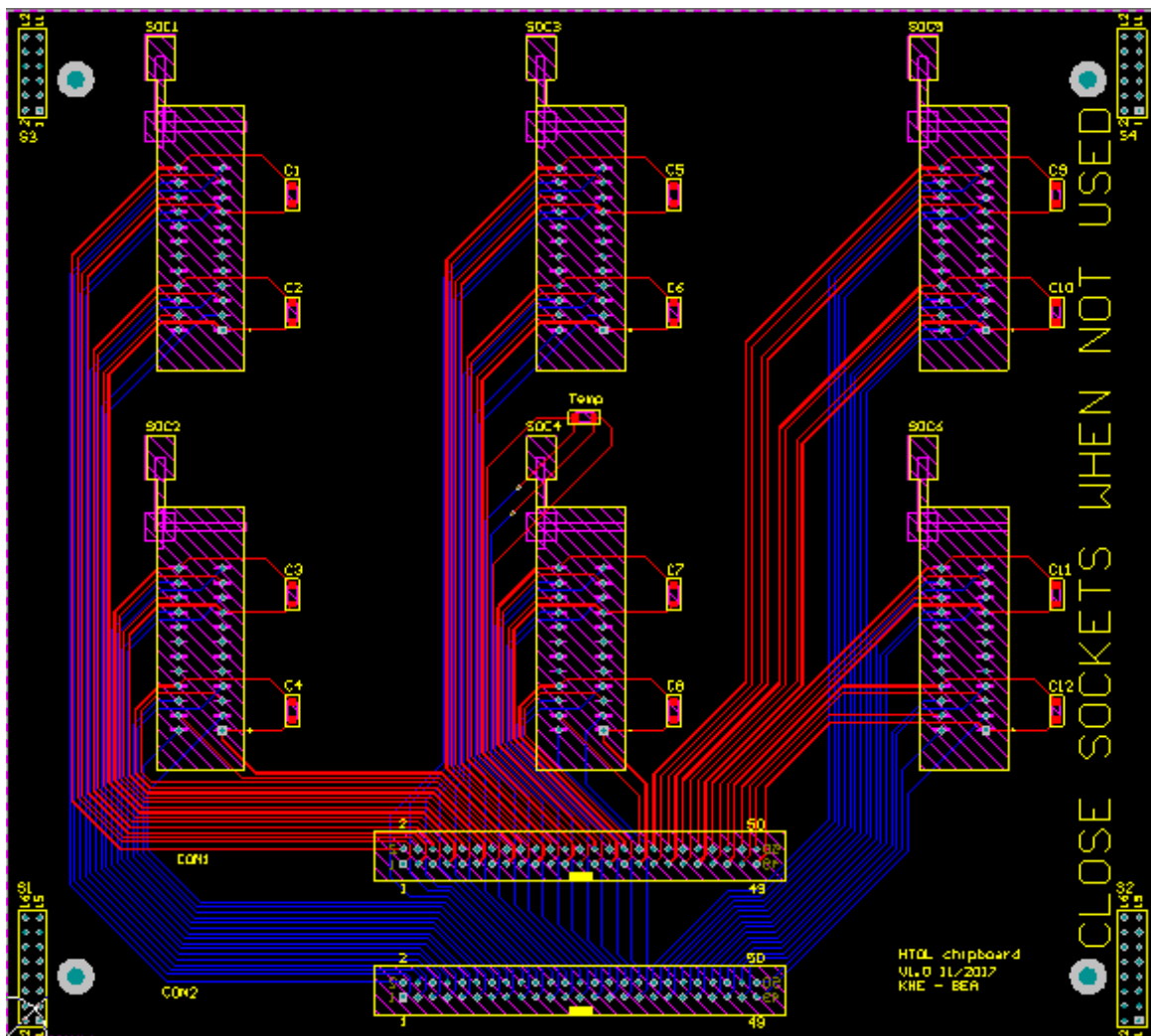


Figuur 30: Schematische weergave van flat cable connectoren

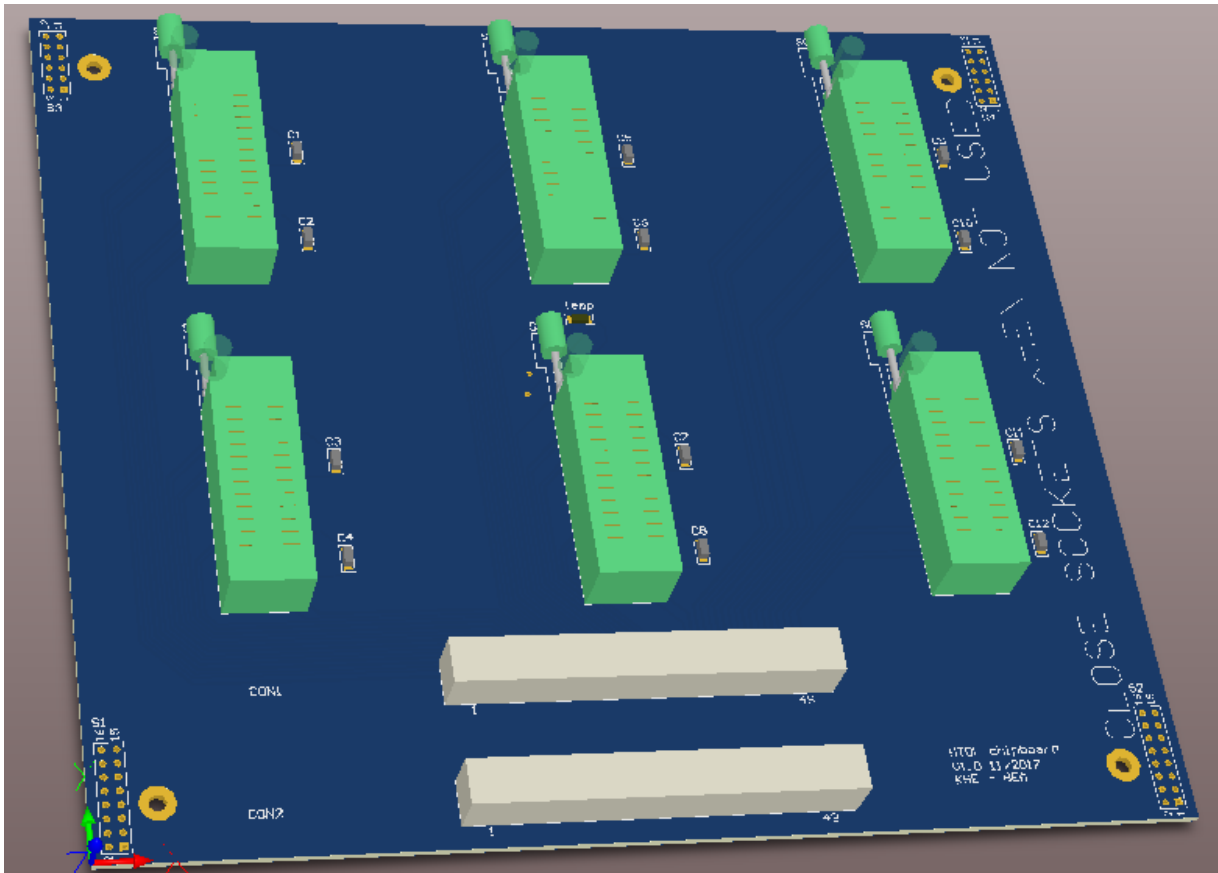
Per chipbord is er ook een Pt100 voorzien om de temperatuur te registreren. Hierbij wordt het vierdraadsprincipe gehanteerd zoals besproken in de sectie 2.4.4. Deze lijnen worden ook doorverbonden met de flat cable connectoren om zo overgedragen te kunnen worden naar de bijhorende relaismatrix. De force lijnen FFSENSOR1 en 2 worden gebruikt om stroom door te sturen en de sense lijnen SSENSOR1 en 2 worden gebruikt om de spanning op te meten. Deze connecties zijn ook zichtbaar in figuur 30.

3.1.2 Hardware implementatie

In figuur 31 is de layout van de chip-PCB weergegeven. Dit is een 2-lagen PCB van 198,32 mm op 177,22 mm met een standaard koperdikte van 35µm. Beide lagen zijn gebruikt voor routing en er zijn geen vlakken aanwezig. Er zijn 6 sockets voorzien waar men in totaal 12 geïntegreerde of discrete sensoren kan inpluggen. Voor elke sensor is er ook een ontkoppelcapaciteit aanwezig tussen VDD en GND. Dit is noodzakelijk om eventuele elektrische ruis te onderdrukken. Om deze borden te stapelen, worden er twee opties voorzien. Enerzijds kan er gebruik gemaakt worden van de vrouwelijke sockets of pinheaders met een standaard pitch van 2,54mm. Anderzijds zijn er ook gaten voorzien met een diameter van 3,2 mm, geschikt voor M3 mannelijke-vrouwelijke afstandsbusen. In figuur 32 is de PCB weergegeven in 3D-formaat.



Figuur 31: Layout weergave van de chip-PCB



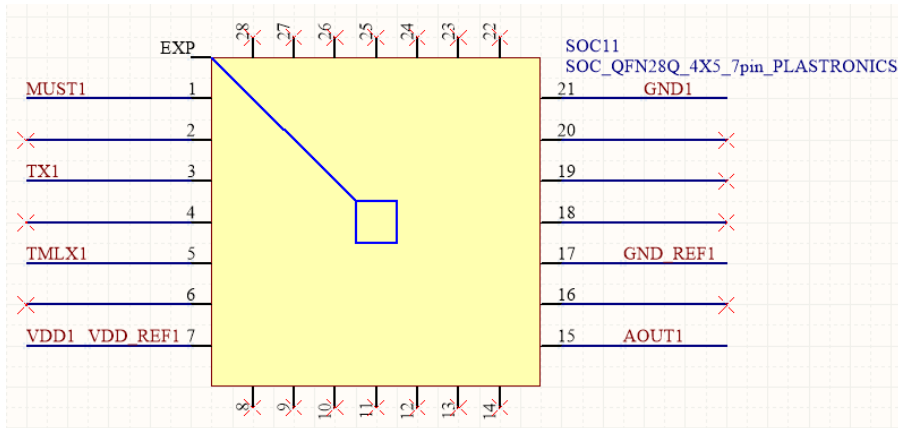
Figuur 32: 3D-weergave van de chip-PCB

3.2 Adapter-PCB

De geïntegreerde sensoren zijn dikwijls van een kleine verpakking voorzien zoals QFN/DFN. Deze sensoren kunnen niet ingeplugd worden in de hoge-temperatuursokkets van de chipborden. Daarom is er een extra PCB ontworpen om deze sensoren te kunnen converteren. De pinout van MLX90817 en MLX90818 geïntegreerde druksensoren worden gebruikt om deze PCB te ontwikkelen.

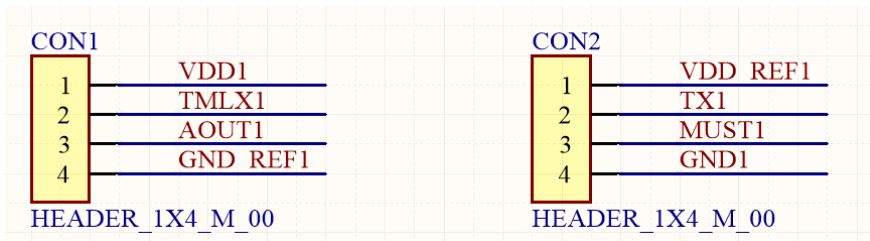
3.2.1 Schematische voorstelling

De MLX90817/18 druksensoren komen voor in een DFN14 verpakking. Er wordt gebruikt gemaakt van DFN/QFN-sokkets van Plastronics om de contacten over te brengen naar de adapter-PCB [31]. Hierbij is er geopteerd voor de through-hole clamshell versie om stabiele werking te verzekeren. In figuur 33 is een schematische overzicht weergegeven van deze socket. Merk op dat er geen aparte VDD-REF pin beschikbaar is op MLX90817/18. Om deze reden wordt de VDD-pin 7 in feite opgesplitst in een voedingslijn VDD en een senselijn VDD-ref in de layout fase.



Figuur 33: Schematische weergave van QFN-socket

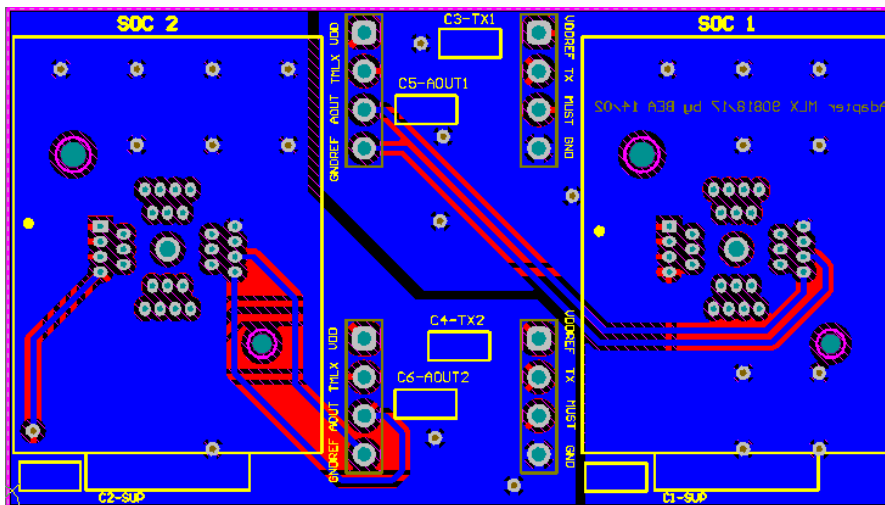
De pinnen van de QFN-socket worden geconnecteerd met twee pin headers die ingeplugd kunnen worden in de hoge-temperatuursockets van de chipborden. Merk op dat de schikking van de pinnen identiek is aan de pinout van de hoge-temperatuursockets, zoals weergegeven in figuur 34.



Figuur 34: Pinout van pin headers

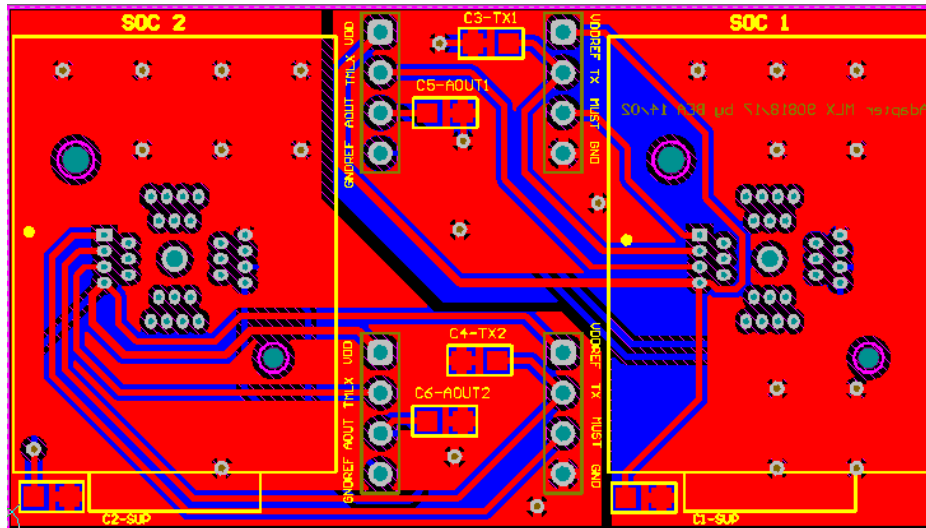
3.2.2 Hardware implementatie

In figuur 35 en 36 is de layout van de chip-PCB weergegeven respectievelijk in onder en bovenlagen. Dit is een 2-lagen PCB van 58,54 mm op 32,86 mm met een standaard koperdikte van 35µm. Beide lagen zijn gebruikt voor routing en er zijn twee grondvlakken aanwezig. De adapter-PCB is zodanig ontworpen dat er twee sensoren ingeplugd kunnen worden in de hoge temperatuursocket van de chipbord. De sockets zijn daarom ook genummerd met nummer 1 en 2.



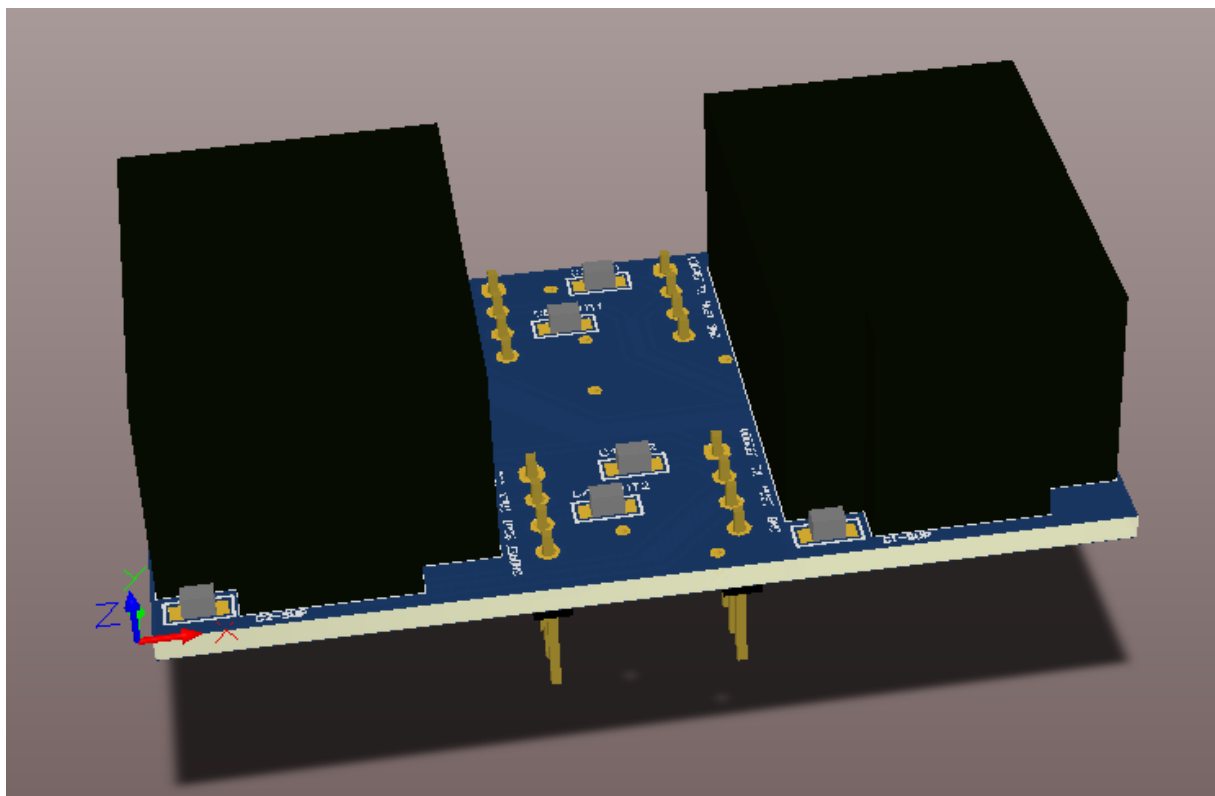
Figuur 35: Layout weergave van de adapter-PCB (onder)

Er zijn ontkoppelcapaciteiten voorzien tussen VDD en GND voor beide sensoren voor elektrische zuivering. Er zijn ook capaciteiten voorzien op de TX en AOUT pinnen omdat er soms testen worden gedaan waarbij deze output pinnen belast worden met extra capaciteiten. Elk sensor bevat ook zijn eigen grondlaag. Dit zijn in feite twee grondlagen: een boven en een onderlaag die via via stitching techniek met elkaar verbonden zijn. Dit is niet noodzakelijk maar vermindert productieproblemen omwille van evenwichtige verspreiding van koper en kan bijdragen tot lagere impedantie en kortere returnpaden [32].



Figuur 36: Layout weergave van de adapter-PCB (boven)

In figuur 37 is de PCB weergegeven in 3D-formaat.



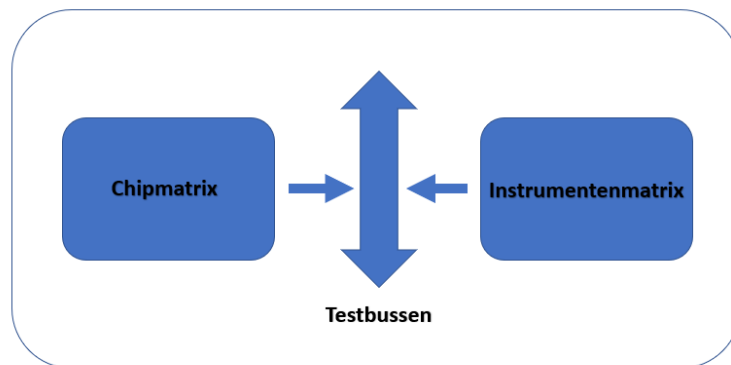
Figuur 37: 3D-weergave van de adapter-PCB

3.3 Relais-PCB

De relaisborden worden gebruikt om de signalen van de verschillende chips en instrumenten te schakelen op de juiste testbussen. Deze borden worden buiten de oven gestapeld en komen elk overeen met een specifieke chipbord in de oven. Er zijn elektrische verbindingen aanwezig tussen de verschillende relaisborden door middel van enkele connectoren.

3.3.1 Schakelmatrix

De schakelmatrix kan opgesplitst worden in 2 aparte matrices: chipmatrix en instrumentenmatrix. De chipmatrix wordt gebruikt om de pinnen van de chips en Pt100 te kunnen schakelen op de aangewezen testbussen. De instrumentenmatrix wordt gebruikt om bepaalde instrumenten (Keithley multimeter en/of PTC-04 programmer) te schakelen op de testbussen om metingen te verrichten. Een schematische overzicht is weergegeven in figuur 38.



Figuur 38: Overzicht schakelmatrix

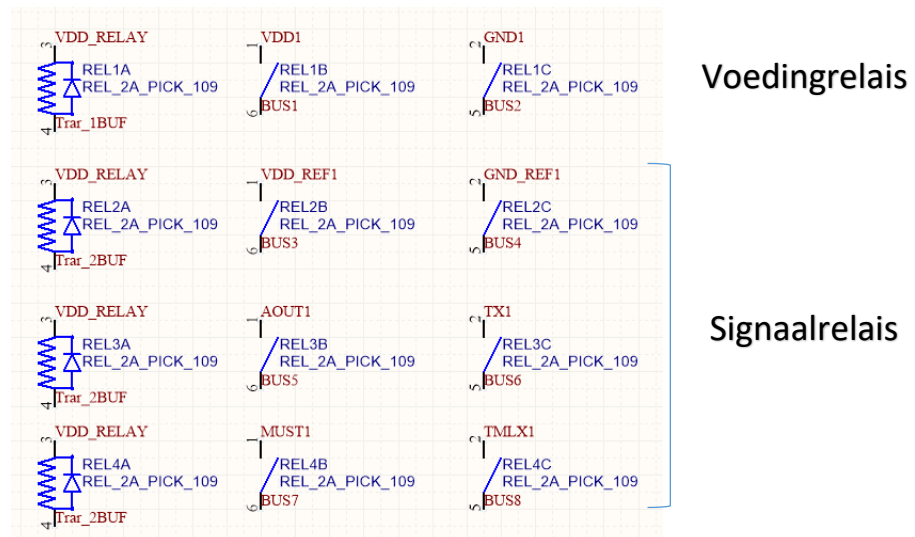
Er worden 8 testbussen onderscheiden op de relaisborden. Deze bussen worden doorgelust door elk relaisbord door middel van stapelconnectoren en komen overeen met de pinnen van een chip. Voor de duidelijkheid worden de bussen weergegeven in figuur 39.

BUS1 = VDD-BUS
BUS2 = GND-BUS
BUS3 = VDD_REF-BUS
BUS4 = GND_REF-BUS
BUS5 = AOUT-BUS (also INP)
BUS6 = TX-BUS (also INM)
BUS7 = MUST-BUS
BUS8 = TMLX-BUS

Figuur 39: Testbussen

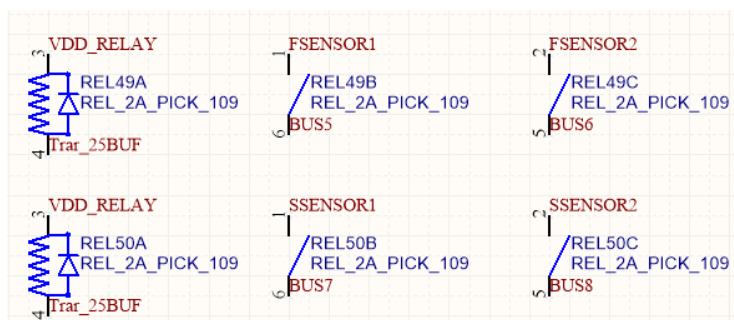
3.3.1.1 Chipmatrix

Elke chip op een bepaalde chipbord kan met behulp van 4 dubbelpolige relais geschakeld worden op de testbussen. Hiervoor is er gebruikt gemaakt van de Micro-Sil relais van Pickering. Het type 109-2-A-5/2D heeft een nominale spoelspanning van 5V en kan tot 1,2A/200V verdragen. Aangezien de chips veel minder vermogen hebben, zijn deze eigenschappen ook voldoende voor een stabiele werking. Andere positieve eigenschappen zijn de kleine verpakking en de lage contactweerstand 0,14Ω [33]. In figuur 40 zijn de relais weergegeven voor een chip. Het is op te merken dat er maar 2 I/O's worden gebruikt om deze 4 relais te controleren nl. Trar_1BUF en Trar_2BUF. De eerste I/O wordt gebruikt om de chip te schakelen op de voedingsbussen BUS1 en BUS2 d.m.v. 1 dubbelpolige relais. De tweede I/O wordt gebruikt om al de rest van de signalen te schakelen op de overige testbussen. Hierbij wordt er gebruik gemaakt van 3 dubbelpolige relais. Deze aparte configuratie is ontworpen om de chips afzonderlijk te kunnen resetten. Om gemakkelijker te verwijzen naar deze relais, wordt er vanaf nu gesproken van voeding- en signaalrelais. In totaal wordt er gebruik gemaakt van 48 relais om 12 chips te schakelen.



Figuur 40: Relais voor chip 1

De chipborden zijn ook uitgerust met Pt100 sensoren om de temperatuur te registreren. De vier connecties van de Pt100 worden geschakeld op bussen 5 tot en met 8 om daarna op te kunnen meten met de Keithley multimeter. Er wordt maar één I/O gebruikt om twee dubbelpolige relais te schakelen.



Figuur 41: Relais voor Pt100

3.3.1.2 Instrumentenmatrix

De instrumenten worden aangesloten op het relaisbord. Deze worden afhankelijk van de gewenste meting geschakeld op bepaalde testbussen. Hiervoor wordt er gebruik gemaakt van een instrumentenmatrix op basis van enkelvoudige Single-In-Line-Sil relais van Pickering, met uitzondering van 1 dubbelpolige relais. Het type 112-1-A-5/2D heeft een nominale spoelspanning van 5V en kan tot 0,5A/200V schakelen [34]. In figuur 42 wordt er een overzicht gegeven van de connecties van de instrumenten. De Keithley input HI en LO wordt gebruikt om spanningen op te meten. De sense lijnen HI en LO kunnen ingeschakeld worden bij vierdraadmetingen zoals bij Pt100. De PTC-04 programmer wordt gebruikt om te communiceren en opvragingen te doen met de geïntegreerde sensoren via TX en MUST pinnen. Optioneel kan de PTC-04 gebruikt worden als een regelbare spanningsbron om de chips te voeden via de VDD en GND-pinnen.



Figuur 42: Pinout van instrumenten

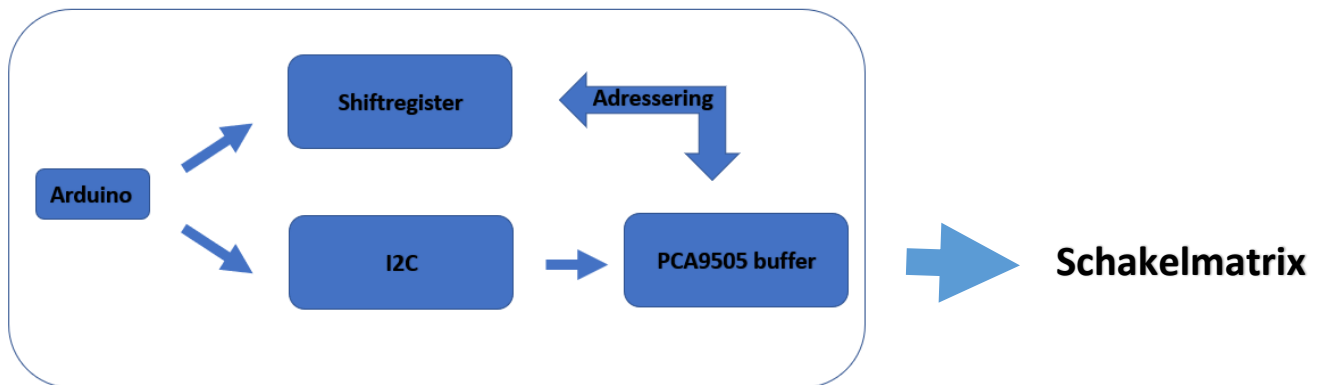
Een overzicht van de instrumentenmatrix is weergegeven in figuur 43. Elk vakje komt overeen met een enkelvoudig relais dat gebruikt wordt om een instrumentconnectie te schakelen op een welbepaalde testbus. Elk relais wordt ook afzonderlijk gecontroleerd met behulp van één I/O. Enige uitzondering bevindt zich op de sense lijnen van de Keithley. Hiervoor wordt er gebruikt gemaakt van een dubbelpolige relais om beide senselijnen te schakelen op bus 7 en 8. In totaal wordt er gebruik gemaakt van 14 enkelvoudige en 1 dubbelpolige relais. Het is op te merken dat de GND-pin van de PTC-04 programmer rechtstreeks wordt aangesloten op de GND-bus, zonder een tussenkomst van een relais. De VND en GND-testbussen worden ook aangesloten op een externe voedingsbron indien de PTC-04 niet gebruikt wordt als een voedingsbron.

Chip connections					Busses								
Pin	Name	type	function	Description	Vdd	Gnd	V ref	GND ref	INP/Aout	INM/Tx	Must	TMLX	
Test resources													
		Keithley	Input pos		x		x		x	x	x	x	
			Input neg			x		x	x	x			
			Sense pos									x	
			Sense neg										x
		PTC04	Tx							x		x	
			Vdd			x							
			Gnd				FIX						
			Must								x		

Figuur 43: Overzicht instrumentenmatrix

3.3.2 Stuurmechanisme

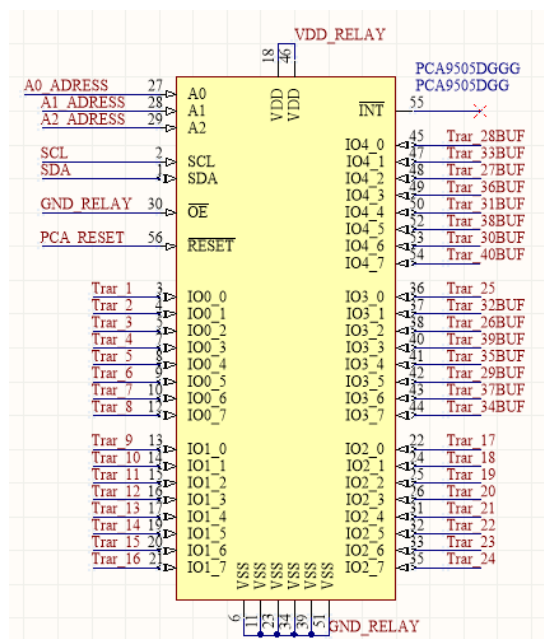
De schakelmatrix wordt gecontroleerd door middel van PCA9505 buffer. Het stuurmechanisme kan opgesplitst worden in twee delen zoals te zien in figuur 44. Enerzijds wordt er gecommuniceerd met de PCA9505 buffer met behulp van het I2C-communicatieprotocol. Anderzijds wordt de adressering van de buffer verzorgd door middel van een shiftregister.



Figuur 44: Stuurmechanisme van PCA9505

3.3.2.1 Sturing schakelmatrix

De 40-bit parallel input/output buffer PCA9505 is gebruikt om de juiste relais te schakelen. Deze buffer is bestaat uit 5 banken van 8 I/O's. De eerste drie banken worden gebruikt om de chipmatrix aan te sturen. Hierbij worden de eerste 12 I/O's gebruikt om de voedingsrelais te schakelen en de laatste 12 I/O's worden gebruikt om de signaalrelais te controleren. De laatste twee banken worden gebruikt om de instrumentenmatrix aan te sturen, met uitzondering van één I/O om Pt100 te schakelen op de testbussen. Een schematische overzicht is weergegeven in figuur 45.

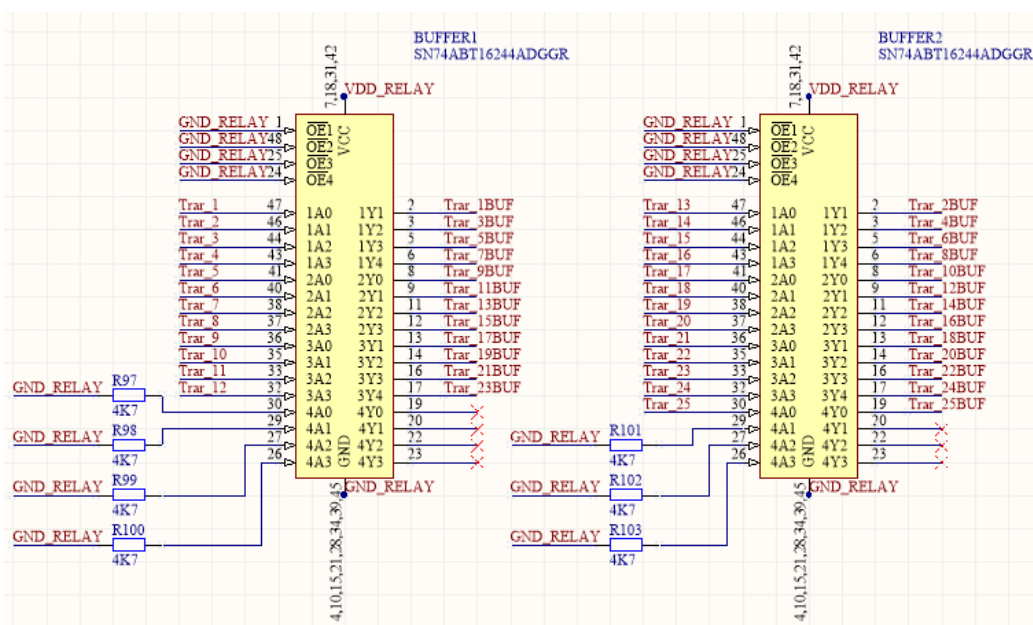


Figuur 45: Schematische overzicht van PCA9505

De eenpolige relais die veelvuldig wordt gebruikt in de instrumentenmatrix, heeft een spoelweerstand van 500Ω. Dit betekent dat bij aansturing met 5V, een stroom zal vloeien van $5V/500\Omega \approx 10 \text{ mA}$. Een analoge berekening kan ook gedaan worden voor de dubbelpolige relais die wordt gebruikt in de chipmatrix. Deze relais hebben een spoelweerstand van 375Ω. De stroom dat zal vloeien is gelijk aan $5V/375\Omega \approx 13,34 \text{ mA}$. Aangezien de PCA9505 een stroom kan sinken tot 15 mA, zijn deze waarden binnen het bereik van de buffer [7]. De eenpolige en tweepolige relais in de instrumentenmatrix worden rechtstreeks aangestuurd door de I/O's van de PCA9505 zonder een tussenkomst van een ander IC. Deze worden in figuur 45 weergegeven als Trar_26BUF tot en met Trar_40BUF.

De tweepolige relais in de chipmatrix kan niet rechtstreeks gecontroleerd worden door de PCA9505. Het eerste reden hiervoor is het feit dat de drie signaalrelais worden aangestuurd door één I/O. Hierdoor wordt de maximale stroom overschreden. Juist daarom wordt er gebruik gemaakt van een niet-inverterende buffer SN74ABT16244 die een hogere stroom kan sinken tot 64 mA [8]. Een schematische overzicht is weergegeven in figuur 46. De 12 I/O's (Trar_13 tot 24) van de PCA9505 worden daarom eerst verbonden met een SN74ABT16244 buffer om daarna de signaalrelais aan te sturen. Een analoge redenering kan ook gedaan worden voor de twee dubbelpolige relais van de Pt100 die aangestuurd worden met één I/O. Trar_25 is daarom ook verbonden via deze buffer.

Een tweede SN74ABT16244 is gebruikt om de voedingsrelais te controleren van de chipmatrix. Deze worden elk gecontroleerd door middel van één I/O, dus is de stroomlimiet niet overschreden. Het probleem is het feit dat bij opstart alle I/O's van PCA9505 ingesteld worden als input, dus in hoog impedante stand voorkomen. Deze voedingsrelais moeten bij opstart aan staan om zo de chips te kunnen voeden. Daarom worden deze I/O's (Trar_1 tot 12) verbonden via een SN74ABT16244 buffer. Hierdoor kunnen er tussen beide buffers pull-down weerstanden worden aangesloten om deze gedrag te garanderen. Deze buffer is ook weergegeven in de linkerzijde van figuur 46. Een analoge redenering kan ook toegepast worden op de rechter buffer in figuur 46. Hier worden pull-up weerstanden voorzien om deze relais (signaalrelais en relais voor Pt100) bij opstart uit te zetten.



Figuur 46: Schematische overzicht van SN74ABT16244

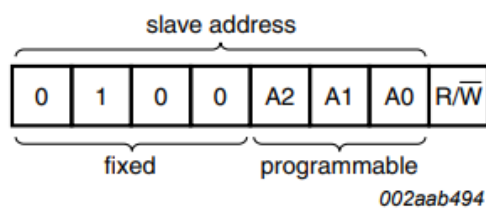
Een overzicht is weergegeven in tabel 9. Alle relais gaan in UIT-stand bij opstart buiten de voedingsrelais die gecontroleerd met de I/O's Trar1 tot en met 12.

Tabel 9: Overzicht I/O's PCA9505

I/O's PCA9505	Connectie	Matrix
Trar 1 tot 12	Via SN74ABT16244 (NR1)	Voedingrelais - Chipmatrix
Trar 13 tot 14	Via SN74ABT16244 (NR2)	Signaalrelais - Chipmatrix
Trar 25	Via SN74ABT16244 (NR2)	Relais Pt100 - Chipmatrix
Trar26_BUF tot Trar40_BUF	Rechtstreeks	Instrumentenmatrix

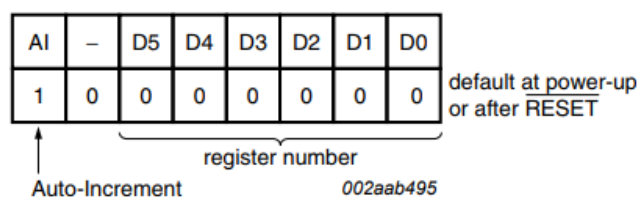
3.3.2.2 Sturing PCA9505

De Arduino UNO communiceert met de PCA9505 buffer door middel van het I2C-protocol. Beide buslijnen SDA en SCL zijn gelust door de verschillende relaisborden en zijn verbonden met de PCA9505's. Op basis van de vergelijkingen in de sectie 2.3.3 worden er pull-up weerstanden gebruikt van 1400Ω. Dit is in principe voldoende om een bus capaciteit tot 800 pF aan te sturen in de standaard modus. Na het start commando stuurt de master Arduino een eerste byte met adresgegevens van een specifieke PCA9505. De eerste 4 bits zijn vastgelegd door de producent, hoewel de laatste 3 bits worden bepaald door de adrespinnen die aangesloten worden op VDD of VSS. De laatste bit bepaalt of het gaat om de schrijf of lees operatie [7, p. 7]. In figuur 47 is deze byte weergegeven.



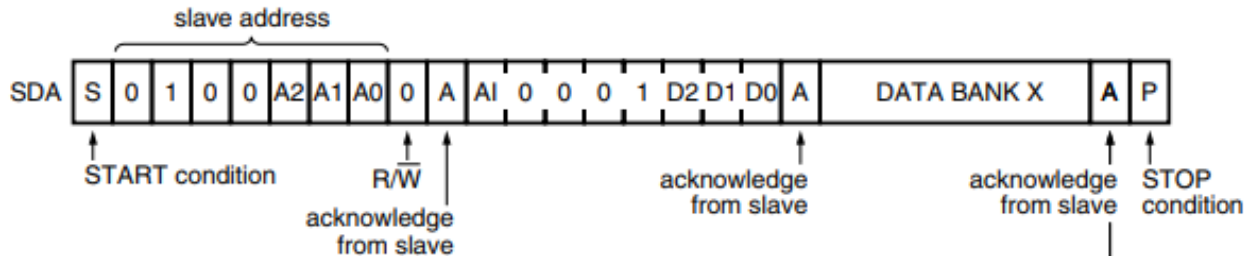
Figuur 47: Eerste byte PCA9505 [7, p. 7]

Na de eerste acknowledge van de slave, zal een tweede byte volgen die het interne register bepaalt. Zoals weergegeven in figuur 48, bepalen de laatste 6 bits welke register aangesproken zal worden. Er kunnen vijf verschillende types registers onderscheiden worden: input register, output register, polariteit register, configuratie register en mask interrupt register. Elk type register bestaat uit 5 registers die 5 banken voorstellen. Optioneel kan de auto-increment bit hoog gezet worden. Deze zal zorgen dat de drie minst significante bits zullen geïncrementeerd worden na een lees of schrijf operatie [7, p. 7].



Figuur 48: Tweede byte PCA9505 [7, p. 7]

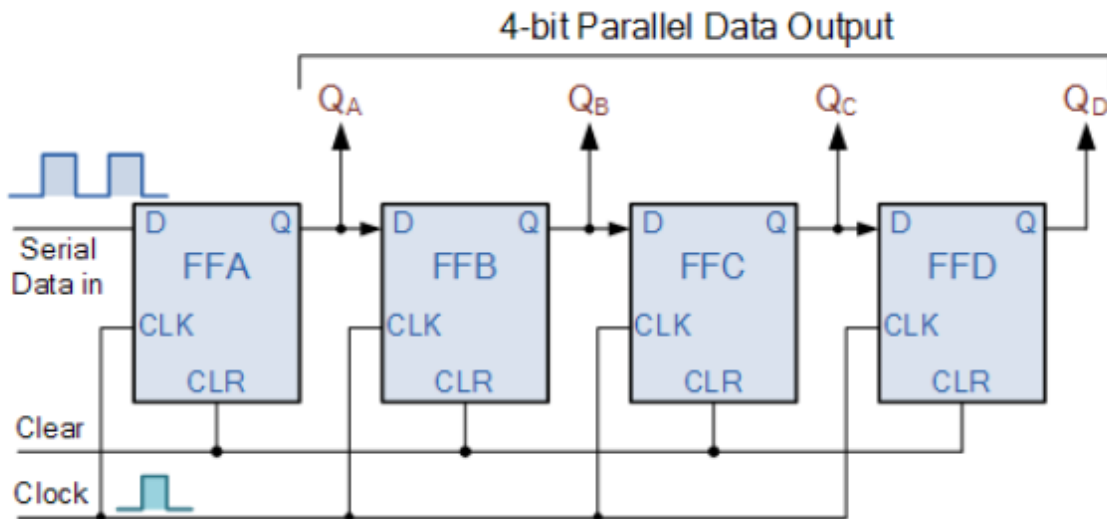
Na de tweede acknowledge zal een byte volgen die de inhoud van het register zal bepalen. Zo kan bijvoorbeeld de I/O register bank 1 geselecteerd om de I/O's in bank 1 als output te configureren. Hierna kan de output register bank 1 gebruikt worden om de I/O's hoog of laag te zetten. In figuur 49 is een samenvattend voorbeeld gegeven om naar een specifiek register te schrijven.



Figuur 49: Schrijven naar een specifieke register [7, p. 17]

Adressering

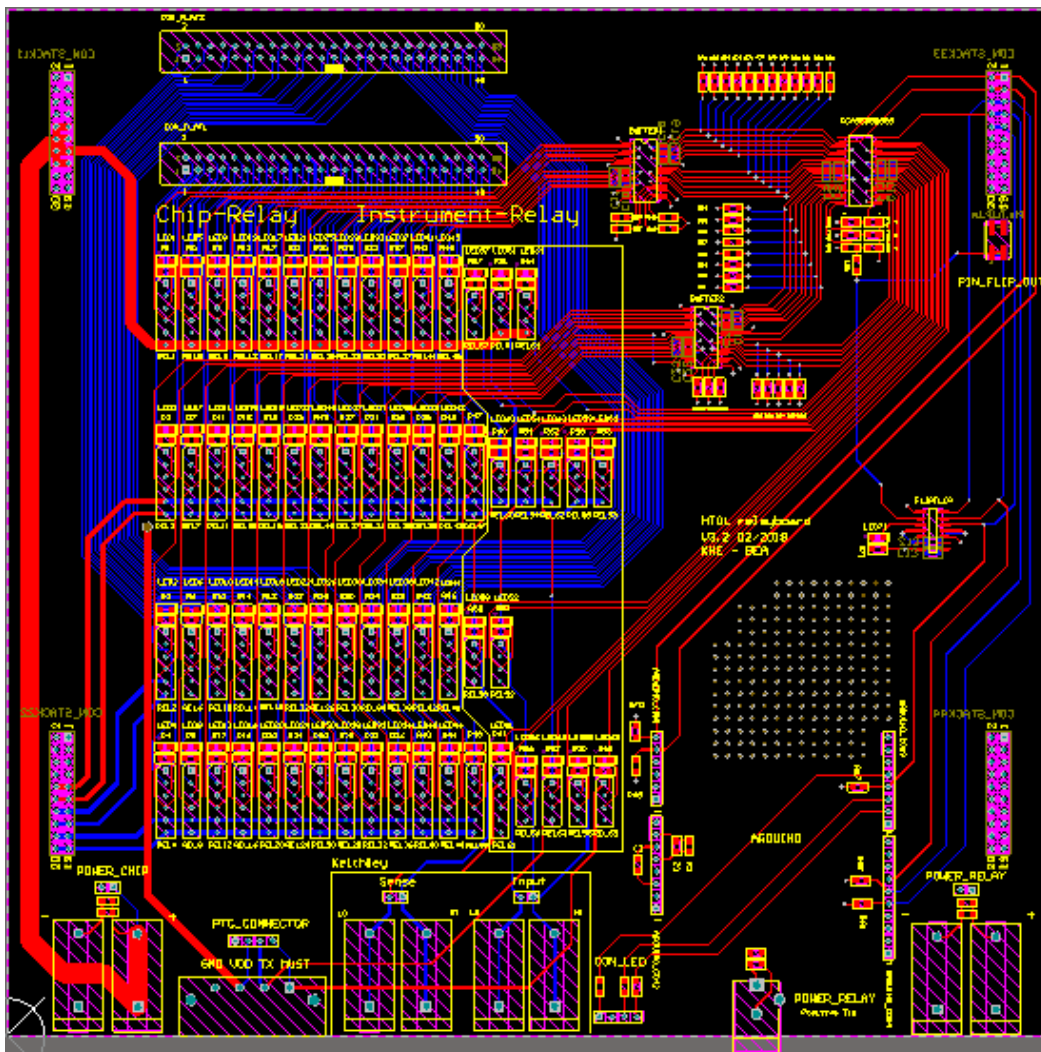
Om de plug-and-play functie van de relaisborden te verzekeren, wordt de adressering van de PCA9505 dynamisch verzorgd met behulp van D-flipflop's die een schiftregister vormen. Op elk relaisbord is een D-flipflop voorzien die één adres-bit verzorgt. De adres-bits A1 en A2 van PCA9505 worden aangesloten op de VSS terwijl A0 wordt verzorgd door de flipflop uitgang. De flipflops op verschillende relaisborden worden aangesloten zoals weergegeven in figuur 50. De seriële input, reset en het kloksignaal worden verzorgd door de Arduino. Een bepaalde PCA9505 wordt gekozen door de gekoppelde flipflop output Q hoog zetten en de rest laag. Het adres 001 (A2 A1 A0) kan daarna gebruikt worden om te communiceren met de gekozen PCA9505.



Figuur 50: Shiftregister op basis van D-flipflops [35]

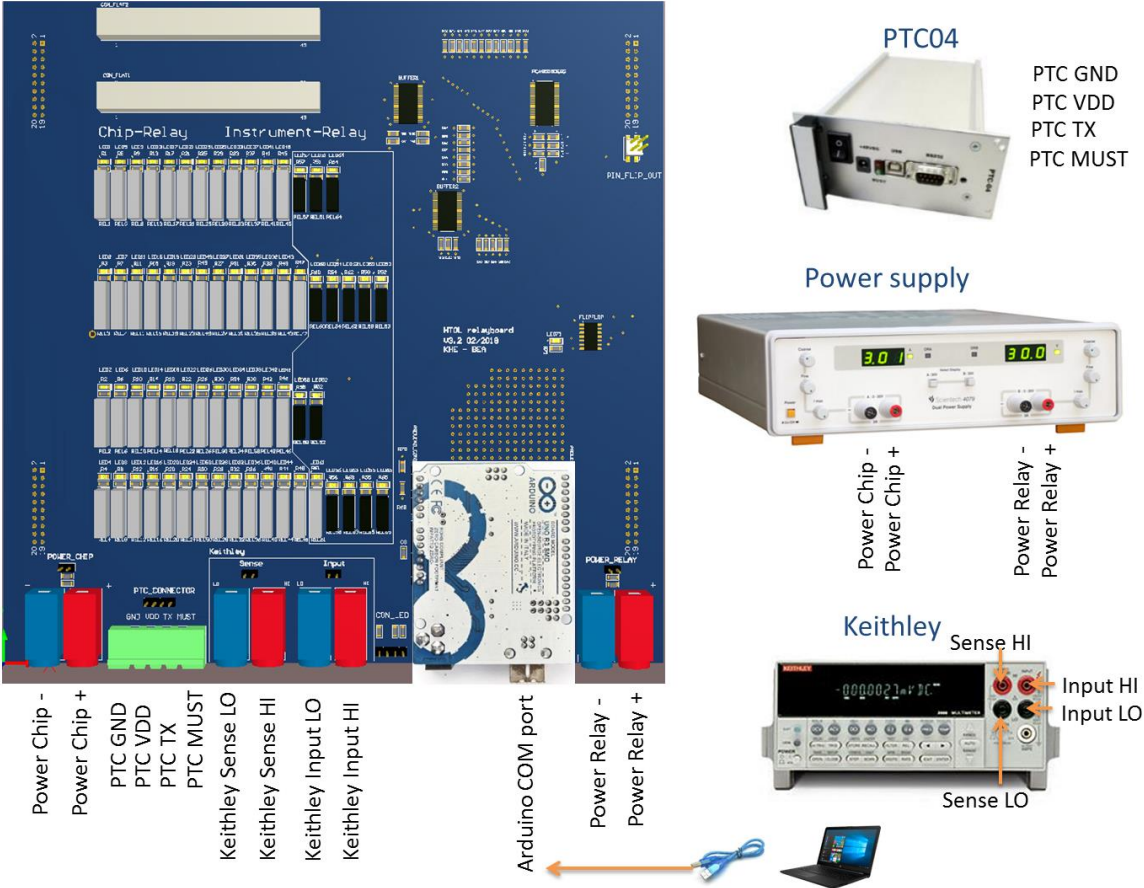
3.3.3 Hardware implementatie

In figuur 51 is de layout van het relais-PCB weergegeven. Dit is een 4-lagen PCB van 214 mm op 211 mm met een standaard koperdikte van 35µm. De buitenlagen worden gebruikt voor de routing. De eerste binnenlaag is gebruikt als voedingsvlak voor het relaisbord, terwijl de tweede binnenlaag is gebruikt als grondvlak. Dit vlak is wel opgesplitst in twee grondvlakken respectievelijk voor de relais- en chipborden. Er zijn 50 relais aanwezig voor de chipmatrix en 15 relais voor de instrumentenmatrix. De relaisborden worden gestapeld door middel van enkele vrouwelijke sockets en SMD pin headers. Hiervoor is er gebruik van SSQ socket en HW-SM pin header van Samtec en KFM socket van Sullins Microplastics. De instrumenten kunnen onderaan aangesloten worden door middel van bananenstekkers en pinconnectoren. Er zijn ook twee aansluitingen voorzien voor de voedingsbronnen van de gestapelde relais en chipborden. De relaisborden werken op 5V terwijl de chipborden afhankelijk zijn van de chip types. De Arduino UNO kan geplugd worden op de pin headers. Wel is deze gemodificeerd om de voeding te verzorgen via het relaisbord en niet via de USB-kabel. Elk relais is ook uitgerust met een led om debugging te vergemakkelijken. Een status-led is ook voorzien en rechtstreeks aangesloten op de Arduino UNO.



Figuur 51: Layout weergave van de relais-PCB

In figuur 52 is een overzicht weergegeven in 3D-formaat. In deze schematische weergave wordt er weergegeven hoe de instrumenten en voedingsbronnen moeten aangesloten worden op het relaisbord. Merk op dat de deze toestellen enkel aangesloten worden op het onderste relaisbord die voorzien is van relais voor schakeling van instrumenten (instrumentenmatrix). De Arduino wordt aangesloten op de computer door middel van een USB-kabel. Voor meer gedetailleerde informatie over de hardware kan de handleiding geraadpleegd worden zoals weergegeven in bijlage B.



Figuur 52: Overzicht hardware

4 Software ontwerp

De software stelt de gebruiker in staat om de chips te karakteriseren en te valideren. Hierbij wordt er gebruik gemaakt van enerzijds de Labview-software en anderzijds de Arduino-software. De Labview-software is een grafische user interface die mogelijk maakt om projecten met chips aan te maken. Deze chips worden gekarakteriseerd op basis van een gedefinieerd test patroon. De seriële communicatie met de Arduino wordt gebruikt om commando's door te sturen om verschillende relais te schakelen. De Arduino-software decodeert deze commando's en controleert bepaalde output-pinnen. In dit hoofdstuk zal eerst een introductie gegeven worden over de Arduino-software. Hierna zal er een gedetailleerde informatie volgen over de Labview-software.

4.1 Arduino software

De Arduino-software is in staat om bepaalde commando's te decoderen. De software kan onderscheiden worden in twee delen: de setup en de loop. De setup wordt enkel bij de opstart uitgevoerd. In deze fase worden bepaalde digitale pinnen als output gedefinieerd en gecontroleerd. Ook wordt de Wire-bibliotheek aangesproken om de I2C-bus toe te treden als master. De interne pull-up weerstanden op de SDA en SCL-lijnen worden uitgezet omdat deze weerstanden al voorzien zijn op het onderste relaisbord. De gegevensnelheid voor de seriële communicatie wordt ook ingesteld.

De loop-fase is een seriële listener. De seriële poort wordt geobserveerd om eventuele commando's te decoderen. De commando's worden ingelezen met de Serial.readBytesUntil functie. Hierbij wordt elke seriële ingang gelezen tot aan het "\n" karakter. Om eventuele heap fragmentatie te vermijden wordt er gebruik gemaakt van C-strings en niet de String klasse. In tabel 10 wordt een overzicht weergegeven van mogelijke seriële commando's. Elk commando bestaat uit een voorvoegsel (...&) die het eerste gecontroleerd wordt. Hierna worden de eventuele parameters gedecodeerd die gescheiden zijn met komma's. Op basis van deze commando's zal de Arduino de juiste relais schakelen en andere handelingen uitvoeren.

Tabel 10: Seriële commando's

Commando	Betekenis
FL& bordnummer	Het FL-commando controleert enkele digitale pinnen om een bepaalde PCA9505/relaisbord te selecteren aan de hand van de D-flipflops.
RES&	Het RES-commando reset alle PCA9505. Hierdoor gaan alle relais in default state.
S1& register,value1	Het S1-commando schrijft welbepaalde data naar een register m.b.v. de I2C-protocol. Dit is ook besproken in de sectie 3.3.2.2.
S3& register,value1,value2,value3	Het S3-commando schrijft 3 banken data naar 3 registers m.b.v. het I2C-protocol. Hierbij wordt er gebruik gemaakt van de auto-increment functie voor de register waarde. Dit is ook besproken in de sectie 3.3.2.2.

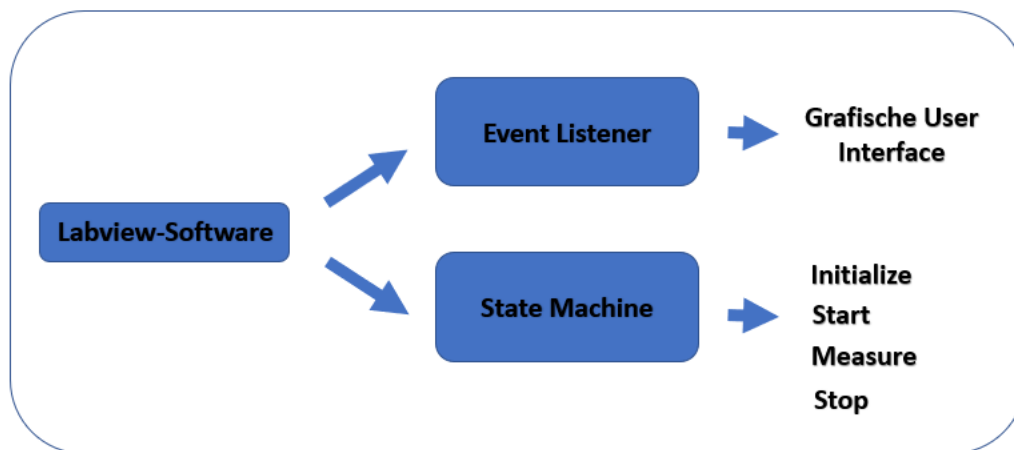
LEDR& LEDG& LEDB&	De LED-commando's controleren de status-led die verbonden is met de Arduino UNO. Deze kan gezet worden in een bepaalde RGB-kleur.
LEDRESET&	De LEDRESET-commando reset de status-led.
COM&	De COM-commando wordt gebruikt voor de auto-detectie feature.

4.2 Labview software

De Labview-software stelt de gebruiker in staat om verschillende projecten aan te maken met chips die getest moeten worden. Deze projecten worden opgenomen in een testlus waarbij er een periodische karakterisatie uitgevoerd wordt. Dit wordt gedaan door seriële commando's door te sturen naar de Arduino en de meetinstrumenten aan te spreken. De metingen kunnen real-time gevolgd worden in enkele grafieken. De metingen worden ook geschreven naar een specifiek CSV-bestand dat op zijn beurt gefilterd en gevisualiseerd kan worden in de grafische user interface. In het eerste deel wordt meer informatie gegeven over de architectuur van het programma. Daarna zal de grafische user interface besproken worden. Ten slotte zal er uitgelegd worden hoe een nieuw test type aangemaakt kan worden.

4.2.1 Architectuur

Een overzicht van de architectuur is weergegeven in figuur 53. Hierbij wordt een onderscheid gemaakt tussen de event lus en de eindige toestandsmachine (finite state machine). Deze twee lussen lopen volledig parallel en bestaan typisch uit verschillende onderdelen.



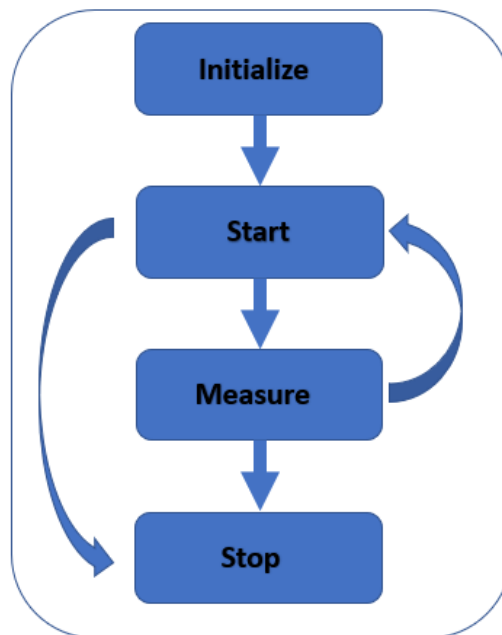
Figuur 53: Labview architectuur

4.2.1.1 Event listener

De event lus wordt gebruikt om verschillende gebeurtenissen af te handelen. Aan verschillende elementen in de grafische user interface zijn event listeners gekoppeld. Op basis van "value change" en "mouse up" events worden specifieke handelingen uitgevoerd. Deze worden meestal door de gebruiker zelf opgeroepen. Uitzonderlijk kunnen binnen de toestandsmachine ook bepaalde events opgeroepen worden.

4.2.1.2 State machine

De toestandsmachine bestaat uit 4 onderdelen: “initialize”, “start”, “measure” en “stop” fase. Een *flowchart* is weergegeven in figuur 54.



Figuur 54: Flowchart van de toestandsmachine

Initialize

In deze stap worden alle velden en globale variabelen gewist zodat een nieuwe start van het programma kan gebeuren. Hiernaast wordt de Arduino COM poort automatisch gedetecteerd door alle poorten te pollen. Het COM-commando wordt gebruikt bij deze actie. Op basis van de feedback die verkregen wordt, is het mogelijk te bepalen welke poort tot de Arduino behoort en te initialiseren. Ook wordt de selectie string voor het test type aangepast. Het test type dat geselecteerd kan worden bij het aanmaken van een project, is gebaseerd op VI's die dynamisch opgeroepen kunnen worden. Deze worden gebundeld in de test map. Daarom wordt er in de initialisatie fase even gecontroleerd welke VI's aanwezig zijn.

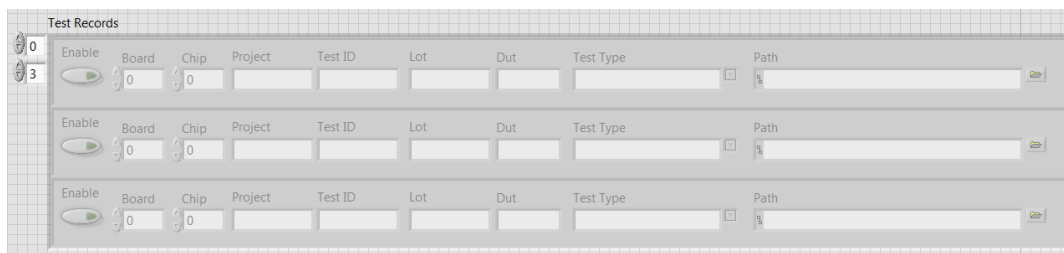
De software is zodanig ontwikkeld dat bij een mogelijke crash van het programma, de software opnieuw opgestart kan worden en verder kan gaan met alle projecten. Daarom worden alle nodige gegevens opgeslagen in een INI-bestand en een configuratie CSV-bestand. Het INI-bestand bevat alle initialisatie gegevens over de instrumenten, de frequentie van de metingen en het pad van het configuratie CSV-bestand. Het configuratie CSV-bestand bevat alle informatie over de projecten met de bijhorende chips. In de initialisatie fase wordt er daarom altijd gecontroleerd of een INI-bestand aanwezig is in de project map. Dit wijst erop dat er een voorgaande configuratie aanwezig is. Indien aanwezig, kan het systeem op basis van dit bestand automatisch initialisaties uitvoeren van de instrumenten en alle velden invullen in de initialisatie-tab van de user interface. De projecten zullen dan ook automatisch ingevuld worden op basis van de configuratie CSV-bestand.

Start

Na de initialize fase zal het systeem overgaan de start fase. Dit is in principe een lege fase om ervoor te zorgen dat het systeem niet onmiddellijk begint met de metingen na de initialisatie. Er wordt een user input verwacht. De gebruiker kan overgaan naar de measure of de stop fase door respectievelijk te drukken op de start of de stop knop.

Measure

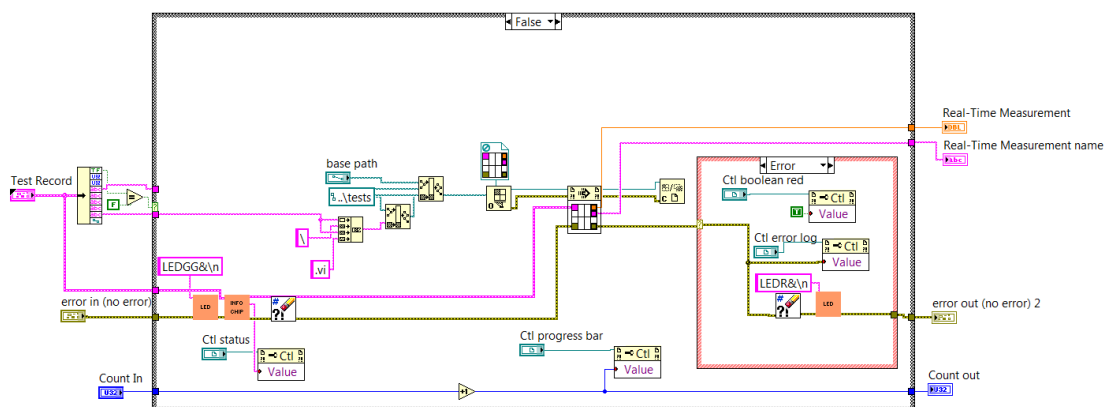
De measure fase wordt gebruikt om de projecten met verschillende chips te karakteriseren. Alle projecten worden opgeslagen in een globale variabele die een 2D array van clusters voorstelt. In figuur 55 is deze datastructuur weergegeven. Elk cluster, die bestaat uit enkele parameters, specificeert een welbepaalde chip. Alle clusters die in een rij voorkomen, horen tot eenzelfde project.



0	Enable	Board	Chip	Project	Test ID	Lot	Dut	Test Type	Path
3	<input type="checkbox"/>	0	0						
	<input type="checkbox"/>	0	0						
	<input type="checkbox"/>	0	0						

Figuur 55: Datastructuur voor projecten

Door middel van twee for-lussen kunnen deze clusters één voor één opgehaald worden. Voor elke cluster of chip wordt er eerst naar de test type gekeken. Deze bepaalt aan welke test de chip onderworpen zal worden. Zoals uitgelegd in de initialize fase, is deze test een VI die dynamisch opgeroepen wordt. Op basis van het test type, wordt eerst een pad naar de VI opgebouwd om daarna deze op te roepen met behulp van de Call By Reference methode. De Labview code is weergegeven in figuur 56. Het opgeroepen test type VI bepaalt de sequentie van metingen en schrijft deze metingen ook weg naar een logfile. Merk op dat elk test type VI zelfde in- en uitgangen heeft. Als ingang wordt de chip cluster verwacht zoals weergegeven in figuur 55. Als uitgang wordt er een real-time parameter en naam voorzien. Dit is de belangrijkste meting van de VI. Deze parameter wordt dan ook lokaal opgeslagen en gebruikt bij visualisaties van de projecten in de user interface. De error lijn wordt ook altijd gewist na een fout. Dit om ervoor te zorgen dat het systeem verder kan gaan met de karakterisatie van andere chips en eventueel het probleem zelf kan oplossen.



Figuur 56: Labview-code voor dynamisch oproeping van een test VI

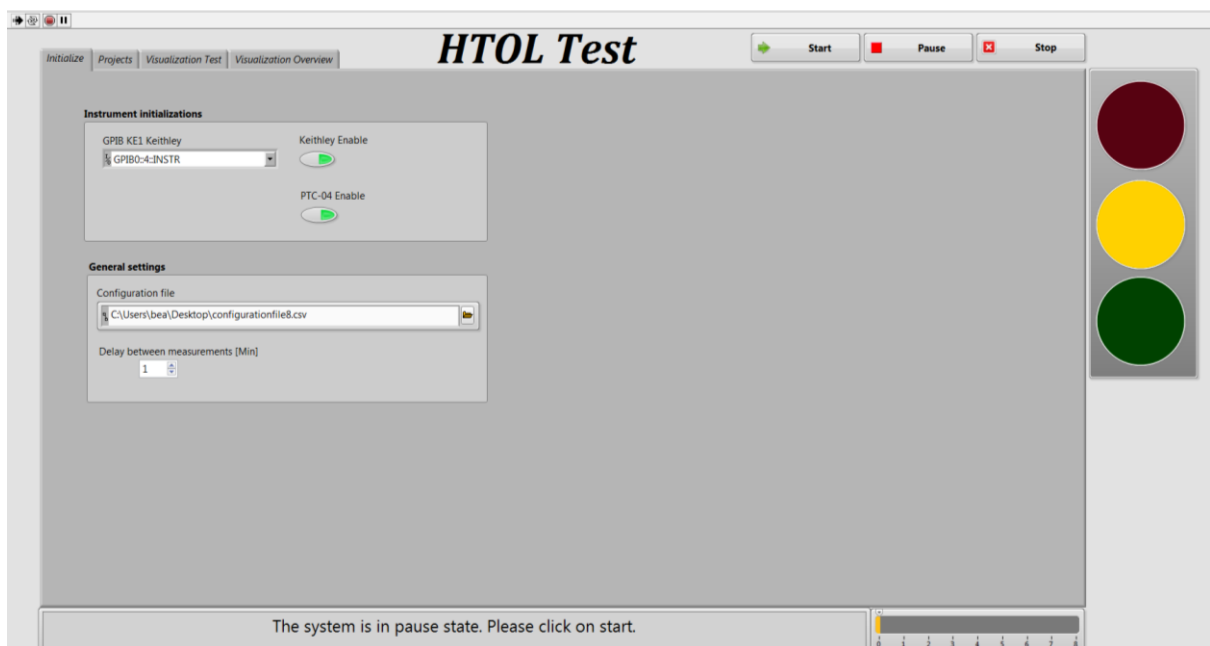
Nadat alle projecten gekarakteriseerd zijn, zal het systeem overgaan naar een stand-by toestand. Afhankelijk van de gekozen frequentie, zal er een bepaalde tijd gewacht worden vooraleer er opnieuw begonnen wordt met de metingen. De gebruiker kan het systeem pauzeren door over te gaan naar de start fase door te drukken op de pauze knop. Ook kan het systeem gestopt worden door over te gaan naar de stop fase door middel van de stop knop.

Stop

De stop fase wordt gebruikt om de toestandsmachine te stoppen. Hierbij worden de VISA sessies afgesloten met de Arduino en de meetinstrumenten.

4.2.2 User interface

De grafische user interface, zoals weergegeven in figuur 57, bestaat uit vier tabbladen: “initialize”, “projects”, “visualization test” en “visualization overview”. Naast de tabbladen zijn er ook enkele indicatie en controle elementen aanwezig. De drukknoppen kunnen gebruikt worden om de flow van het systeem te controleren. De verkeerslichten speciëren in welke staat het systeem zich bevindt. Bij een mogelijke error zal dit ook aangegeven worden door de rode led. De statusbalk en de progressie bar omschrijven de staat van de state machine meer in detail. Zo kan er gezien worden welk project en chip gekarakteriseerd wordt en nog hoeveel chips gekarakteriseerd moeten worden om over te gaan naar de stand-by toestand. In de komende onderdelen zullen er meer informatie gegeven worden over de verschillende tabbladen. Voor meer gedetailleerde informatie over de software kan de handleiding geraadpleegd worden zoals weergegeven in bijlage B.



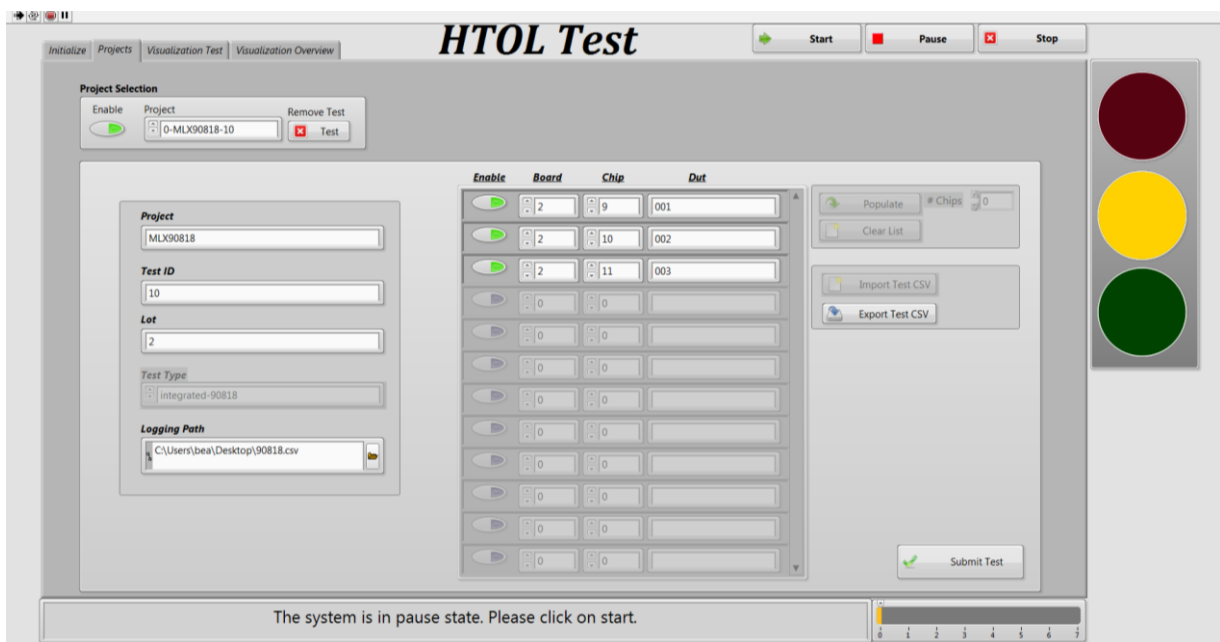
Figuur 57: Initialize-tab

4.2.2.1 Initialisatie

In figuur 57 is de initialisatie-tab weergegeven. In deze fase kan de gebruiker de nodige instrumenten initialiseren. Voor een Keithley multimeter moet de GPIB-poort geselecteerd worden vooraleer de initialisatie kan gebeuren m.b.v. de enable knop. Voor de PTC-04 programmer moet er niets geselecteerd worden omdat deze werkt met auto-detectie. Hiernaast wordt de frequentie van de metingen en het pad van de configuratie CSV-file gespecificeerd. Deze gegevens worden altijd geback-upt in een INI-bestand. Indien het systeem een INI-file detecteert bij opstart, zullen deze velden en knoppen automatisch initialiseren.

4.2.2.2 Projecten

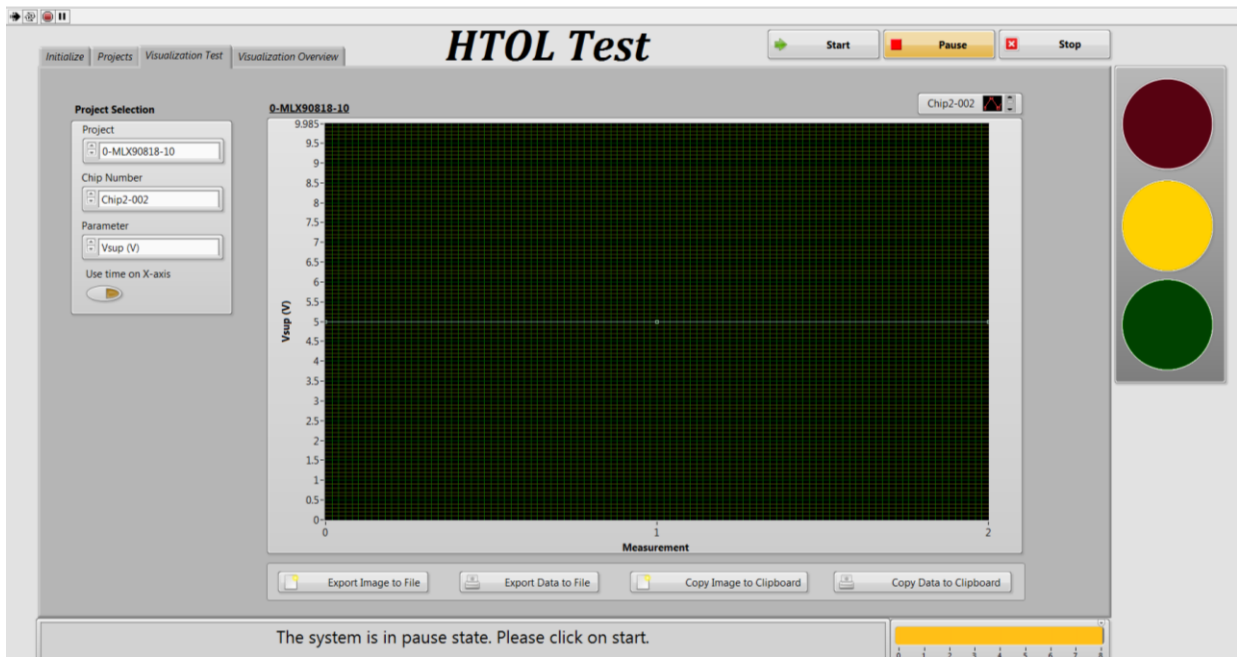
De projecten-tab, zoals weergegeven in figuur 58, kan gebruikt worden om een nieuw project toe te voegen. Hierbij kunnen de algemene velden over het project en de chiplijst gespecificeerd worden. Er kan ook gekozen worden om een project te importeren via een CSV-file. De bestaande projecten kunnen eveneens geraadpleegd worden. Eventuele modificaties kunnen doorgegeven worden. Een project kan geëxporteerd worden naar een CSV-bestand om deze later te kunnen importeren. Alle projecten worden altijd geback-upt in de configuratie CSV-bestand voor een eventuele latere import met behulp van de INI-file zoals uitgelegd in de sectie 4.2.1.2.



Figuur 58: Projects-tab

4.2.2.3 Visualisatie test

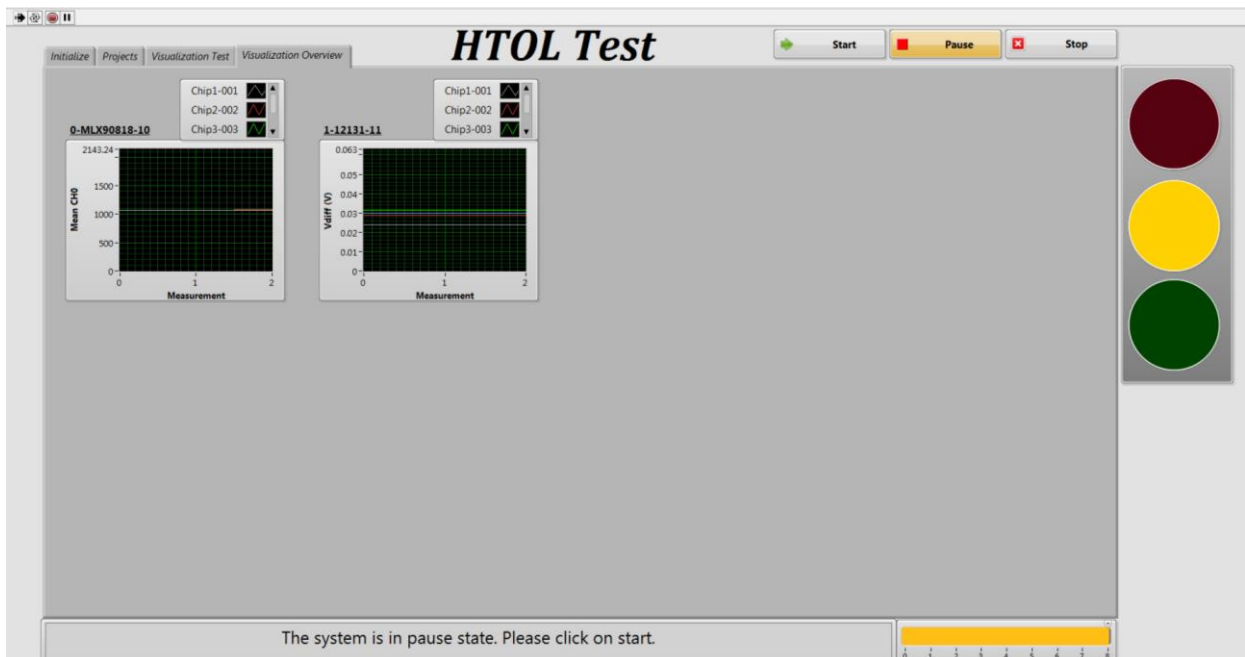
De metingen van verschillende projecten worden geschreven naar de gespecificeerde logfiles. Deze bestanden kunnen gevisualiseerd worden in deze tabblad. In figuur 59 is de visualisatie test-tab weergegeven. De gebruiker is in staat om een welbepaald project kiezen. Hierbij kan er gekozen worden welke chip en parameter gevisualiseerd zal worden. Het is ook mogelijk om alle chips binnen het project te plotten in één grafiek. De X-as is standaard weergegeven in metingen. Deze kan optioneel geconverteerd worden naar een tijdsschaal. Alle grafieken en data kunnen eveneens geëxporteerd of gekopieerd worden om verdere analyses te doen en rapporten op te maken in Excel.



Figuur 59: Visualization test-tab

4.2.2.4 Visualisatie overzicht

Naast de visualisaties van de logfiles in de vorige tab, kunnen alle projecten in een oogopslag worden bekeken in de visualisatie overzicht-tab. Deze grafieken worden dynamisch opgebouwd en aangemaakt op basis van aantal projecten. De belangrijkste parameter die op zijn beurt gedefinieerd wordt in de test type VI, wordt weergegeven voor alle chips in elk project. In figuur 60 zijn twee projecten weergegeven. Deze gegevens worden lokaal opgeslagen en zijn onafhankelijk van de logfiles.



Figuur 60: Visualization overview-tab

4.2.3 Toevoeging nieuw test type

Een nieuwe test type kan bijgevoegd worden door een nieuwe test VI aan te maken in de test map van het project. Hierbij moet er opgelet worden dat elk test in een afzonderlijke map terecht komt met een identieke naam als de VI. De template van de andere testen kan gebruikt worden om een nieuwe test aan te maken. De template bestaat uit een state machine met 3 fasen: initialize, measure en close. De initialize-fase wordt gebruikt om de relais te schakelen om een welbepaalde chip op de testbussen te zetten. Vervolgens wordt de sequentie van de metingen bepaald in de measure-fase. Hier worden de instrumentenmatrix geschakeld en metingen uitgevoerd. Deze metingen worden dan ook geschreven naar een logbestand in een gewenste volgorde. Enkele multifunctionele VI's zijn aangemaakt om te gebruiken in deze fase. Ten slotte wordt de stop-fase gebruikt om alle relais in default fase over te brengen zodanig dat het systeem klaar is voor de karakterisatie van de volgende chip. Merk op dat een test VI altijd gedefinieerd wordt voor één chip. Voor meer gedetailleerde informatie kan de handleiding geraadpleegd worden zoals weergegeven in bijlage B.

Het feit dat een test gedefinieerd wordt als een VI en dynamisch opgeroepen wordt, vergroot de schaalbaarheid van de software. Hierdoor kan er later eenvoudig nieuwe testen aangemaakt worden zonder het hoofdprogramma aan te passen. Dit is een cruciale meerwaarde omdat er verschillende manieren bestaan om de sensoren te karakteriseren.

5 Resultaten

Om de ontworpen HTOL-systeem te valideren, zijn er verschillende testen gedaan. In deze paragraaf worden de resultaten besproken van een HTOL-test die liep van 5 april 2018 16:27h tot en met 6 april 2018 09:43h. Deze test van 17 uren werd niet uitgevoerd in een omgeving met gecontroleerde druk en temperatuur, maar wel in een open labo omgeving. Er is een temperatuurvariatie van ≈ 5 °C waargenomen. De metingen zijn om de 5 minuten herhaald en er zijn twee projecten aangemaakt.

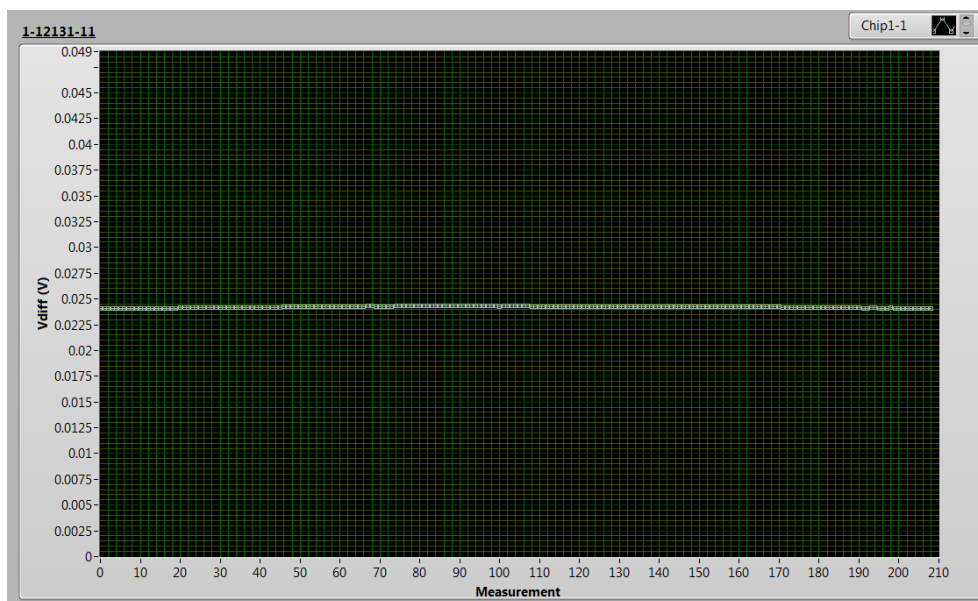
5.1 Karakterisatie 12131BC

Het eerste project 12131 is bestemd voor de karakterisatie van vier 12131BC discrete druksensoren. Zoals beschreven in paragraaf 2.2.3.1, worden deze sensoren typisch gekarakteriseerd door middel van vier spanningsmetingen: V_{inp} (V), V_{inm} (V), V_{diff} (V) en V_{sup} (V). Deze metingen zijn gedaan met behulp van de Keithley multimeter. Additioneel is de temperatuur van het chipbord opgemeten bij elke karakterisatie van een chip. In tabel 11 zijn deze metingen weergegeven. Merk op dat enkel 13 van de 834 records zijn weergegeven.

Tabel 11: Logfile 12131BC

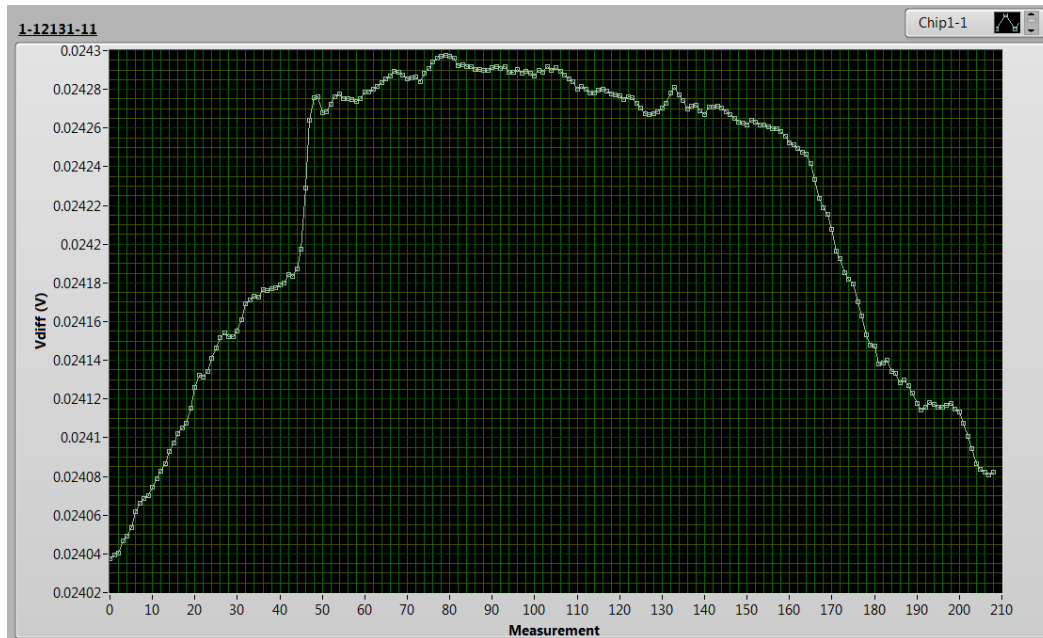
1	Time	Project	Test ID	Lot	DUT	Test Type	Board-Chip Nr	Vdiff (V)	Vinp (V)	Vinm (V)	Vsup (V)	Temp (°C)
2	5/04/2018 16:27	12131	11	195		1 discreet-12131BC	2--1	2,40376E-02	2,52609E+00	2,50205E+00	5,00142E+00	24,55
3	5/04/2018 16:27	12131	11	195		2 discreet-12131BC	2--2	2,90419E-02	2,52848E+00	2,49946E+00	5,00141E+00	24,55
4	5/04/2018 16:28	12131	11	195		3 discreet-12131BC	2--3	3,16330E-02	2,53062E+00	2,49898E+00	5,00140E+00	24,55
5	5/04/2018 16:28	12131	11	195		5 discreet-12131BC	2--4	3,00016E-02	2,52517E+00	2,49517E+00	5,00135E+00	24,55
6	5/04/2018 16:32	12131	11	195		1 discreet-12131BC	2--1	2,40395E-02	2,52608E+00	2,50205E+00	5,00138E+00	24,61
7	5/04/2018 16:32	12131	11	195		2 discreet-12131BC	2--2	2,90423E-02	2,52847E+00	2,49943E+00	5,00138E+00	24,61
8	5/04/2018 16:33	12131	11	195		3 discreet-12131BC	2--3	3,16315E-02	2,53059E+00	2,49897E+00	5,00135E+00	24,61
9	5/04/2018 16:33	12131	11	195		5 discreet-12131BC	2--4	2,99996E-02	2,52513E+00	2,49515E+00	5,00133E+00	24,61
10	5/04/2018 16:37	12131	11	195		1 discreet-12131BC	2--1	2,40406E-02	2,52607E+00	2,50201E+00	5,00137E+00	24,62
11	5/04/2018 16:37	12131	11	195		2 discreet-12131BC	2--2	2,90433E-02	2,52848E+00	2,49943E+00	5,00139E+00	24,62
12	5/04/2018 16:38	12131	11	195		3 discreet-12131BC	2--3	3,16332E-02	2,53058E+00	2,49896E+00	5,00134E+00	24,62
13	5/04/2018 16:38	12131	11	195		5 discreet-12131BC	2--4	2,99998E-02	2,52514E+00	2,49514E+00	5,00133E+00	24,62

De Labview-software wordt gebruikt om de logfile te visualiseren. In de visualisatie test-tab wordt dit project gekozen. In figuur 61 is de differentiële uitgangspanning V_{diff} (V) van de chip met DUT-string 1 gevisualiseerd gedurende 17 uren. Deze waarde begint vanaf 24,04 mV.



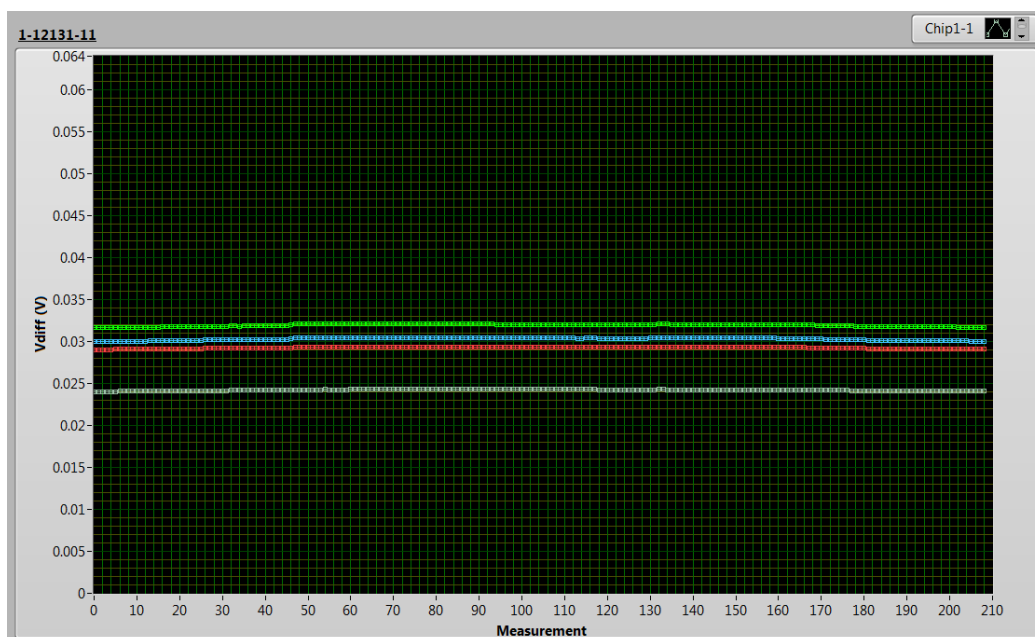
Figuur 61: Visualisatie chip 1 – 12131

De grafiek kan meer in detail bekeken worden door de autoscale aan te zetten. In figuur 62 is een meer gedetailleerde grafiek weergegeven van de voorgaande visualisatie. Gedurende 209 metingen is er maximaal een drift van 0,26 mV waargenomen. Op basis van de geëxporteerde data kan deze grafiek in Excel omgezet worden in een procentuele driftgrafiek met mogelijke compensatiefactoren.



Figuur 62: Visualisatie chip 1 – 12131 - detail

Alle chips binnen het project 12131 worden gevisualiseerd in figuur 63. Elk kleur representeert een chip waarbij de DUT namen worden opgenomen in de legende rechtsboven. Optioneel is het mogelijk om welbepaalde chips uit te zetten. Het is waar te nemen dat elke chip een typisch offset waarde heeft.



Figuur 63: Visualisatie alle chips – 12131

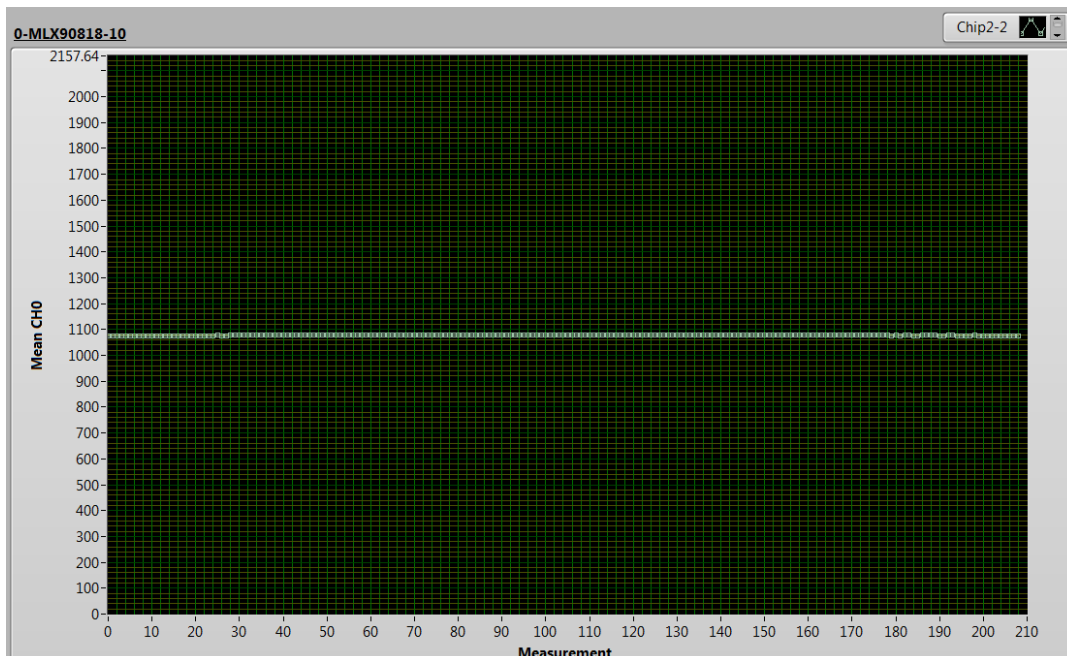
5.2 Karakterisatie MLX90818

Het tweede project MLX90818 is bestemd voor de karakterisatie van vier MLX90818 geïntegreerde, absolute druksensoren. Zoals beschreven in paragraaf 2.2.3.2, kunnen deze sensoren op verschillende manieren uitgetest worden. Voor deze karakterisatie is er gekozen om de TX of SENT output te loggen in de applicatiemodus. Deze metingen zijn gedaan met behulp van de PTC-04 programmer. Er worden telkens 50 SENT lezingen gedaan om daarna minima, maxima en gemiddelde te nemen van channel 0, dat typisch bestemd is voor de druk. Hiernaast is de voedingspanning ook telkens opgemeten met Keithley multimeter. In tabel 12 zijn deze metingen weergegeven. Merk op dat weer enkel 13 van de 834 records zijn weergegeven.

Tabel 12: Logfile MLX90818

1	Time	Project	Test ID	Lot	DUT	Test Type	Board-Chip Nr	Vsup (V)	Min CH0	Max CH0	CRC	Mean CH0
2	5/04/2018 16:27	MLX90818	10	2	1	integrated-90818	2--9	4,99211E+00	1079	1078	TRUE	1078,92
3	5/04/2018 16:27	MLX90818	10	2	2	integrated-90818	2--10	4,99253E+00	1076	1075	TRUE	1075,28
4	5/04/2018 16:27	MLX90818	10	2	3	integrated-90818	2--11	4,99254E+00	1073	1072	TRUE	1072,10
5	5/04/2018 16:27	MLX90818	10	2	4	integrated-90818	2--12	4,99215E+00	1077	1076	TRUE	1076,66
6	5/04/2018 16:32	MLX90818	10	2	1	integrated-90818	2--9	4,99204E+00	1080	1078	TRUE	1079,00
7	5/04/2018 16:32	MLX90818	10	2	2	integrated-90818	2--10	4,99250E+00	1076	1075	TRUE	1075,52
8	5/04/2018 16:32	MLX90818	10	2	3	integrated-90818	2--11	4,99254E+00	1073	1072	TRUE	1072,08
9	5/04/2018 16:32	MLX90818	10	2	4	integrated-90818	2--12	4,99216E+00	1078	1076	TRUE	1076,92
10	5/04/2018 16:37	MLX90818	10	2	1	integrated-90818	2--9	4,99206E+00	1079	1078	TRUE	1078,94
11	5/04/2018 16:37	MLX90818	10	2	2	integrated-90818	2--10	4,99247E+00	1076	1075	TRUE	1075,30
12	5/04/2018 16:37	MLX90818	10	2	3	integrated-90818	2--11	4,99252E+00	1073	1071	TRUE	1072,04
13	5/04/2018 16:37	MLX90818	10	2	4	integrated-90818	2--12	4,99213E+00	1078	1077	TRUE	1077,08

De Labview-software wordt opnieuw gebruikt om de logfile te visualiseren. In de visualisatie test-tab wordt dit project gekozen. In figuur 64 is de gemiddelde waarde van channel 0 van de chip met DUT-string 2 gevisualiseerd gedurende 17 uren. Deze waarde begint vanaf 1075,28 eenheden.



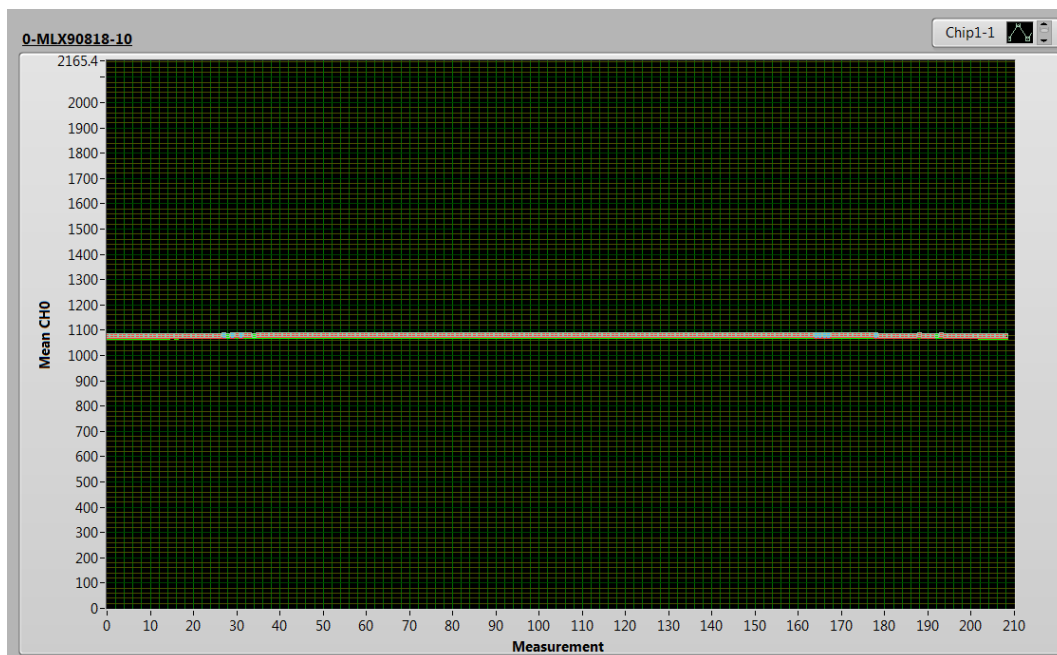
Figuur 64: Visualisatie chip 2 – MLX90818

De grafiek, zoals weergegeven in figuur 65, wordt meer in detail bekeken met behulp van autoscale-functie. Gedurende 209 metingen is er maximaal een drift van 3,6 eenheden waargenomen. Dit kan met behulp van de transfertfuncties gerelateerd worden met de druk en verdere analyses gedaan worden in Excel.



Figuur 65: Visualisatie chip 2 – MLX90818 - detail

Alle chips binnen het project MLX90818 wordt gevisualiseerd in figuur 66. Elk kleur representeert een chip waarbij de DUT namen worden opgenomen in de legende rechtsboven. Merk op dat de verschillende curves op elkaar staan. De autoscale kan gebruikt worden om deze te onderscheiden.



Figuur 66: Visualisatie alle chips – MLX90818

6 Besluit

Het bestaande HTOL-systeem is vervangen door een meer flexibel en modulair HTOL-setup. In het kader van deze masterproef is men geslaagd om een modulaire testopstelling te ontwerpen die mogelijk maakt om zowel discrete als geïntegreerde sensoren te karakteriseren en te verifiëren met behulp van één laptop en twee meetinstrumenten. De sensoren kunnen ingeplugd worden op de chipborden die gestapeld worden in de ovens of klimaatkamers. Deze zijn zodanig ontwikkeld om verschillende types sensoren te karakteriseren. Additioneel kan er gebruik gemaakt worden van de adapter-PCB's om chips met kleinere packages te kunnen inpluggen. De chipborden worden met behulp van flat cables verbonden met een stapel van relaisborden die de nodige elektrische verbindingen realiseert tussen de sensoren en de meetinstrumenten. De aansturing van het systeem gebeurt op basis van seriële communicatie tussen de Arduino en de Labview-software. Hierbij is de Arduino een seriële listener die de ontvangen commando's decodeert en zijn uitgangen controleert. De grafische user interface in Labview stelt de gebruiker in staat om projecten met verschillende chips aan te maken. Deze worden gelogd in specifieke CSV-bestanden, die op hun beurt gevisualiseerd kunnen worden in de software. De Product Verificatie ingenieurs kunnen op basis van deze gegevens en visualisaties nagaan hoe de sensoren zich gedragen tijdens de HTOL-test. De testrapporten kunnen eenvoudig opgemaakt worden door gebruik te maken van export tools van de data en de grafieken.

De vooropgestelde doelstellingen zijn bereikt, maar net zoals elk project kunnen er altijd verdere optimalisaties worden voorzien. Er is veel energie ingestoken in de ontwerpen van de PCB's om deze zo compact mogelijk te ontwikkelen. De layouts kunnen eventueel nog herzien worden om nog compactere PCB's te vervaardigen. De software is robuust en gebruiksvriendelijk opgebouwd. Om de rapportering extra te automatiseren, kan er mogelijkwijze nog een functionaliteit worden voorzien om per project een kant-en-klaar rapport te genereren met de gewenste visualisaties.

Referenties

- [1] Melexis, „Inspired Engineering”, [Online]. Available: <https://www.melexis.com/en/about-us>.
- [2] Joint Electron Device Engineering Council (JEDEC), „Temperature, Bias and Operating Life”, P6-10, Juli, 2017.
- [3] Automotive Electronics Council (AEC), „Stress Test Qualification for Integrated Circuits Rev-H”, P6-40, September 11, 2004.
- [4] Arduino, „Arduino UNO R3”, 2018. [Online]. Available: <https://store.arduino.cc/usa/arduino-uno-rev3>.
- [5] Keithley, „Keithley 2000 Series: 6½-Digit Multimeter Datasheet”, P1.
- [6] National Instruments, „GPIB-USB-HS - GPIB Instrument Control Device”, [Online]. Available: <http://www.ni.com/nl-be/support/model.gpib-usb-hs-.html>.
- [7] NXP Semiconductors, „Datasheet PCA9505/06”, P1-2, 3 Augustus 2010.
- [8] Texas Instruments, „Datasheet SN54ABT16244, SN74ABT16244A 16-Bit Buffers/Drivers”, P1-2, Augustus 2005.
- [9] Melexis, „PTC04 Programmer for Melexis PTC Devices”, P1-11, December 2014.
- [10] Wikipedia, „High-temperature operating life”, 6 Maart 2018. [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/High-temperature_operating_life.
- [11] R. E. Bicking, „Fundamentals of Pressure Sensor Technology”, 1 November 1998. [Online]. Available: <https://www.sensormag.com/components/fundamentals-pressure-sensor-technology>.
- [12] All Sensors Corporation, „Pressure Sensor Technologies”, [Online]. Available: <https://allsensors.com/engineering-resources/white-papers/pressure-point-9-pressure-sensor-technologies>.
- [13] Wikipedia, „Pressure sensor”, 6 April 2018. [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Pressure_sensor.
- [14] Melexis, „Datasheet MLX90816 - Discrete Absolute Pressure Sensor”, 24 maart 2017.
- [15] Melexis, „Datasheet MLX90809 - Relative Pressure Sensor”, Juli 2017.
- [16] T. White, „A Tutorial for the Digital SENT Interface”, 2014.

- [17] Sparkfun, „I2C Tutorial”, [Online]. Available: <https://learn.sparkfun.com/tutorials/i2c>.
- [18] J. B. Jonathan Valdez, „Understanding the I2C-bus”, P2-3, Juni 2015.
- [19] J. D. Chris Parris, „Design calculations for robust I2C communications”, 18 April 2012. [Online]. Available: <https://www.edn.com/design/analog/4371297/Design-calculations-for-robust-I2C-communications>.
- [20] Atmel, „Datasheet ATmega328/P”, P366-390, November,2016.
- [21] NXP, „I2C-bus specification and user manual”, P48-56, 4 April 2014.
- [22] Capgo Semiconductor, „Introduction to Semiconductor Temperature Sensors”, 2013.
- [23] Maxim Integrated, „DS18B20 - Programmable Resolution 1-Wire Digital Thermometer”, P1, Januari 2015.
- [24] R. Cavaliere, „Temperature Sensors”, 14 April 2011. [Online]. Available: <http://www.sensorwiki.org/doku.php/sensors/temperature>.
- [25] M. P.-K. M. Radojle Radetić, „The Analog Linearization of Pt100 Working Characteristic”, P345-347, Oktober,2015.
- [26] Alexander Wiegand SE, „Callendar-Van Dusen equations for the calibration of platinum resistance thermometers”, Augustus,2014.
- [27] Kongsberg Maritime, „Platinum resistance temperature sensor Pt100/1000”.
- [28] Pentronic, „The effect of 2,3 or 4 wire connection using Pt100/RTD's”, 10 Oktober 2006. [Online]. Available: https://pentronic.se/media/18857/The_effect_of_2_3_4_wires_on_Pt100_060210.pdf.
- [29] National Instruments, „Overview of Temperature Sensors”, [Online]. Available: <http://sine.ni.com/np/app/main/p/ap/daq/lang/en/pg/1/sn/n17:daq,n21:17557/fmid/6681/>.
- [30] Aries Electronics, „High-Temp (250°C) Universal ZIF DIP Burn-In & Test Socket”, P1.
- [31] Plastronics, „Standard QFN Clamshell”, [Online]. Available: <http://plastronics.com/catalog/standard-qfn-clamshell/>.
- [32] A. Jason Howie, „Via Stitching and Via Shielding”, 20 April 2017. [Online]. Available: [https://www.altium.com/documentation/15.1/display/ADES/\(\(Via+Stitching+and+Via+Shielding\)\)_AD](https://www.altium.com/documentation/15.1/display/ADES/((Via+Stitching+and+Via+Shielding))_AD).
- [33] Pickering, „Micro-SIL® SIL/SIP Reed Relays”, P1-2, 2017.
- [34] Pickering, „Single-in-Line SIL/SIP Reed Relays”, P1-2, 2017.

[35 ElectronicsTutorials, „The Shift Register”, [Online]. Available: https://www.electronicstutorials.ws/sequential/seq_5.html.]

Bijlagen

Bijlage A: AEC-Q100 kwalificatie test plan	76
Bijlage B: Handleiding HTOL-setup	77

Bijlage A: AEC-Q100 kwalificatie test plan

AEC - Q100 - REV-H
September 11, 2014

Automotive Electronics Council Component Technical Committee

Appendix Template 4A: AEC-Q100 Qualification Test Plan

Q100H QUALIFICATION TEST PLAN							
USER COMPANY:				DATE:			
USER P/N:				TRACKING NUMBER:			
USER SPEC #:				USER COMPONENT ENGINEER:			
SUPPLIER COMPANY:				SUPPLIER MANUFACTURING SITES:			
SUPPLIER P/N:				PPAP SUBMISSION DATE:			
SUPPLIER FAMILY TYPE:				REASON FOR QUALIFICATION:			
STRESS TEST	ABV	TEST#	TEST METHOD	Test Conditions/S.S. per Lot/# Lots (identify temp, RH, & bias)	REQUIREMENTS		RESULTS Fails/S.S./# lots
					S.S	# LOTS	
Preconditioning	PC	A1	JEDEC J-STD-020	Peak Reflow Temp. = Preconditioning used =	Min. MSL = 3		MSL =
Temperature Humidity Bias or HAST	THB / HAST	A2	JESD22-A101/A110		77	3	
Autoclave or Unbiased HAST	AC / UHST	A3	JESD22-A102/A118		77	3	
Temperature Cycle	TC	A4	JESD22-A104		77	3	
Power Temperature Cycling	PTC	A5	JESD22-A105		45	1	
High Temperature Storage Life	HTSL	A6	JESD22-A103		45	1	
High Temperature Operating Life	HTOL	B1	JESD22-A108		77	3	
Early Life Failure Rate	ELFR	B2	AEC Q100-008		800	3	
NVM Endurance, Data Retention, & Operational Life	EDR	B3	AEC Q100-005		77	3	
Wire Bond Shear	WBS	C1	AEC Q100-001		5	1	
Wire Bond Pull Strength	WBP	C2	MIL-STD-883 - 2011		5	1	
Solderability	SD	C3	JESD22-B102 J-STD-002D	8 hr steam aging prior to testing	15	1	
Physical Dimensions	PD	C4	JESD22-B100/B108		10	3	
Solder Ball Shear	SBS	C5	AEC Q100-010		10	3	
Lead Integrity	LI	C6	JESD22-B105		5	1	
Electromigration	EM	D1					
Time Dependent Dielectric Breakdown	TDDB	D2					
Hot Carrier Injection	HCI	D3					
Negative Bias Temperature Instability	NBTI	D4					
Stress Migration	SM	D5					
Pre- and Post-Stress Electrical Test	TEST	E1	Test to spec				
ESD - Human Body Model	HBM	E2	AEC Q100-002		See Test Method		
ESD - Charged Device Model	CDM	E3	AEC Q100-011		See Test Method		
Latch-Up	LU	E4	AEC Q100-004		6	1	
Electrical Distributions	ED	E5	AEC Q100-009		30	3	
Fault Grading	FG	E6	AEC-Q100-007				
Characterization	CHAR	E7	AEC Q003				
Electromagnetic Compatibility	EMC	E9	SAE J1752/3		1	1	
Short Circuit Characterization	SC	E10	AEC Q100-012		10	3	
Soft Error Rate	SER	E11	JESD89-1, -2, -3		3	1	
Lead Free	LF	E12	Q005				
Process Average Test	PAT	F1	AEC Q001				
Statistical Bin/Yield Analysis	SBA	F2	AEC Q002				
Hermetic Package Tests	MECH	G1-4	Series		15	1	
Package Drop	DROP	G5			5	1	
Lid Torque	LT	G6	MIL-STD-883 - 2024		5	1	
Die Shear Strength	DS	G7	MIL-STD-883 - 2019		5	1	
Internal Water Vapor	IWV	G8	MIL-STD-883 - 1018		5	1	
Supplier:				Approved by: (User Engineer)			

Bijlage B: Handleiding HTOL-setup



User's guide **Second-generation modular and flexible HTOL setup**

Product Verification Department - bea/khe/nac

10/04/2018

VAT BE 0435.604.729

Transportstraat 1
3980 Tessenderlo
Phone: +32 13 67 07 95
Mobile: +32 491 15 74 18
Fax: +32 13 67 07 70
www.melexis.com

Contents

Introduction	3
1. Hardware.....	3
1.1. Equipment list	3
1.2. Graphical representation	4
1.2.1. Instrument connections to the main PCB	4
1.2.2. Instrument connections to the computer	5
1.2.3. Arduino remark.....	6
2. Software.....	7
2.1. Arduino drivers	7
2.2. Labview UI	8
2.2.1. Initialize	8
2.2.2. Projects.....	9
2.2.3. Visualization Test	12
2.2.4. Visualization Overview	13
2.2.5. Other indicators and controls	14
2.3. Adding a new test type.....	15

Introduction

This is a user's manual for the second-generation modular and flexible HTOL setup, developed by Product Verification Department in Tessenderlo, Belgium. This setup is able to characterize both discrete and integrated pressure sensors of Melexis. For questions, please do not hesitate to contact Kevin Haesevoets (khe@melexis.com) or Nard Achten (nac@melexis.com).

1. Hardware

The main hardware consists of a pair of PCB's connected together through two high-temp flat cables. The chip-PCB's can be stacked in the oven and the relay-PCB's can be stacked outside. It's very important to notice that the instruments are connected to the bottom relay-PCB, which is equipped with the necessary connectors.

1.1. Equipment list

Equipment	Remark
Relay-PCB	Outside oven
Chip-PCB	Inside oven
High-temp flat cables	2 for each pair
Adapters	For integrated chips
Arduino Uno	Connected to the laptop through USB cable
Keithley multimeter	Connected to the laptop through GPIB cable, optional
PTC-04 programmer	Connected to the laptop through USB cable, optional
Dual power supply	Separate power for both PCB stacks
Laptop	Labview and PTC-04 drivers installed

User's guide

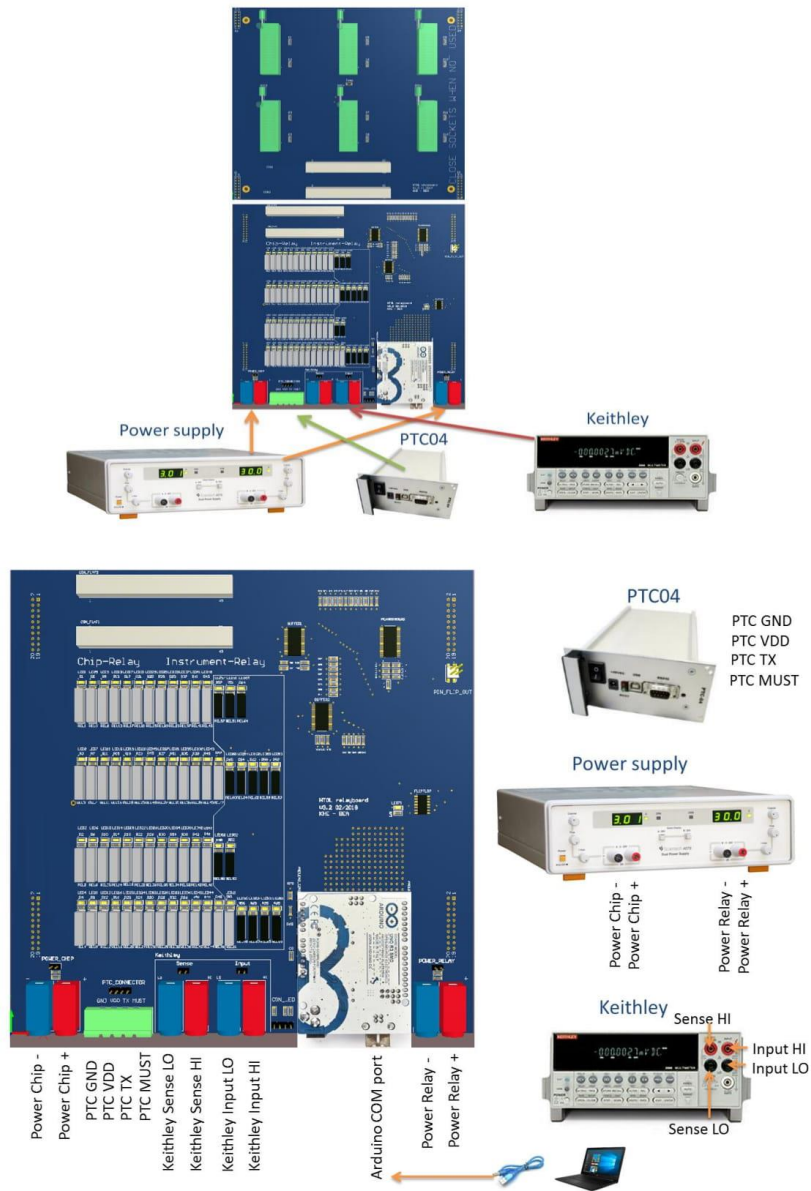
Second-generation modular and flexible HTOL setup



1.2. Graphical representation

1.2.1. Instrument connections to the main PCB

The next representations show how the instruments need to be connected to the bottom relay-PCB.



User's guide

Second-generation modular and flexible HTOL setup



- Keithley multimeter
 - Input HI and LO (red and black) need to be connected to the « input » section.
 - Sense HI and LO (red and black) need to be connected to the « sense » section. This is only needed if temperature monitoring is required.
- Dual power supply
 - First supply : negative and positive outputs (power relay – and +) need to be connected to the « power relay » section. The voltage level is 5V and this feeds the stack of relay-PCB's.

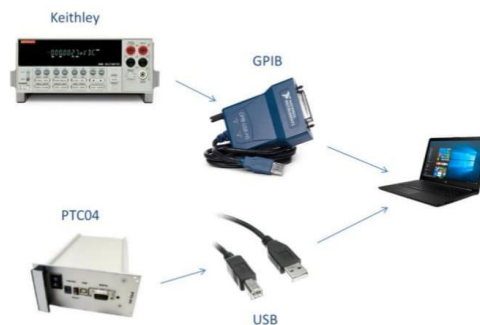
Optional : It's also possible to use the barrel jack connector under the Arduino. The wall adapter needs to be plugged into an electrical outlet 220V AC. Do not confuse this with the barrel jack of Arduino self.

 - Second supply : negative and positive outputs (power chip – and +) need to be connected to the « power chip » section. The voltage level is based on chip type and this feeds the stack of chip-PCB's.
- PTC-04 programmer
 - All necessary outputs (GND,VDD,TX,MUST) need to be connected to the « PTC Connector » section. The jumper wires can be used to connect the right pins to the green socket.
- Computer
 - The laptop is connected to the Arduino by USB cable.

1.2.2. Instrument connections to the computer

The PTC-04 programmer and Keithley multimeter needs to be connected to the computer.

- The Keithley multimeter is connected by GPIB instrument control device.
- The PTC-04 programmer is connected by simple USB cable.



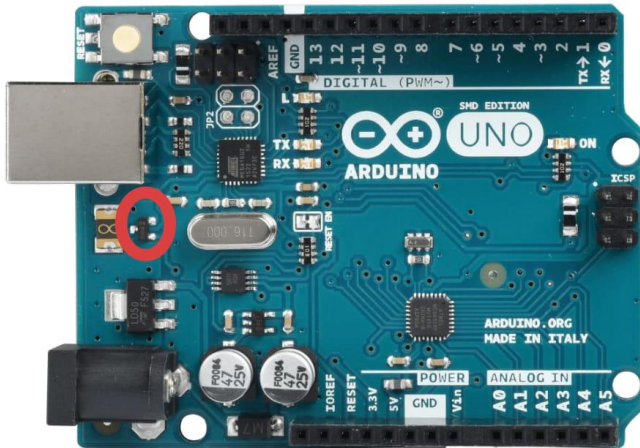
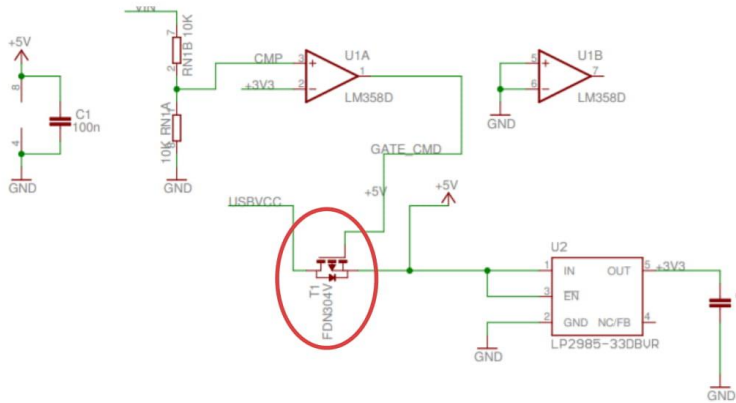
User's guide

Second-generation modular and flexible HTOL setup



1.2.3. Arduino remark

The Arduino UNO is plugged into the bottom relay-PCB. It's very important to be aware that this is a modified Arduino. The Arduino is not supplied by the USB port of the computer but the supply of relay-PCB's. To accomplish this, T1 transistor is desoldered from the Arduino.



Reference: <https://www.arduino.cc/en/uploads/Main/arduino-uno-schematic.pdf>

2. Software

2.1. Arduino drivers

If the Arduino IDE is installed on the computer, there is normally no need to install the drivers manually. If not, please install the Arduino IDE from Arduino.cc. This can be done by using the installer. This will automatically install the drivers. If other option is chosen (ZIP), please follow the next steps to install the drivers:

- Click on the Start Menu, and open up the Control Panel.
- While in the Control Panel, navigate to System and Security. Next, click on System. Once the System window is up, open the Device Manager.
- Look under Ports (COM & LPT). You should see an open port named "Arduino UNO (COMxx)". If there is no COM & LPT section, look under "Other Devices" for "Unknown Device".
- Right click on the "Arduino UNO (COMxx)" port and choose the "Update Driver Software" option.
- Next, choose the "Browse my computer for Driver software" option.
- Finally, navigate to and select the driver file named "arduino.inf", located in the "Drivers" folder of the Arduino Software download (not the "FTDI USB Drivers" sub-directory). If you are using an old version of the IDE (1.0.3 or older), choose the Uno driver file named "Arduino UNO.inf"
- Windows will finish up the driver installation from there.

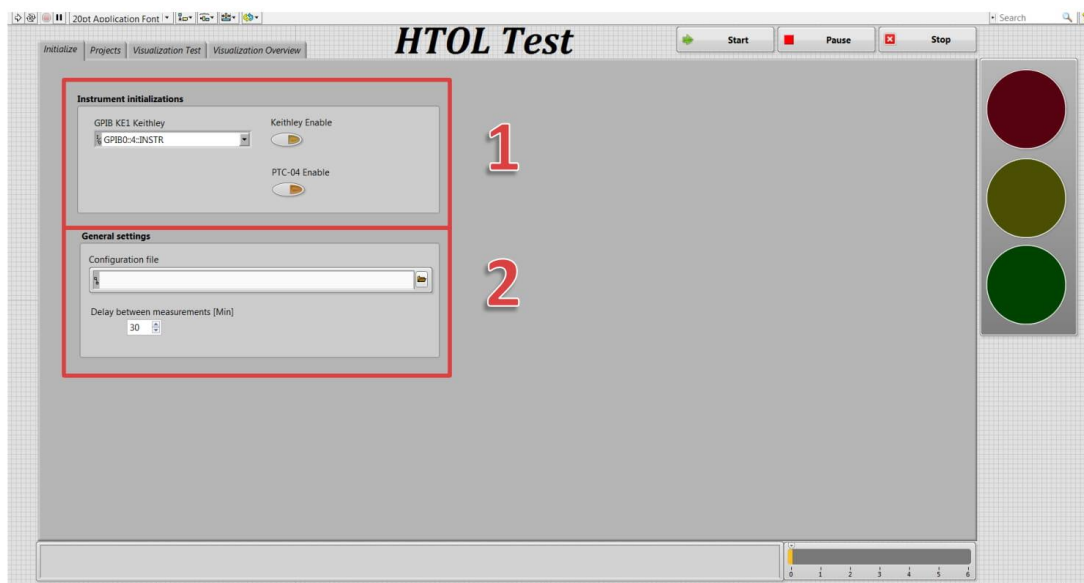
Reference : <https://www.arduino.cc/en/Guide/ArduinoUno>

2.2. Labview UI

The software, written in Labview, can be opened by double clicking the project and navigating to the « MainVi ». The user is able to see four tabs : initialize, projects, visualization test and visualization overview.

2.2.1. Initialize

When starting the program, the view will automatically navigate to initialize tab. If there is an ini file present in the project folder. The system will read this file and fill the initialize tab controls with the previous configuration. The project list will be updated and the instruments will initialize automatically. In the other case, the user needs to fill every control in the initialize tab and initialize instruments manually. If a fresh start is needed, please remove the ini file and run the program.

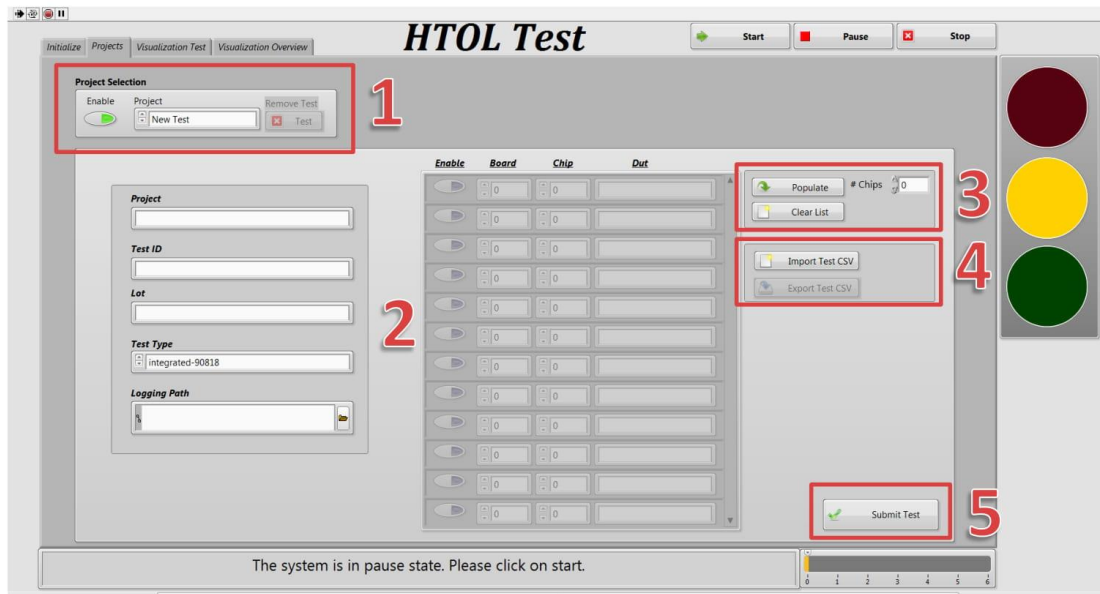


- 1. Instrument initializations
 - Keithley can be initialized by selecting the right port and clicking on the enable button. The same principle counts also for the PTC-04 but without selecting the port. This works by auto detection.
- 2. General settings
 - The configuration path, which determines the path where all tests are back-upped, needs to be selected. The delay between measurements needs also be specified in minutes.

2.2.2. Projects

In this section, the user can observe, add or modify projects. A project can also be imported or exported from/to a CSV file.

2.2.2.1. Adding a new test



- 1. Project Selection
 - The « Project » ring control will show all existing projects. Select “New Test” for adding a new project. This action will clear all fields and non-usable controls will fade. « Enable » and « Remove Test » can not be used in this case.
- 2. Test attributes
 - All fields need to be filled by the user.
 - Project : project name.
 - Test ID : unique test ID.
 - Lot : lot number.
 - Test Type : test name (same name as the VI which defines the test).
 - Logging path : path of file where measurements are going to be written.
 - Chip list : list of chips which needs to be tested. Enable specifies if a chip needs to be tested or not. Board and chip specifies the physical location and DUT is a string that identifies the chip.

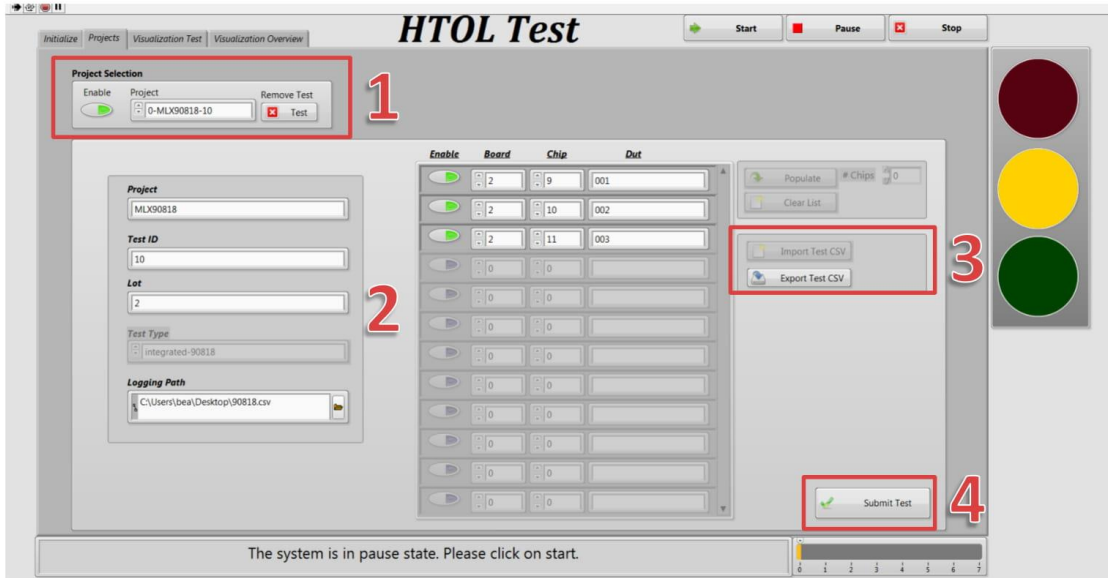
User's guide

Second-generation modular and flexible HTOL setup



- 3. Chip list tools
 - The chip list can be filled in manually. The system will automatically help the user when making a new line based on previous record. The user can also use the auto populate button by filling in the first record and specifying number of chips. The chip list will be generated automatically. The list can also be cleared if necessary.
- 4. Export/import tools
 - If a CSV file is present, a new project can be imported by clicking on « import test CSV » button. A dialog box will let the user choose the file. This action will fill all fields which is necessary.
- 5. Submit button
 - After filling every field or importing new project, click on submit to add the project.

2.2.2.2. Modify an existing test



- 1. Project Selection
 - The « Project » ring control will show all existing projects. Select an existing project. This action will update all fields and non-usable controls will fade. By clicking on the « Enable » button, existing chips can be disabled or enabled. To validate this action, do not forget to click on submit test. The « Remove Test » button will remove the project.
- 2. Test attributes
 - All information about the project. Enabled fields can be modified and a specific chip can be enabled or disabled by clicking on the « enable » button. To validate all actions, do not forget to click on submit test.
- 3. Export/import tools
 - An existing project can be exported by clicking on « export test CSV » button. A dialog box will let the user choose the path.
- 4. Submit button
 - After all modifications are done, click on submit test.

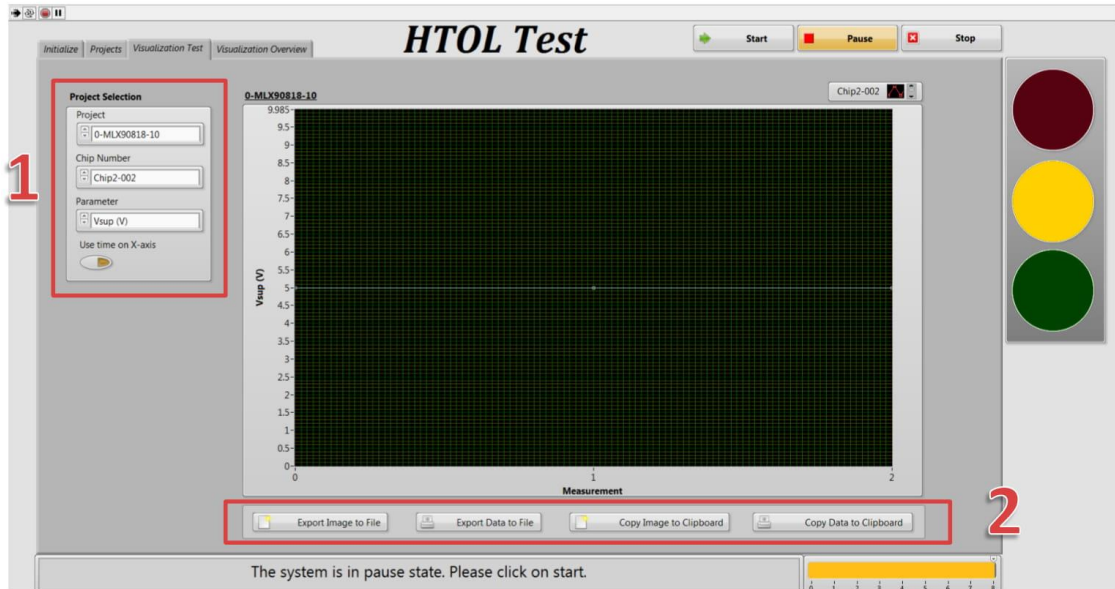
User's guide

Second-generation modular and flexible HTOL setup



2.2.3. Visualization Test

The user can analyze the logging files in this section. By selecting project, chip and parameter, a XY-graph will be shown. The X-axis can be changed to time scale by clicking the button « use time on X-axis » .



- 1. Project Selection
 - The « Project » ring control will show all existing projects. Select right project, chip and parameter to populate the XY-graph.
- 2. Graph functions
 - The data and the image can be copied to clipboard or exported to a file.

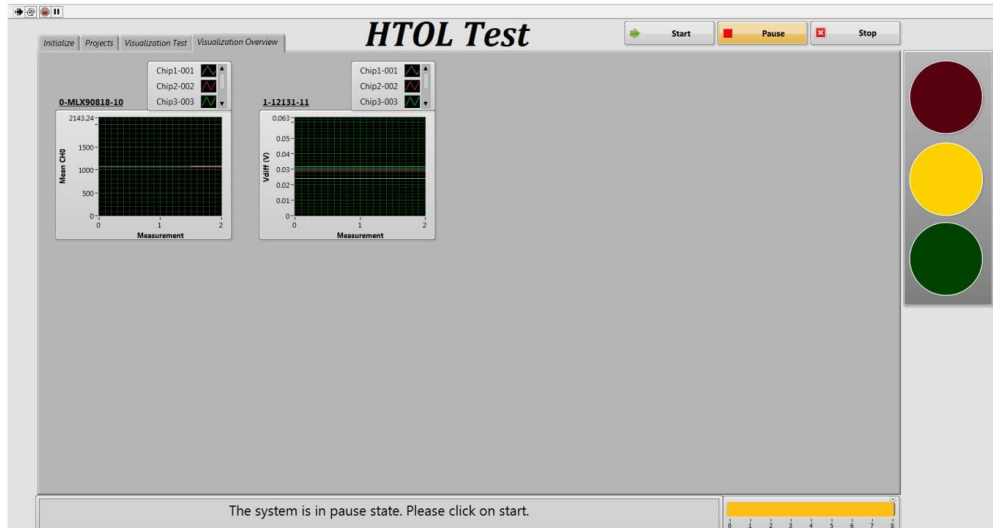
User's guide

Second-generation modular and flexible HTOL setup

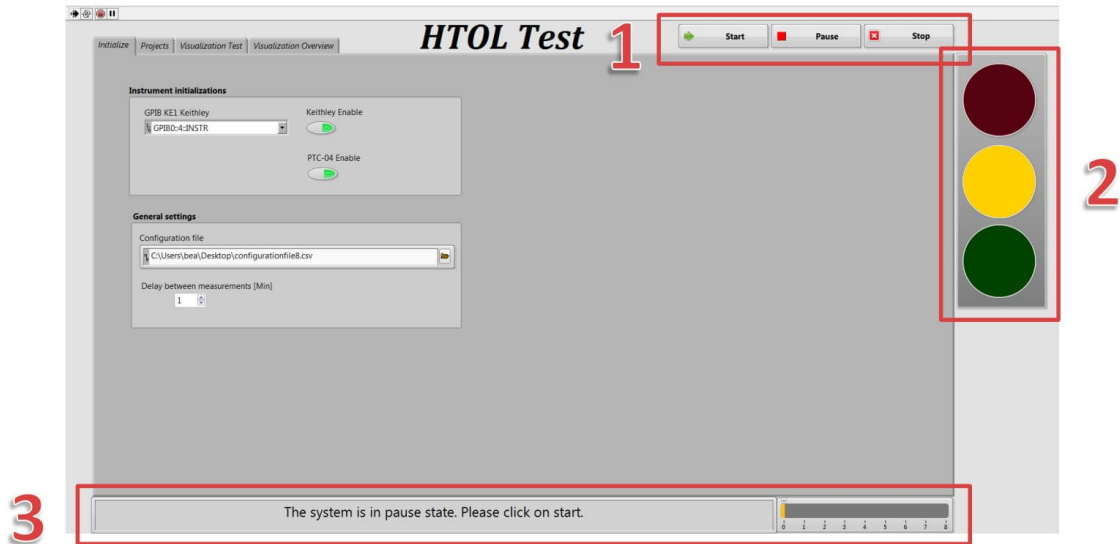


2.2.4. Visualization Overview

Apart from the visualization test section where logging files can be visualized, this section gives real-time view over the different projects. New graphs will be made based on the number of projects. The parameter, which is defined as real-time parameter in the test VI, will be shown for all chips in each project graphs.



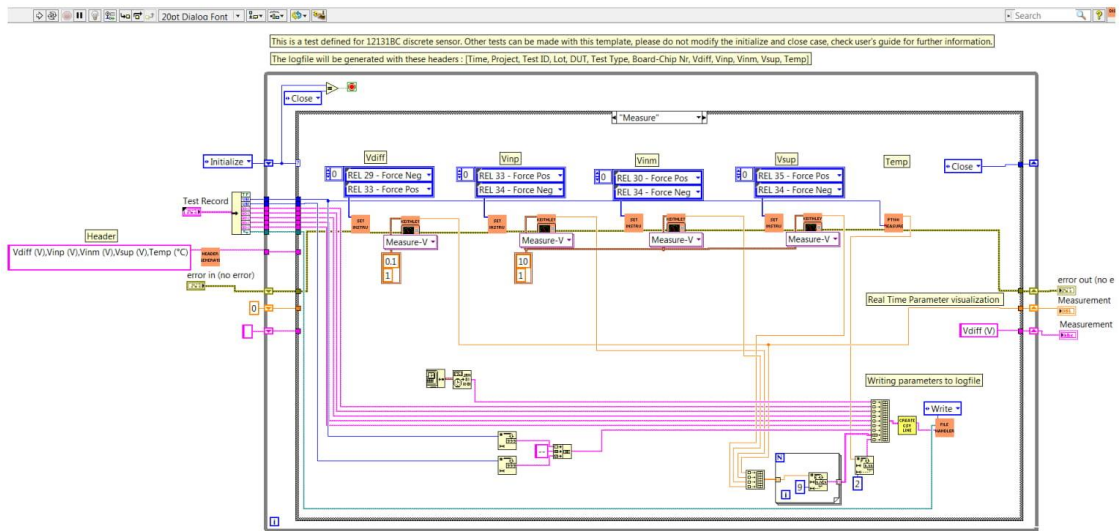
2.2.5. Other indicators and controls



- 1. Control buttons
 - The measurements can be started or paused by clicking on this buttons. The stop button can be used to stop the program.
- 2. Led indicators
 - The indicators give the user feedback about the progress. Green light shows that the measurements are started. The yellow light indicates that the program is in pause state. Red light means that there is an error occurred during testing. In this case, the system will not stop and continue with the other chips. Please check all instrument connections if red light is shown. If not, some chips will not be characterized correctly. Similar led indication will be shown on the multicolour led on the bottom relay-PCB. Green flickering indicates that a chip is being characterized and green-blue flickering indicates the waiting stage. Red light specifies an error.
- 3. Status and progress bar
 - The user can follow in which stage the program is. The measured chips as well as waiting time will be shown in the status bar. The progress bar will show in real-time how many chips are being tested.

2.3. Adding a new test type

A new test type can be added to the program by making a new folder in « tests » folder and copying new made VI in this folder. The name of the folder and the VI needs to be the same. For making this VI, the template of other tests can be used. To demonstrate this progress, « discreet-12131BC » VI is used as an example. This is shown in the next figure.



The test template is a state-machine with 3 states : initialize, measure and close. Please do not modify the initialize and the close case. The only modification can be done in the measure case.

User's guide

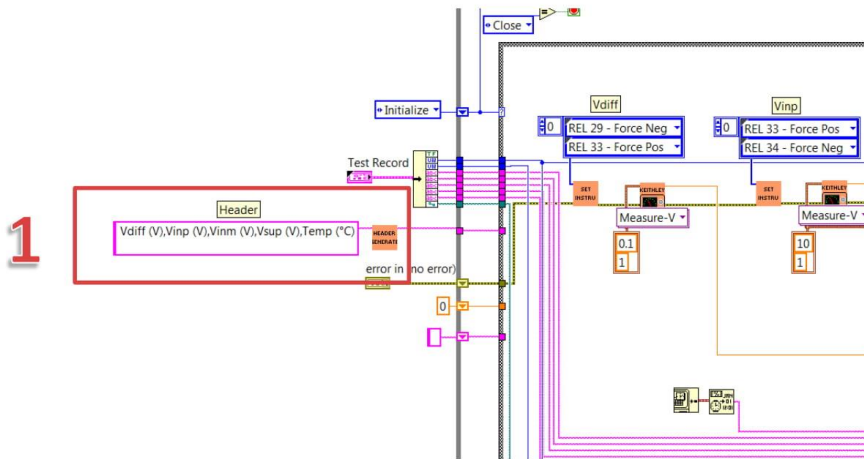
Second-generation modular and flexible HTOL setup



- **Step 1 : Specify the header for the logging files**

The header needs to be specified. All parameter names need to be separated by commas. This will automatically append [Time, Project, Test ID, Lot, DUT, Test Type, Board-Chip NR] with [parameter 1, parameter 2, parameter 3..]. The created log file header will be:

Time	Project	Test ID	Lot	DUT	Test Type	Board-Chip Nr	Param 1	Param 2	Param 3
------	---------	---------	-----	-----	-----------	---------------	---------	---------	---------	----	----

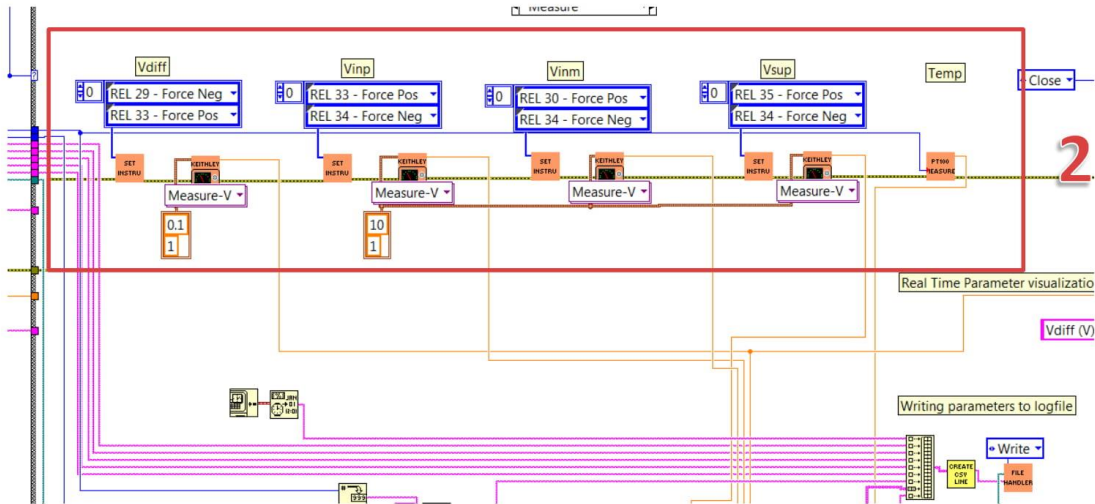


An example of a logfile is shown in the next figure:

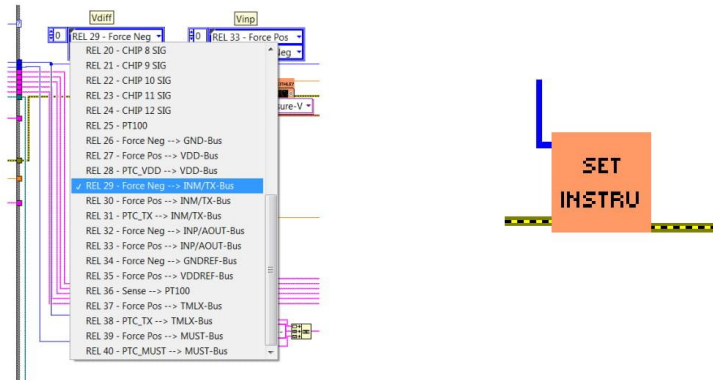
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
1	Time	Project	Test ID	Lot	DUT	Test Type	Board-Chip Nr	Vdiff (V)	Vinp (V)	Vinn (V)	Vsups (V)	Temp (°C)
2	09/04/2018 09:42	12131BC	11	2	1	discreet-1: 2--1		2.36E-02	2.53E+00	2.50E+00	5.00E+00	23.73
3	09/04/2018 09:42	12131BC	11	2	2	discreet-1: 2--2		2.86E-02	2.53E+00	2.50E+00	5.00E+00	23.73
4	09/04/2018 09:42	12131BC	11	2	3	discreet-1: 2--3		3.12E-02	2.53E+00	2.50E+00	5.00E+00	23.73
5	09/04/2018 09:42	12131BC	11	2	4	discreet-1: 2--4		2.96E-02	2.52E+00	2.49E+00	5.00E+00	23.73
6	09/04/2018 09:42	12131BC	11	2	1	discreet-1: 2--1		2.36E-02	2.53E+00	2.50E+00	5.00E+00	23.74
7	09/04/2018 09:42	12131BC	11	2	2	discreet-1: 2--2		2.86E-02	2.53E+00	2.50E+00	5.00E+00	23.74
8	09/04/2018 09:43	12131BC	11	2	3	discreet-1: 2--3		3.12E-02	2.53E+00	2.50E+00	5.00E+00	23.74
9	09/04/2018 09:43	12131BC	11	2	4	discreet-1: 2--4		2.96E-02	2.52E+00	2.49E+00	5.00E+00	23.74
10	09/04/2018 09:43	12131BC	11	2	1	discreet-1: 2--1		2.36E-02	2.53E+00	2.50E+00	5.00E+00	23.75
11	09/04/2018 09:43	12131BC	11	2	2	discreet-1: 2--2		2.86E-02	2.53E+00	2.50E+00	5.00E+00	23.75
12	09/04/2018 09:43	12131BC	11	2	3	discreet-1: 2--3		3.12E-02	2.53E+00	2.50E+00	5.00E+00	23.75
13	09/04/2018 09:43	12131BC	11	2	4	discreet-1: 2--4		2.96E-02	2.52E+00	2.49E+00	5.00E+00	23.75
14	09/04/2018 13:07	12131BC	11	2	1	discreet-1: 2--1		2.35E-02	2.53E+00	2.50E+00	5.00E+00	24.77
15	09/04/2018 13:07	12131BC	11	2	2	discreet-1: 2--2		2.85E-02	2.53E+00	2.50E+00	5.00E+00	24.76
16	09/04/2018 13:07	12131BC	11	2	3	discreet-1: 2--3		3.11E-02	2.53E+00	2.50E+00	5.00E+00	24.76
17	09/04/2018 13:07	12131BC	11	2	4	discreet-1: 2--4		2.95E-02	2.52E+00	2.49E+00	5.00E+00	24.76
18	09/04/2018 13:08	12131BC	11	2	1	discreet-1: 2--1		2.35E-02	2.53E+00	2.50E+00	5.00E+00	24.74
19	09/04/2018 13:08	12131BC	11	2	2	discreet-1: 2--2		2.85E-02	2.53E+00	2.50E+00	5.00E+00	24.74
20	09/04/2018 13:08	12131BC	11	2	3	discreet-1: 2--3		3.11E-02	2.53E+00	2.50E+00	5.00E+00	24.74
21	09/04/2018 13:08	12131BC	11	2	4	discreet-1: 2--4		2.95E-02	2.52E+00	2.49E+00	5.00E+00	24.73
22												

- **Step 2 : Sequence of measurements**

The sequence of measurements can be built by using subVI's in the project folder.



Before every measurement with Keithley or PTC-04, « SET_INSTRUMENTS » VI needs to be called with the right input array. The user can choose the right relays to energize by using the defined typedef enum as shown in the next figure.

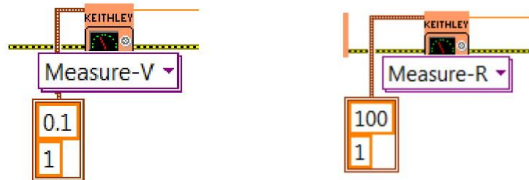


User's guide

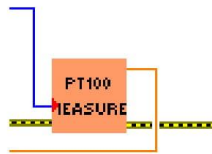
Second-generation modular and flexible HTOL setup



For measurements with Keithley multimeter, « KeithleyMultiVi » can be used. The user can choose between measuring volts or resistance. The range and power cycle needs always be provided. For measurements with PTC-04, couple of VI's can be used in the project folder.

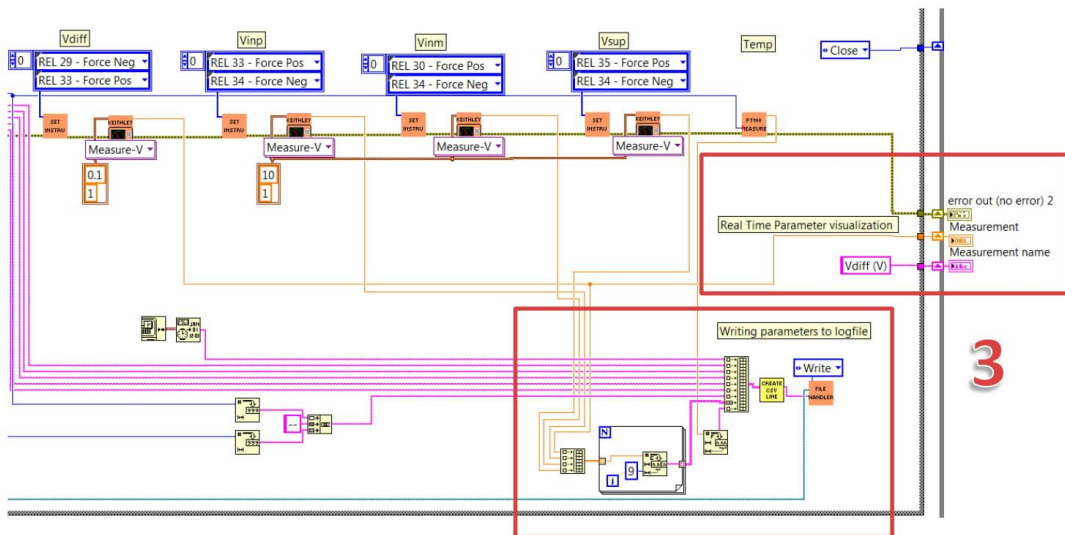


If temperature logging is needed, « PT100_Measure » VI can be used. The board number needs to be provided.



• Step 3 : Logging parameters

All parameters measured by Keithley or PTC-04 need to be converted to string and provided to the build array function in the same sequence as the header. This will create record in the logging file. One parameter needs to be also provided to the « measurement » indicator for the real-time visualization. The name needs to be also specified.



Auteursrechtelijke overeenkomst

Ik/wij verlenen het wereldwijde auteursrecht voor de ingediende eindverhandeling:
Development of modular and flexible HTOL setup

Richting: **master in de industriële wetenschappen: elektronica-ICT**
Jaar: **2018**

in alle mogelijke mediaformaten, - bestaande en in de toekomst te ontwikkelen - , aan de Universiteit Hasselt.

Niet tegenstaand deze toekenning van het auteursrecht aan de Universiteit Hasselt behoud ik als auteur het recht om de eindverhandeling, - in zijn geheel of gedeeltelijk -, vrij te reproduceren, (her)publiceren of distribueren zonder de toelating te moeten verkrijgen van de Universiteit Hasselt.

Ik bevestig dat de eindverhandeling mijn origineel werk is, en dat ik het recht heb om de rechten te verlenen die in deze overeenkomst worden beschreven. Ik verklaar tevens dat de eindverhandeling, naar mijn weten, het auteursrecht van anderen niet overtreedt.

Ik verklaar tevens dat ik voor het materiaal in de eindverhandeling dat beschermd wordt door het auteursrecht, de nodige toelatingen heb verkregen zodat ik deze ook aan de Universiteit Hasselt kan overdragen en dat dit duidelijk in de tekst en inhoud van de eindverhandeling werd genotificeerd.

Universiteit Hasselt zal mij als auteur(s) van de eindverhandeling identificeren en zal geen wijzigingen aanbrengen aan de eindverhandeling, uitgezonderd deze toegelaten door deze overeenkomst.

Voor akkoord,

Aras, Berkay

Datum: **1/06/2018**