

2016 • 2017
Faculteit Industriële ingenieurswetenschappen
master in de industriële wetenschappen: elektromechanica

Masterthesis

Het ontwerpen van een meetopstelling voor de impuls excitatie
techniek bij $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$ tot $100\text{ }^{\circ}\text{C}$

PROMOTOR :
dr. Stan WOUTERS

PROMOTOR :
ing. Bart BOLLEN

Yongkang Zhu

Scriptie ingediend tot het behalen van de graad van master in de industriële wetenschappen: elektromechanica

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



2016 • 2017

Faculteit Industriële ingenieurswetenschappen
master in de industriële wetenschappen: elektromechanica

Masterthesis

Het ontwerpen van een meetopstelling voor de impuls excitatie
techniek bij $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$ tot $100\text{ }^{\circ}\text{C}$

PROMOTOR :

dr. Stan WOUTERS

PROMOTOR :

ing. Bart BOLLEN

Yongkang Zhu

Scriptie ingediend tot het behalen van de graad van master in de industriële wetenschappen: elektromechanica



KU LEUVEN

Woord vooraf

Dit eindwerk is een afsluiter van mijn opleiding in industriële ingenieurswetenschappen elektromechanica. Het was vooral een zeer leerrijk proces voor mij, in de zin dat het me zelfstandigheid en doorzettingsvermogen heeft bijgebracht. Hierbij krijg ik ook de kans om de leerstoffen in de praktijk toe te passen. Voor de verwezenlijking van dit eindwerk wil ik nog een enkele mensen bedanken.

Eerst en vooral denk ik aan mijn promotoren. Mijn externe promotor Ing. Bart Bollen heeft mij in de afgelopen paar maanden goede begeleiding gegeven. Daarnaast kon ik ook altijd op de hulp van mijn interne promotor Dr. Stan Wouters rekenen. Hartelijke dank voor de tijd en moeite die jullie aan mij hebben besteed.

In de tweede plaats gaat mijn dank uit naar de medewerkers bij IMCE. Van hun heb ik veel hulp gekregen zodat ik vooruit kon met de experimenten en het ontwerp. Dan wil ik ook mijn dank betuigen aan dr. Johan Baeten wie mij deze waardevolle kans gaf. Ten slotte wil ik mijn moeder bedanken voor haar morele en materiële steun tijdens de vier studie jaren.

Inhoudsopgave

1. Inleiding	13
1.1. Situering	13
1.2. Probleemstelling	14
1.3. Doelstellingen	14
1.4. Materiaal en methode	15
2. Literatuurstudie	17
2.1. De impulsexcitatie-techniek	17
2.2. Koeltechniek	20
2.3. Isolatie	28
2.4. Opbouw materiaal	31
2.5. Afdichtingselementen	33
3. Berekeningen	35
3.1. De invloed van de stromingssnelheid op de afkoel- of opwarmingssnelheid	35
3.2. Vergelijking tussen inerte gassen	39
3.3. De filmcoëfficiënt van de leiding i.f.v. de binnendiameter	41
3.4. Het drukverlies in de leiding	45
3.5. Minimale wanddikte van de vacuümisolatie	48
4. Metingen	50
4.1. Laagtemperatuurmetingen	50
4.2. Invloed van de gasstroming op het opnemen van signalen	53
5. Ontwerpen	58
5.1. Meetopstelling bij het temperatuurbereik van -80 °C tot 100 °C	58
6. Concept en aanbeveling voor de meetopstelling bij -180 °C	67
Verwijzingen	69

Lijst van tabellen

Tabel 1: Emissiecoëfficiënten bij cryogene temperaturen	29
Tabel 2: Poederisolaties	29
Tabel 3: Mechanische eigenschappen van AISI 304N & 316N en aluminiumlegeringen	32
Tabel 4: Vergelijking tussen metalen afdichtingselementen.....	33
Tabel 5: Parameters van het ijzer monster	35
Tabel 6: Eigenschappen van stikstofgas bij kamertemperatuur	35
Tabel 7: Berekende afkoelsnelheden van het ijzer monster bij gedwongen convectie.....	38
Tabel 8: Eigenschappen van de inerte gassen bij kamertemperatuur.....	39
Tabel 9: Filmcoëfficiënten met verschillende inert gassen (W/m^2K).....	39
Tabel 10: Opgenomen warmte van inerte gassen bij 1K temperatuurverandering	39
Tabel 11: Standaard dimensies voor koeltechnische koperen leidingen.....	41
Tabel 12: Specificaties van de Thermalfluid HL80.....	41
Tabel 13: Specificaties van Presto A85	41
Tabel 14: Richtwaarden voor de verliescoëfficiënt bij een bocht van 90°	45

Lijst van figuren

Figuur 1: New Brunwicks Scientific ULT Freezer U101	13
Figuur 2: Blokdiagram van het testsysteem (ASTM International, 2005, p. 4)	17
Figuur 3: Handmatige excitatie (IMCE.nv, 2017)	18
Figuur 4: Modevormen van een balkvormig monster bij buig-(boven) en torsiemode(onder) (ASTM International, 2013, p. 5).....	19
Figuur 5: Excitatie bij buig-(links) en torsiemode(rechts) (ASTM International, 2013, p. 4)	19
Figuur 6: Hoofdcomponenten van het dampcompressiesysteem (Wikipedia, 2017).....	20
Figuur 7: PV-diagram van een traditioneel dampcompressiesysteem (Wikipedia, 2017).....	21
Figuur 8: Tweetrapsdampcompressiesysteem (Yunus A. Cengel, 2011)	21
Figuur 9: Gifford_McMahon (GM) cryocooler (Cryogenic systems, 2000, pp. 4-324).....	23
Figuur 10: Ts-Diagram van de GM-cryocooler (Mountain Instruments, 2016)	24
Figuur 11: Configuration of the GM system during a cycle (Mountain Instruments, 2016)	25
Figuur 12: Schema van een Stirling-type pulsbuskoeler met orifice (Wikipedia, 2017)	26
Figuur 13: DBTT uit kerfslagproef (Föll, 2015)	31
Figuur 14: DBT in koolstofstaal (Rinebolt, 1951).....	31
Figuur 15: De filmcoëfficiënt van de leiding i.f.v. de diameter	44
Figuur 16: Spiraalvormige koperen leiding en het bovenaanzicht	45
Figuur 17: Moody-diagram (Wikipedia, 2017)	47
Figuur 18: Belastingtoestand van een cilindrisch drukvat (Hibbeler, 2014, p. 426)	48
Figuur 19: laagtemperatuurmeetopstelling	50
Figuur 20: Het temperatuurverloop van de lagetemperatuurmetingen	51
Figuur 21: E-modulus en demping van het POM-monster i.f.v. de temperatuurverandering.....	51
Figuur 22: E-modulus en demping van het gietijzeren monster i.f.v. de temperatuurverandering	52
Figuur 23: Meetopstelling voor de windtest	53
Figuur 24: Het onverstoorte signaal van POM-monster.....	54
Figuur 25: de onverstoorte FFT-diagram van POM-monster	54
Figuur 26: Het verstoorte signaal van POM-monster	54
Figuur 27: de verstoorte FFT-diagram van POM-monster.....	55
Figuur 28: Softwareinstelling voor signaalfilter.....	55
Figuur 29: Het onverstoorte signaal van gietijzeren monster.....	56
Figuur 30: de onverstoorte FFT-diagram van gietijzeren monster	56
Figuur 31: het verstoorte signaal van gietijzeren monster.....	57
Figuur 32: de verstoorte FFT-diagram van gietijzeren monster	57
Figuur 33: Julabo Presto A85 (Julabo, 2017)	58
Figuur 34: Het aansluitpaneel van Presto A85.....	58
Figuur 35: Schets van de basisprincipe	59
Figuur 36: Overzicht van het systeem	59
Figuur 37: Doorsnede van de vloeistofdoorvoer	60
Figuur 38: De thermische geïsoleerde buis (links) en leidingadapter (rechts) (Julabo, 2017).....	60
Figuur 39: Vacuüm kabeldoorvoer (Conax Technolgies, 2012)	61
Figuur 40: Doorsnede van de kabeldoorvoer en adapter	61
Figuur 41: De zijpoorten van de vat	61
Figuur 42: Constructie van de onderste helft van het systeem.....	62
Figuur 43: Verbinding tussen de stappenmotor en het schoepenwiel.....	63
Figuur 44: Gasstroming in de meetkamer	63
Figuur 45: Onderste helft van de meetkamer	63
Figuur 46: Doorsnede van de hele meetkamer	64
Figuur 47: Verbinding via metalen balken en I-profielen.....	64

Figuur 48: Impulsexcitatiesysteem.....	65
Figuur 49: Het vereenvoudigde processchema	66
Figuur 50: Doorsnede van de dubbelwandige koperen vat.....	67

Abstract

IMCE te Genk is een bedrijf dat gespecialiseerd is in de impulsexcitatie-techniek. Deze techniek is een genormeerde methode om de elasticiteitsmodulus op een niet-destructieve wijze te meten. De hoofddoelstelling van dit eindwerk is het ontwerpen van een meetopstelling voor deze techniek bij $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$ tot $100\text{ }^{\circ}\text{C}$. De subdoelstelling is het uitwerken van een concept voor $-180\text{ }^{\circ}\text{C}$ tot $100\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Voor het ontwerp heeft IMCE volgende eisen opgesteld. Ten eerste moet de temperatuur in het toestel instelbaar zijn binnen het hele temperatuurbereik. Ook moet de temperatuur binnen het toestel zo homogeen mogelijk zijn. Daarnaast moeten de afkoel- en opwarmingssnelheid regelbaar zijn.

Eerst werd na een vergelijkende studie een toestel gekozen dat toereikend koel- en opwarmvermogens kan leveren. Dit toestel heeft een temperatuurbereik van $-85\text{ }^{\circ}\text{C}$ tot $170\text{ }^{\circ}\text{C}$. Zijn afkoel- en opwarmvermogen is respectievelijk $2,8\text{ kW}$ en $1,5\text{ kW}$.

Vervolgens werden een aantal facetten, van het opbouw materiaal tot de thermische isolatie, van een cryogeen systeem bestudeerd. De gekozen isolatie is een vacuümlaag tussen rvs-wanden en de homogene temperatuur wordt gecreëerd door een vacuümcompatibele ventilator. Nadien werden berekeningen uitgevoerd om die te dimensioneren. Tegelijkertijd werden ook laagtemperatuurtesten gedaan om monsters te analyseren en het impulsexcitatiesysteem uit te testen. In de laatste stap werden alle componenten samengebracht. Het einde ontwerp is een thermisch geïsoleerde en vacuümdichte meetkamer die gekoppeld is aan het gekozen toestel.

Abstract in English

IMCE in Genk is a company specialized in the impulse excitation technique. This technique is a standardized means of measuring the elasticity in a non-destructive manner. The main purpose of this thesis focuses on the design of a device generating a specific temperature environment, from $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$ to $100\text{ }^{\circ}\text{C}$, for this technique. As for the secondary goal, a feasible concept must be proposed for $-180\text{ }^{\circ}\text{C}$ to $100\text{ }^{\circ}\text{C}$.

As for both devices, a few requirements were given by IMCE. First of all, the temperatures in these devices have to be selectable within the whole temperature range. Besides that, the temperatures in these devices have to be as homogeneous as possible. Furthermore, the cooling and heating rate have to be adjustable.

Firstly, a device with an adequate cooling and heating power was selected. This device has a temperature range from $-85\text{ }^{\circ}\text{C}$ to $170\text{ }^{\circ}\text{C}$. The cooling and heating capacity is $2,8\text{ kW}$ and $1,5\text{ kW}$ respectively.

Subsequently, a study on the design of a cryogenic system was conducted. Components, such as the construction material and the thermal insulation, were selected in this stage. The chosen thermal insulation is a vacuum layer created between walls made of stainless steel and the homogeneous temperature is generated by a vacuum compatible fan. Afterwards, the right dimensions were calculated for each part. In order to analyze the material behavior of samples and examine the impulse excitation system, low temperature tests were conducted at the meantime. In the final stage, all selected parts were assembled. The final design is a thermal insulated and vacuum compatible chamber connected with the chosen device.

1. Inleiding

1.1. Situering

IMCE is een bedrijf dat gelegen is op het industrieterrein Genk-Zuid. De naam IMCE staat voor *Integrated Material Control Engineering*. Het is een klein bedrijfje met een 5-tal werknemers.

IMCE te Genk is gespecialiseerd in de impulsexcitatietechniek. Een techniek die genormeerd is en de mogelijkheid biedt om de elasticiteitsmodulus van een materiaal, volgens een niet-destructieve wijze, te meten. Daarnaast maken ze ook meettoestellen voor deze techniek en verkopen ze wereldwijd. Als de klantendienst, bieden ze twee mogelijkheden. Enerzijds kunnen de klanten rechtstreeks bij hun de toestellen kopen. Anderzijds geven ze ook de keuze aan de klanten om monsters naar hun op te sturen en metingen laten uitvoeren. Hun klanten komen uit verschillende vakgebieden, onder andere hoger onderwijsinstellingen, overheidsinstellingen en internationale bedrijven.

Het bedrijf beschikt op dit moment over een aantal modellen voor verschillende temperatuurbereiken. De temperatuurrange van hun toestellen varieert van kamertemperatuur ($\pm 20\text{ }^{\circ}\text{C}$) tot zeer hoge temperatuur ($\pm 1700\text{ }^{\circ}\text{C}$). Bovendien gebruiken alle toestellen eenzelfde meetprincipe, nl. de impulsexcitatie techniek. Deze methode wordt beschreven in de norm ASTM E1876 (ASTM International, 2005). Het is gebaseerd op het aantikken van een monster en het opmeten van de veroorzaakte resonantiefrequentie in het materiaal.

Aangezien de laagtemperatuurtesten heel interessant zijn voor een aantal sectoren, wilt IMCE hierbij hun markt uitbreiden. Het bedrijf heeft ook een laagtemperatuurdiepvries van het merk New Brunswick Scientific ter beschikking (zie Figuur 1). Vermits de minimumtemperatuur van dit toestel laag genoeg is ($-85\text{ }^{\circ}\text{C}$), is het geschikt om een aantal laagtemperatuurtesten uit te voeren.



Figuur 1: New Brunwicks Scientific ULT Freezer U101 (eppendorf, Innova® ULT Upright Freezers,2017)

1.2. Probleemstelling

De hoofddoelstelling van dit eindwerk is het ontwerpen van een meetopstelling voor de impulsexcitatietechniek bij een temperatuurbereik van $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$ tot $100\text{ }^{\circ}\text{C}$. De subdoelstelling is het concept voor een breder temperatuurbereik, van $-180\text{ }^{\circ}\text{C}$ tot $100\text{ }^{\circ}\text{C}$.

A.d.h.v. de impulsexcitatietechniek heeft IMCE diverse producten ontwikkeld. Maar in de voorbije jaren kreeg IMCE steeds meer vragen van klanten naar de mogelijkheid om laagtemperatuurmetingen te kunnen uitvoeren. Volgens hun kan dit toestel interessant zijn voor de kunststof en rubberindustrie. De glastransitietemperaturen van die twee stoffen liggen immers binnen het vooropgestelde temperatuurbereik.

Eén van de grootste uitdaging van dit eindwerk is het creëren van een homogene temperatuur in het toestel. Een homogene temperatuur betekent een kleiner verschil tussen de gemeten temperatuur en de werkelijke temperatuur van het monster. Daarnaast is een constante koelsnelheid ook moeilijk te verwezenlijken, aangezien het koelvermogen steeds kleiner wordt naargelang het temperatuurverschil tussen het monster en het koelsysteem ook kleiner wordt.

1.3. Doelstellingen

Voor het toestel heeft IMCE ook een aantal eisen opgesteld:

- **Instelbare temperatuur:**
De temperaturen in het toestel moeten instelbaar zijn tussen het temperatuurbereik van: $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$ to $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ & $-180\text{ }^{\circ}\text{C}$ to $100\text{ }^{\circ}\text{C}$.
- **Gecontroleerd afkoelen en opwarmen:**
Het toestel moet met een instelbare snelheid kunnen afkoelen of opwarmen en het regelgebied moet even breed als het vooropgestelde temperatuurbereik.
- **Homogene temperatuur:**
De temperatuur in het toestel moet overall dezelfde zijn. Want een niet-homogene temperatuur in het systeem leidt tot extra onzekerheden in de metingen.
- **Minimum volume voor het grootste monster:**
Het minimum volume van de meetkamer moet zo gedimensioneerd worden dat een balkvormig monster met een maximale lengte van 160 mm ook past
- **Condensvrije meetomgeving:**
Het water in de lucht zal bij lage temperaturen condenseren. Vervolgens zal de gevormde condens op het monster bevriezen en de massa van het materiaal beïnvloeden. Daarom is een condensvrije meetomgeving belangrijk bij lage temperaturen.
- **Impulsexcitatietechniek:**
Het toestel moet gebruik maken van een betrouwbare en niet-destructieve meetmethode, nl. de impulsexcitatietechniek.

Daarnaast wil IMCE ook weten welke mogelijkheden er zijn om tot $-180\text{ }^{\circ}\text{C}$ te kunnen afkoelen en wat de verschillen zijn tussen de koel- en meettechnieken bij die twee temperaturen.

1.4. Materiaal en methode

1.4.1. Literatuurstudie

De eerste fase van de opdracht begint met een literatuurstudie. De te onderzoeken topics zijn:

- De toegepaste dynamische meetmethode:
De toegepaste dynamische meetmethode dient gekend te zijn. Het principe van het niet-destructief meten van de elasticiteitsmodulus bij IMCE is gebaseerd op de impulsexcitatie techniek. Een inzicht hebben van deze techniek is belangrijk om de metingen correct te kunnen uitvoeren.
- Principes van verschillende koeltechnieken:
De werkingen en karakteristieken van verschillende koeltechnieken moeten geanalyseerd worden. De koeltechnieken die nu bestaan zijn zeer uiteenlopend. Daarom dient de focus vooral gelegd worden aan de traditionele dampcompressiesystemen en typische cryogene toepassingen. Maar andere technieken kunnen ook in aanmerking komen.
- Verschillende isolatietechnieken:
Om de warmteflux door heen het systeem te minimaliseren, dient er rekening te houden met drie vormen van warmteoverdracht, nl. warmtegeleiding, convectie en warmtestraling. Ieder is verschillend en vergt een andere isolatietechniek.
- Verschillende ontvochtigstechnieken:
In de laatste stap moet er gezocht worden naar de meeste voorkomende ontvochtigstechnieken voor de koelsystemen, en/ of er een verschil is tussen de ontvochtigstechnieken bij $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$ en $-180\text{ }^{\circ}\text{C}$.

1.4.2. Proefopstelling

De tweede fase van dit eindwerk is het opbouwen van een proefopstelling met de bestaande diepvries. Hierbij dient er onderzocht te worden of alle apparaten hun functionaliteiten behouden bij $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$. Indien wel, kunnen de huidige apparaten en meetprincipe geïntegreerd worden in het ontwerp, anders moet er een alternatief bedacht worden.

Veder moet er ook nagegaan worden of de gebruikte koeltechniek in de diepvries een toereikend koelvermogen levert voor de toepassing. Indien niet, dient deze koelmethode aangepast of vervangen te worden.

Ten slotte moet de nauwkeurigheid en de functionaliteit van de akoestische opnemer en andere apparaten ook getest worden. Op grond van die resultaten kunnen we weten welke effecten deze lage temperatuur heeft op de toestellen en welke aanpassingen gemaakt moeten worden.

1.4.3. Meetopstelling bij $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$

De voorlaatste fase is het ontwerpen van de meetopstelling die tot $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$ afkoelt. Wanneer de laagtemperatuurtesten uitgevoerd zijn, zal het blijken of de toegepaste koeltechniek in de diepvries een toereikend koelvermogen levert. Indien deze techniek aan de gestelde eis voldoet, kunnen de testresultaten als referenties gebruikt worden voor het verdere ontwerpen. Anders moet men naar een andere techniek overstappen. Wat betreft het meetprincipe, kan de setup in de proefopstelling herbruikt worden.

1.4.4. Studie rond -180 °C

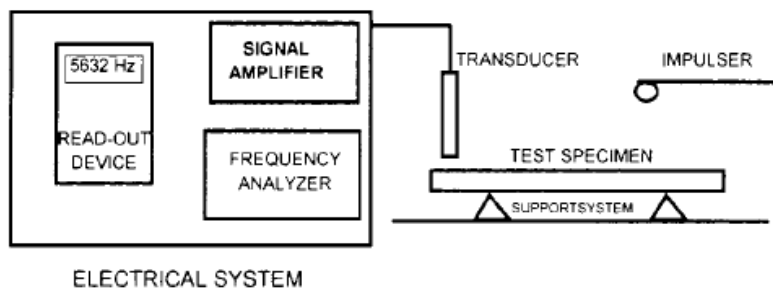
De laatste fase van dit eindwerk is de studie van de mogelijke cryogene koeltechnieken en bruikbare meetapparaten bij -180 °C. Een van de meeste toegepaste cryogene koeltechnieken is de cryokoeler. De cryokoeler heeft verschillende varianten en kan gemakkelijk 20 K behalen,

Daarnaast moet er eveneens rekening worden gehouden met de faseovergang van de materialen. Bij lage temperaturen kunnen materialen twee mogelijke verschijnselen tonen, nl. de glastransitie bij kunststoffen en rubbers en de ductiel-bros transitie bij sommige metalen. Hierbij zullen die materialen totaal andere gedragingen tonen. Ten slotte, moet dit eindwerk ook nagaan of de instrumenten van de impulsexcitatie-techniek steeds bruikbaar is bij deze temperatuur. Indien niet, moet er een alternatief of mogelijke aanpassingen toegelicht worden.

2. Literatuurstudie

2.1. De impuls excitatietechniek

De impact excitatie techniek is een niet-destructieve meetmethode om de materiaaleigenschappen van een monster te bepalen. De meting is gebaseerd op het meten van de fundamentele resonantiefrequentie van dat monster. Door het monster mechanisch te exciteren met een excitatiebron, ontstaat er trillingen. Dit signaal worden vervolgens opgenomen en verwerkt door een transducer die ze omzet in elektrische signalen. Deze elektrische signalen worden geanalyseerd. De fundamentele resonantiefrequentie wordt gezocht en de hogere harmonische signalen worden weggefilterd. Met deze resonantiefrequentie bepaalt men materiaaleigenschappen, zoals de elasticiteitsmodulus, de schuifmodulus, het Poisson-getal en de demping, van het gekozen monster.



Figuur 2: Blokdiagram van het testsysteem (ASTM International, ASTM E1876, 2005, p. 4)

De standaard vormen van monsters zijn balk-, schijf- of cilindervormig. Maar de meeste voorkomende zijn balkvormig. Om de elasticiteitsmodulus van een balkvormig monster te kunnen bepalen, dient men ook zijn dimensies en massa te kennen. De onderstaande formule geeft het verband tussen de elastische modulus en de gemeten fundamentele resonantiefrequentie (ASTM International, 2005, p. 6).

$$E = 0,9465(mf_f^2/b)(L^3/t^3)T_1 \quad (1)$$

Met:

- E : de Young's modulus, Pa
- m : de massa van het monster, g
- f_f : de fundamentele resonantiefrequentie van het balkvormige monster bij buigmode, Hz
- b : de breedte van het monster, mm
- L : de lengte van het monster, mm
- t : de dikte van het monster, mm
- T_1 : de correctiefactor

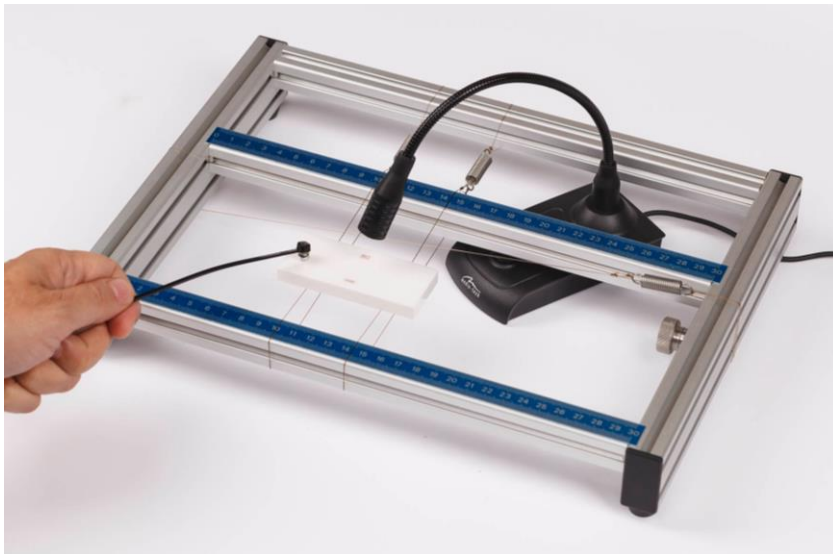
In de praktijk is vaak de uitzetting of inkrimping van het monster verwaarloosbaar, zelfs bij een grote temperatuursverandering. Indien men rekening wilt houden met de uitzettingscoëfficiënt van een materiaal is de onderstaande formule wel van toepassing (ASTM International, 2005, p. 7).

$$M_T = M_0(f_T/f_0)^2[1/1(1+\alpha \Delta T)] \quad (2)$$

Met:


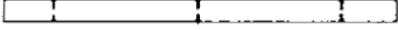

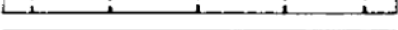

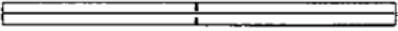

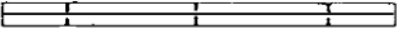
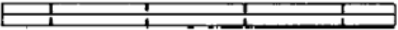
- M_T : Young's modulus E (of schuif modulus G) bij een gegeven temperatuur T, N/m²
- M_0 : Young's modulus E (of schuif modulus G) bij kamertemperatuur, N/m²
- f_T : resonantiefrequentie bij een gegeven temperatuur T, Hz
- f_0 : resonantiefrequentie bij kamertemperatuur, Hz
- α : de gemiddelde uitzettingscoëfficiënt van de kamertemperatuur tot de gegeven temperatuur T, m/mK
- ΔT : het temperatuurverschil tussen de gegeven temperatuur T en de kamertemperatuur, K

Het monster handmatig exciteren is de eenvoudigste vorm van de impulsexcitatietechniek. De excitatie wordt vaak verwezenlijkt door het monster handmatig te tikken met een hard voorwerp. Nadien wordt het opgewekte sinusvormige signaal opgenomen door een akoestische opnemer. De ontstane transversale golven bestaan uit een aantal buiken en knooppunten, waarbij de amplitude van de trilling maximaal is in de buik en minimaal in het knooppunt. (zie Figuur 5)



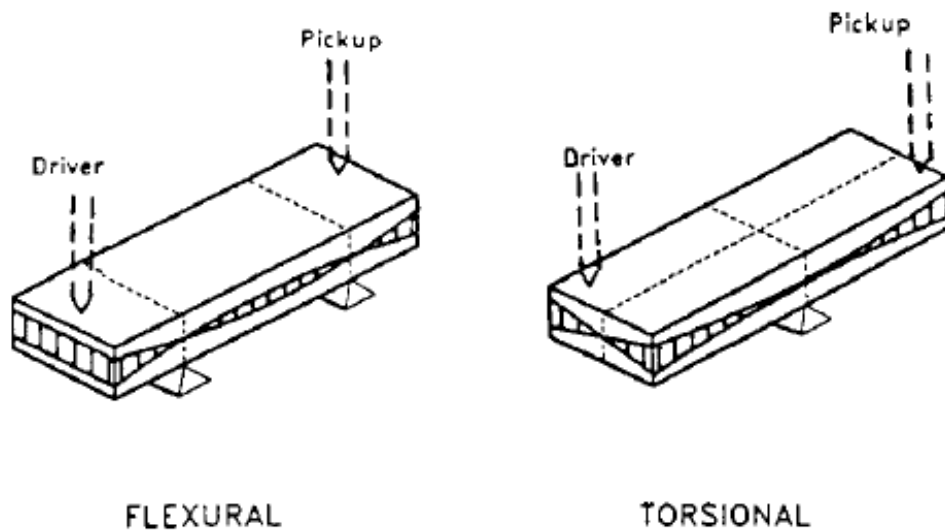
Figuur 3: Handmatige excitatie (IMCE.nv, 2017)

Modevorm is een patroon waarbij alle onderdelen van een systeem volgens een sinusoïde vorm bewegen. Het harmonische signaal van de eerste modevorm wordt ook als de fundamentele resonantiefrequentie genoemd. Bij deze eerste modevorm liggen de twee knooppunten van een balkvormig monster op een bepaalde afstand, die 22,4% is van de totale lengte, van iedere uiteinde. (zie Figuur 4) Om die reden kiest men vaak die twee knooppunten om de monster op te leggen en het midden als het excitatiepunt. (zie Figuur 3)

HARMONIC	FLEXURAL	FRACTIONAL DISTANCE FROM END
		FOR EACH NODAL LOCATION
1F		0.224
2F		0.132, 0.500
3F		0.0944, 0.3558
4F		0.0733, 0.277, 0.500
5F		0.060, 0.224, 0.409
TORSIONAL		
1T		0.500
2T		0.250
3T		0.167, 0.500
4T		0.125, 0.375

Figuur 4: Modevormen van een balkvormig monster bij buig-(boven) en torsiemode(onder) (ASTM International, ASTM E1875, 2013, p. 5)

In Figuur 4 en Figuur 5 is het duidelijk te zien dat de buiken en knooppunten een andere verdeling hebben bij de torsiemode. Zelfs bij de eerste modevorm heeft het monster ook een heel ander patroon: het monster roteert rond twee kruisende assen en de hoekpunten draaien telkens met een tegengestelde draaizin. Aangezien de amplitude daar in de twee assen minimaal is, wordt het monster op die plaatsen opgelegd via twee kruisende draden.



Figuur 5: Excitatie bij buig-(links) en torsiemode(rechts) (ASTM International, ASTM E1875, 2013, p. 4)

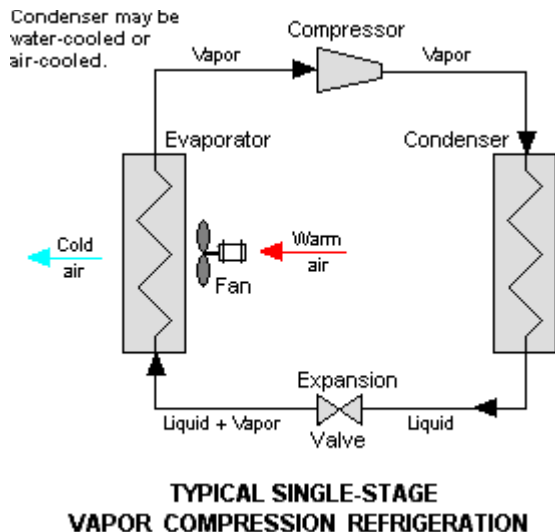
Het toepassingsgebied van de impuls excitatie methode is breed, maar deze techniek is vooral gespecificeerd voor elastische materialen met een homogeen en isotrope structuur. De bijkomende eisen op de balkvormige monster zijn o.a.: (ASTM International, 2005, p. 4)

- Alle oppervlakken op het monster moeten vlak zijn en de paralleliteit tussen twee vlakken moet kleiner zijn dan 0,1% van de tussenafstand.
- De massa moet nauwkeurig zijn tot 0,1%.
- Alle dimensies moeten ook nauwkeurig zijn tot 0,1%

2.2. Koeltechniek

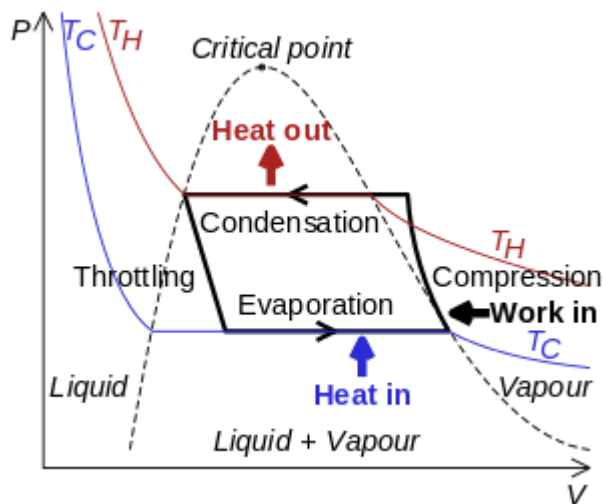
2.2.1. Cascade dampcompressiesysteem

De tweetraps cascade dampcompressiesysteem is een aaneenschakeling van twee dampcompressiesystemen. Bovendien is het een antwoord op de toepassingen waarbij een groot temperatuurbereik of een zeer lage temperatuur gevraagd wordt. Een traditioneel dampcompressiesysteem maakt gebruik van een circulerend koudemiddel om de warmte uitwisseling te realiseren tussen twee bronnen. Ieder systeem heeft een compressor, een ventiel, een verdamper en een condensor. Om een zeer lage temperatuur te bereiken met een gewoon dampcompressiesysteem moet de compressor een voldoende drukverhouding kunnen leveren en dit gaat gepaard met een groot vermogensverlies.



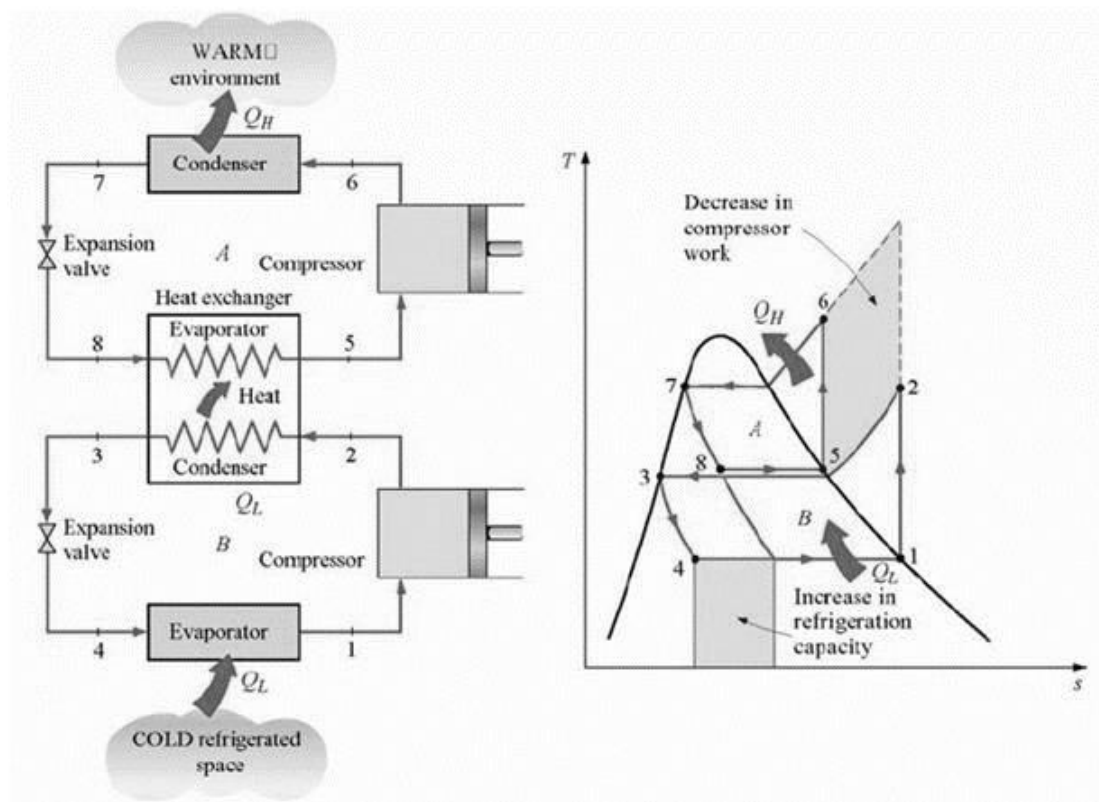
Figuur 6: Hoofdcomponenten van het dampcompressiesysteem (Wikipedia, Vapor-compression refrigeration, 2017)

Figuur 6 toont het procesdiagram van een dampcompressiesysteem. De functie van een verdamper is om warmte op te nemen van zijn omgeving. Het tweefasig koudemiddel in de verdamper is een mistachtig mengsel van vloeistof en gas en is efficiënter in de warmteoverdracht. Wanneer het tweefasig mengsel voldoende warmte opneemt zal het een faseverandering ondergaan tot verzadigde damp. (zie Figuur 7) Deze verzadigde damp zal de compressor binnenstromen en gecomprimeerd worden tot een hoge druk oververhitte damptoestand. Vervolgens geeft deze oververhitte damp zijn warmte af in de condensor en condenseert het terug naar de vloeistoffase. Daarna passeert het koudemiddel een ventiel waarbij zowel de druk als de temperatuur in de vloeistof fors daalt. Eenmaal de verzadigde vloeistof in de verdamper warmte begint op te nemen wordt het bovenvermelde proces herhaald.



Figuur 7: PV-diagram van een traditioneel dampcompressiesysteem (Wikipedia, Vapor-compression refrigeration, 2017)

Het cascade dampcompressiesysteem heeft dezelfde werking als een gewoon dampcompressiesysteem en ieder cyclus is verantwoordelijk voor een ander temperatuurgebied. Want de koudemiddelen in de twee cyclussen moeten ook verschillende werkingstemperaturen hebben. De HT-cyclus wordt via een tussenwarmtewisselaar verbonden met de LT-cyclus. Deze tussenwarmtewisselaar fungeert als de verdamper voor de HT-zijde en de condensor voor de LT-zijde. Op die manier wordt het koudemiddel in de LT-cyclus vooraf gekoeld tot zijn werkingstemperatuur door de HT-cyclus.



Figuur 8: Tweetrapsdampcompressiesysteem (Yunus A. Cengel, Thermodynamics: An Engineering Approach, 2011)

Een voordeel van het cascade dampcompressiesysteem t.o.v. het traditionele systeem is het verminderde verbruik en verbeterde koelvermogen. Dit is te zien in het T-s diagram in Figuur 8. Want in een T-s diagram is het realiseerbare vermogen gelijk aan de oppervlakte onder de evenwijdige lijnen met de s-as en het geleverd vermogen de oppervlakte onder de evenwijdige lijnen met de T-as.

Andere voordelen van een dergelijk cascade systeem is het grotere koelvermogen en de kostprijs. Aangezien het dampcompressiesysteem een van de meeste gebruikte koeltechnieken is op dit moment, zijn de prijzen van alle verwanten componenten ook lager. Het grote koelvermogen heeft te maken met het massadebiet in het systeem. Dit komt doordat het massadebiet in de verdamper regelbaar is via de compressor. Volgens de onderstaande formule weten we dat het koelvermogen \dot{Q} (J/s) het product is van het massadebiet \dot{m} (kg/s) in de verdamper en de warmtecapaciteit per Kelvin C_p (J/kgK) van het koudemiddel. Door de drukverhouding in de compressor groter te zetten, krijgt men in de leiding een snellere stromingssnelheid en dus een groter koelvermogen in de verdamper.

$$\dot{Q} = \dot{m}C_p \quad (3)$$

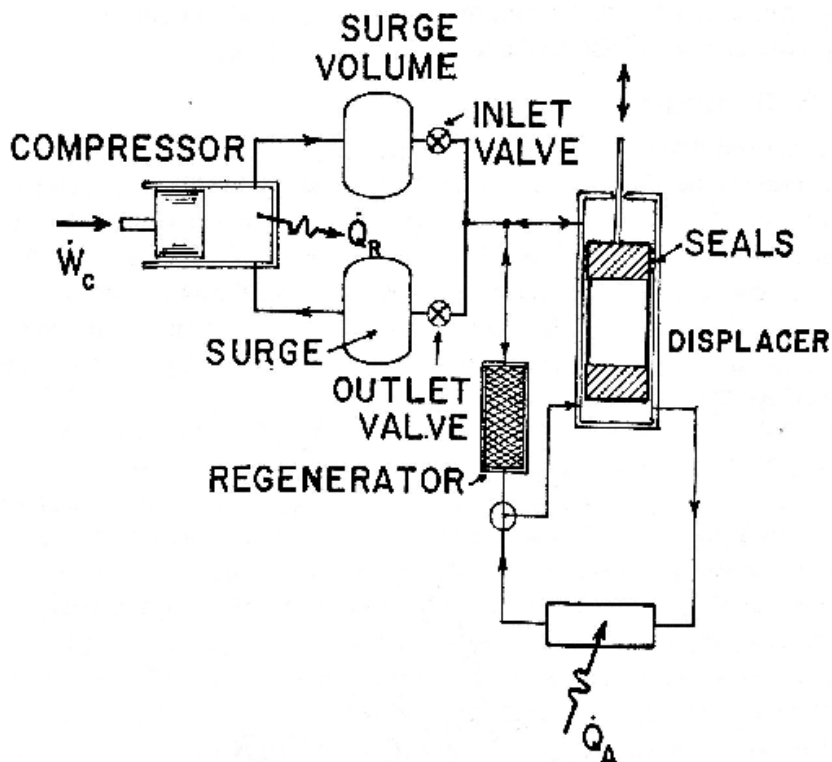
Een perfect systeem bestaat echter niet. Het belangrijkste nadeel is de minimale temperatuur waarmee men dit systeem kan bereiken. Met een goede isolatie en een juiste combinatie van koudemiddelen kan men met een cascade dampcompressiesysteem tot ongeveer -100 °C afkoelen. Indien men nog dieper wilt afkoelen, dient men naar een drietraps- of een ander systeem over te stappen.

2.2.2. Cryogene koeler

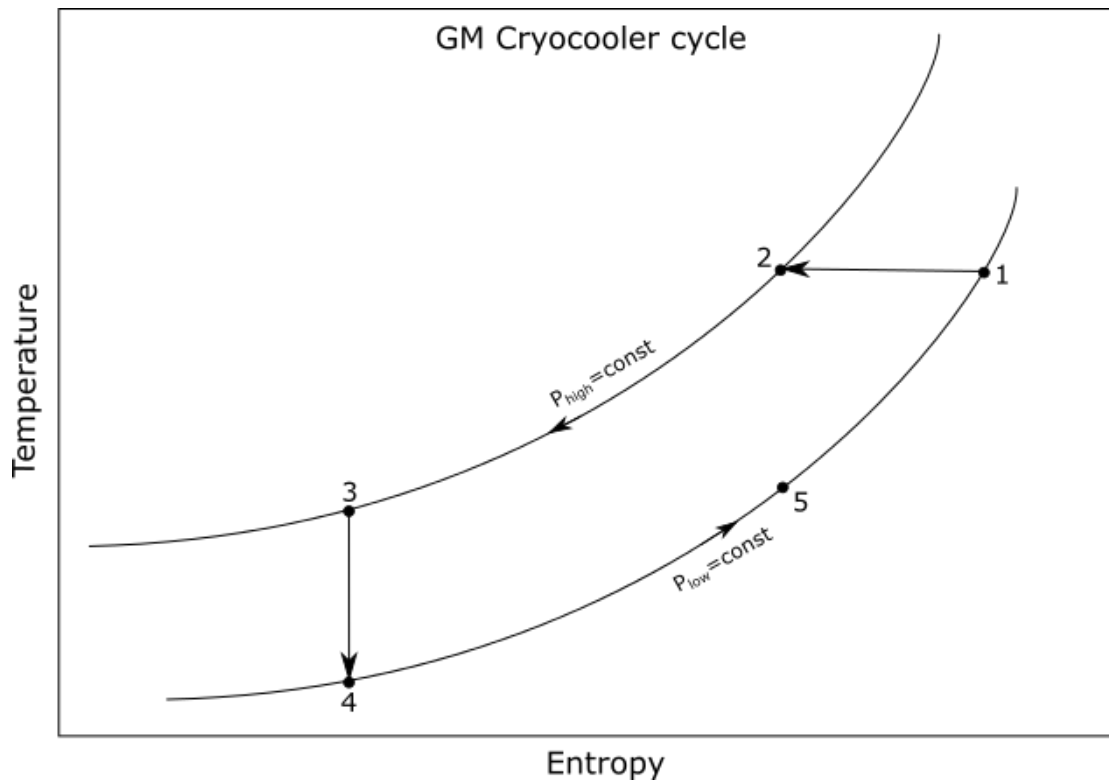
Om een object tot de cryogene temperatuur af te koelen of een cryogeen systeem binnen een bepaald temperatuurgebied te houden, maakt men vaak gebruik van de zogenoemde cryokoeler. Er zijn momenteel verschillende soorten van cryokoelers verkrijgbaar op de markt, maar de meest geschikte types om een klein monster tot cryogene temperatuur te brengen zijn de *Gifford-McMahon* (GM) cryokoeler en de pulsbuskoeler. Deze genereren, via een ingebouwde *coldhead*, gasstromingen om de warmtewisseling te realiseren.

Gifford-McMahon cryokoeler

De GM-cryokoeler is een variant die in de jaren 50 werd uitgevonden door Gifford en McMahon. De cyclus van een GM-koeler wordt weergegeven in Figuur 11 en Figuur 10. Het is te zien dat iedere cyclus uit een isotherm, een isentroop en twee isobare stappen bestaat. De overeenkomstige posities van de zuiger voor die vier stappen zijn te zien in Figuur 11. De koeling wordt verwezenlijkt door de warmtewisseling tussen de coldhead en zijn omgeving. De koeler in dit geval bestaat uit een cilinder, een zuiger en een regenerator (zie Figuur 9). De onderkant van de cilinder is het koudste punt van het systeem en de bovenkant is vaak op de omgevingstemperatuur. De regenerator is verbonden met de cilinder en fungeert als een warmtewisselaar. De zuiger wordt via een compressor door een externe motor aangedreven. Deze aandrijving zorgt ervoor dat de zuiger altijd op zijn twee uiterste posities staat. In de praktijk wordt vaak de regenerator ingebouwd in de zuiger zodat er een compactere constructie verkregen wordt (Mountain Instruments, 2016).



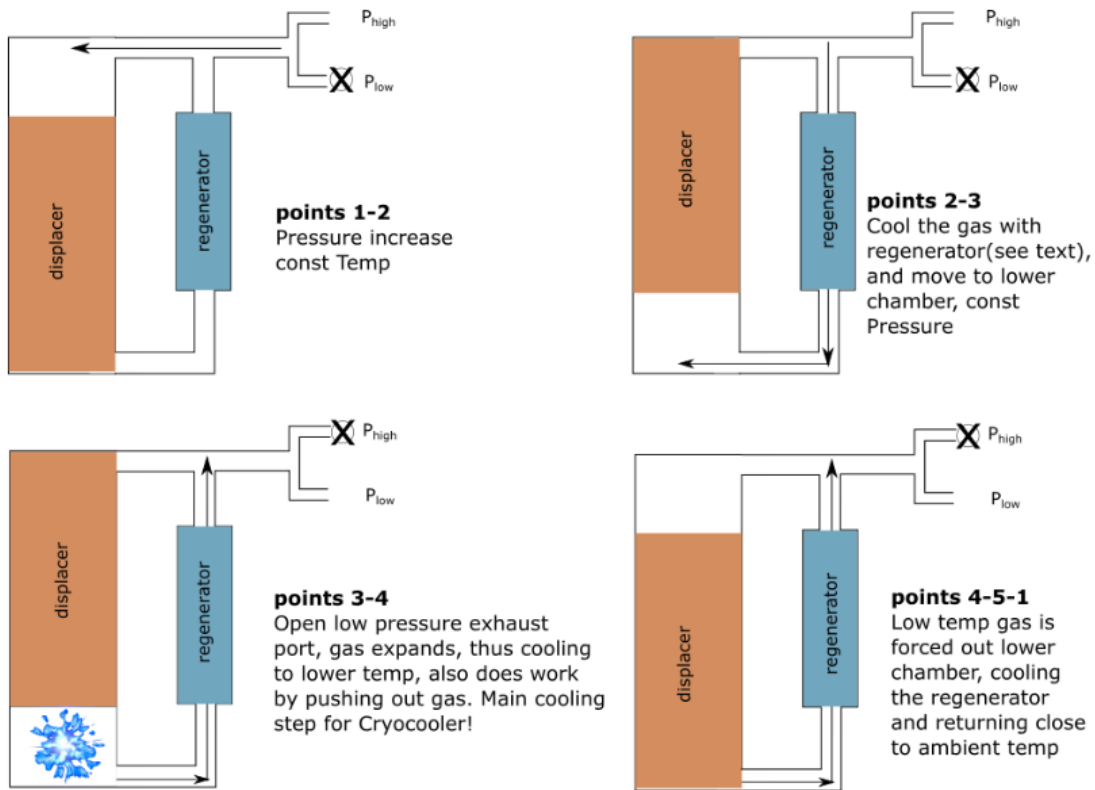
Figuur 9: Gifford_McMahon (GM) cryocooler (Barron, R. F, *The CRC handbook of thermal engineering*, 2000, p. 4-324)



Figuur 10: Ts-Diagram van de GM-cryocooler (Mountain Instruments, UNDERSTANDING THE GIFFORD-MCMAHON CRYOCOOLER CYCLE: SINGLE STAGE, 2016)

Stapsgewijze wordt de werking van een GM-koeler hieronder uitgelegd (Mountain Instruments, 2016):

- 1→2
Wanneer de hogedrukpoort open wordt het gas gecomprimeerd. Daardoor heerst er op de bovenkant van de zuiger een overdruk. Deze overdruk zorgt ervoor dat de zuiger naar zijn onderste positie geduwd wordt. Gedurende deze stap blijft de temperatuur in de cilinder constant en de warmte wordt afgestaan aan de omgeving van de warme zijde.
- 2→3
Met een open hogedrukpoort en een gesloten lagedrukpoort, zal de zuiger naar zijn bovenste stand bewegen. Hierbij wordt het gas in de bovenste helft van de cilinder langs de regenerator naar de onderste helft geduwd. Gedurende deze stap blijft de druk in de cilinder constant en de vooraf gekoelde regenerator koelt het gas verder af.
- 3→4
Wanneer de zuiger zich op zijn bovenste positie bevindt en de lagedrukpoort open, expandeert het gas in de onderste helft van de cilinder. Deze isotherme expansie duwt het gas via de regenerator naar de lagedrukpoort.
- 4→5→1
In deze stap beweegt de zuiger zich naar beneden en het afgekoelde gas wordt teruggeduwd naar de regenerator. Als gevolg daarvan, wordt de temperatuur in de regenerator terug naar beneden gebracht.



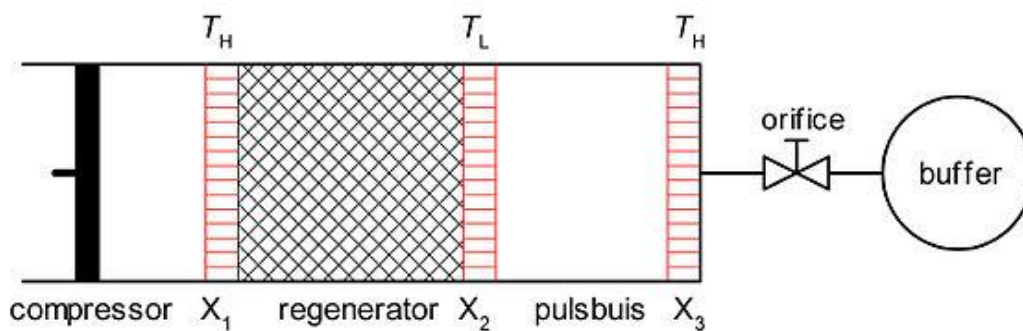
Figuur 11: Configuration of the GM system during a cycle (Mountain Instruments, UNDERSTANDING THE GIFFORD-MCMAHON CRYOCOOLER CYCLE: SINGLE STAGE 2016)

Met enkel een coldhead en een compressor, is de GM-koeler qua constructie veel compacter dan een dampcompressiesysteem. Het grotere temperatuurbereik maakt het ook één van de meest geschikte koeltechnieken voor cryogene toepassingen. Maar het beperkte koelvermogen en de kostprijs zijn hier de beperkende factoren.

Pulsbuiskoeler

De pulsbuiskoeler is een relatieve nieuwe technologie die in de jaren 80 werd uitgevonden. In vergelijking met de GM-koeler kan de pulsbuiskoeler (*Pulse Tube Cryocooler*) vervaardigd worden zonder bewegende onderdelen, wat een enorm voordeel levert voor trillingsgevoelige toepassingen.

De ontwikkeling van de pulsbuiskoeler is in de afgelopen jaren veel doorgezet en ook varianten werden uitgevonden. Een van de velen is de stirling-type single-orifice pulsbuiskoeler die een gelijkaardige werking als het oorspronkelijke model heeft. Maar in tegenstelling tot het beperkte temperatuurbereik van de oudere types (± 100 K), kan dit model een lagere temperatuur (± 60 K) bereiken (Wikipedia, 2017).



Figuur 12: Schema van een Stirling-type pulsbuiskoeler met orifice (Wikipedia, Pulse tube refrigerator, 2017)

De constructie van een pulsbuiskoeler met orifice verschilt niet veel van een gewone pulsbuiskoeler. Volgens E.I. Mikulin et al (1984) is de koeler gevuld met vloeibare helium bij een druk van 10 tot 30 bar. Als basiscomponenten heeft dit systeem een compressor, twee hoge temperatuur warmtewisselaars (X1 & X3) en een lage temperatuur warmtewisselaar (X2). In dit geval heeft het systeem nog een stromingsweerstand (orifice) en een buffervolume dat op een constante druk staat. De ruimte tussen de X1 en X2 is gevuld met poreuze materialen en wordt als de regenerator genoemd. Wat betreft de eigenschappen van het materiaal in de regenerator, moeten ze een zo hoge mogelijk warmtecapaciteit en een laag stromingsweerstand hebben. De ruimte tussen de X2 en X3 is de pulsbus die thermisch geïsoleerd is van zijn omgeving. Dankzij de vacuümisotatie tussen X1 en X3, zal het gas warmer worden bij een drukverhoging en kouder bij drukverlaging.

De pulsbuiskoeler kan eveneens verdeeld worden in twee delen, een warmte zijde en een koude zijde. Ieder werkt als volgt:

Wanneer de zuiger van de compressor van links naar rechts beweegt, stroomt het gas door de regenerator. De regenerator neemt de warmte op en de temperatuur in het gas daalt van T_H naar T_L bij deze hogedruk. Bij het terugkeren, daalt de druk in het gas en als resultaat worden de gasdeeltjes nog kouder dan T_L . Maar de temperatuur in X2 moet constant blijven, dus moet er warmte uit de omgeving getrokken worden.

Aan de warme kant treedt net het tegenovergestelde effect op. Wanneer het gas nabij X3 de orifice binnentreedt, ervaren de gasdeeltjes een lagedruk en beginnen ze warmte op te nemen. Hierbij stijgt de temperatuur in het gas naar T_H . Bij het uitstromen staat het gas op een hogere druk, bijgevolg moet de temperatuur in het gas stijgen tot een waarde die hoger is dan T_H . O.w.v. de thermische isolatie blijft X3 op een constante temperatuur en geeft het warmte af.

In tegenstelling tot de pulsbuskoeler heeft de GM-koeler wel een zuiger die ervoor zorgt dat de expansie en de compressie op verschillende plaatsen optreden. Maar deze constructie zonder zuiger maakt de pulsbus juist eenvoudiger en betrouwbaarder. Bovendien voorkomt ze ook mogelijke resonantiefrequenties die de koeler met zich zou meebrengen. Niettemin zijn de kostprijs en de montage wijze de beperkende factoren van dit soort koeler. De pulsbuskoeler is duurder dan de GM-koeler en heeft ook hogere eisen op de positionering. Om de pulsbuskoeler perfect te laten functioneren, moet die ook in een verticale richting gemonteerd worden. Integendeel laat de GM-koeler kleine hoekverschillen toe, maar het zal ook wat koelvermogen verliezen.

2.3. Isolatie

Dit hoofdstuk bespreekt drie gangbare thermische isolaties voor een cryogeen systeem, nl. de vacuüm-, de poeder- en de meerlaagsisolatie.

2.3.1. Vacuümisolatie

In een vacuümsysteem zijn de warmtegeleiding en warmtestraling de twee middelen om warmteoverdrachten te realiseren. De warmtegeleiding is proportioneel met de dichtheid van het gas en de gemiddelde afstand tussen de gasdeeltjes. Die bepalen hoe groot de kans is voor gasdeeltjes om met elkaar te kunnen botsen. Uit experimenten vindt men dat de thermische geleidbaarheid, ongeacht hoe groot de temperatuurverandering is, ongeveer constant blijft bij een constante druk. Dezelfde trend is ook te zien bij de afstand tussen gasdeeltjes. Deze gemiddelde afstand wordt steeds groter bij een dalende druk. Uiteindelijk zal de warmtegeleiding tussen de gasdeeltjes verwaarloosbaar klein worden vanaf een onderdruk van ± 113 Pa (Guyer & Brownell, 1989, pp. 11-16). Hierbij wordt de warmtestraling in het systeem veel belangrijker en de emissiecoëfficiënt van het materiaal speelt dan een zeer belangrijke rol.

De warmteflux via geleiding door heen een wand kan berekend worden met onderstaande formule (Wikipedia, 2017). Hierbij is de flux \dot{q}'' (W/m^2) evenredig met de conductiecoëfficiënt van het materiaal of de temperatuurgradiënt tussen de contactoppervlakten.

$$\dot{q}'' = -k\nabla T \quad (4)$$

Met:

- k : de conductiecoëfficiënt, $W/(mK)$
- ∇T : de temperatuurgradiënt, K/m

De formule voor de warmtestraling tussen twee parallelle wanden ziet er als volgt uit (Ralph C. Longworth, 1989, pp. 11-16):

$$\dot{q}'' = \sigma(T_{wand}^4 - T_{omg}^4) \frac{E}{1 + N} \quad (5)$$

Met:

- σ : de constante van Stefan-Boltzmann, $5.67 * 10^{-12} W/cm^2K^4$
- T_{wand} : de temperatuur van de contactoppervlakte, K
- T_{omg} : de omgevingstemperatuur, K
- E : de totale emissiecoëfficiënt, $ms^{-3}sr^{-1}$
- N : het aantal wanden

Deze vergelijking wordt vaak gebruikt bij cryogene toepassingen met meerdere wanden. Deze wanden dienen als de "radiation shields" en zijn zeer doeltreffend om het warmtevlies via stralingen tegen te gaan. Verder is de totale emissiecoëfficiënt van een systeem zonder radiation shields gelijk aan: (Ralph C. Longworth, 1989, pp. 11-16)

$$\frac{1}{E} = \frac{1}{\epsilon_1} + \frac{1}{\epsilon_2} - 1 \quad (6)$$

Met:

- $\epsilon_{1,2}$: de emissiecoëfficiënten van twee tegenovergestelde oppervlakten, $ms^{-3}sr^{-1}$

Tabel 1: Emissiecoëfficiënten bij cryogene temperaturen

Oppervlakte	Temperatuur (K)		
	4	77	300
Aluminium			
Hoge zuiverheid, getemperd	0,011	0,018	0,03
Commercieel	0,018	0,03	0,05-0,08
Koper			
Hoge zuiverheid		0,008	
ETP	0,06	0,015	0,02
Commercieel	0,054	0,075	
RVS			
304, gepolijst		0,03	0,05
Commercieel	0,078	0,15	

Gegevens afkomstig van: Guyer & Brownell, *Handbook of applied thermal design*, 1989, p. 11-16

In Tabel 1 staan de experimenteel bepaalde waarden voor de meest gebruikte materialen in cryogene systemen. De emissiecoëfficiënt daalt bij een stijgende temperatuur of hogere materiaalzuiserheid. Opmerkelijk daalt de emissiecoëfficiënt eveneens bij ruwere oppervlakken (Ralph C. Longworth, 1989, pp. 11-16).

2.3.2. Poederisolatie

Volgens Ralph C. Longworth (1989) is poederisolatie ook één van de meeste voorkomende isolatietechniek in cryogene systemen en maakt meestal gebruik van perliet, vermiculiet of aerogel korrels. Het voordeel is dat men de korrels gemakkelijk in de te isoleren ruimte kan gieten en het verwijderen van die korrels gebeurt even snel. Daardoor wordt de poederisolatie vaak gebruikt voor systemen met ingewikkelde structuren. Maar het heeft ook een aantal nadelen. De poederisolatie vergt vaak een vormgevende structuur. Bovendien is de poederisolatie ook niet waterdicht en moet bij een koele omgeving bewaard worden.

De thermische prestatie van de gebruikte korreltjes is direct gerelateerd met de thermische geleidbaarheid van de gasdeeltjes tussen de poriën. Om een minimum geleidbaarheid te krijgen dient men het aanwezige gas in het systeem af te pompen. Verder kan het stralingsverlies ook beperkt worden door een passende korrelgrootte of een reflectief poedermateriaal te kiezen. Koper- en aluminium vlokken komen hiervoor in aanmerking.

Tabel 2: Poederisolaties

Materialen	Maximale bedrijfstemperatuur (K)	Dichtheid (kg/m ³)	Thermische geleidbaarheid (W/m-k)
Perliet	1255	112	0,0418
Vermiculiet	1033	144	0,0677
Silica areogel	977	80	0,0303
Silica aerogel met 15 wt% koolstof	977	116	0,0135
Kurk	366	208	0,049
Diatomaceuze silica	1144	240	0,0577

Gegevens afkomstig van: Ali Reza Moazed, *Handbook of applied thermal design*, 1989, p. 3-25

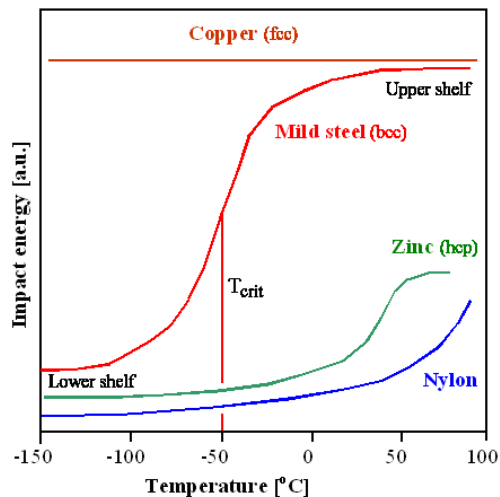
2.3.3. Meerlaagsisolatie

MLI(Multi-Layer Insulation) is ook een gepaste keuze voor lage temperatuur toepassingen. De meeste voorkomende MLI's op de markt hebben een sandwichstructuur met twee gealuminiseerde folies en een tussenlaag van glasvezel. De glasvezeltussenlaag minimaliseert de warmteflux doorheen deze isolatie. Bovendien is er geen lijm of ander adhesiemiddel in deze tussenlaag dat de warmtegeleiding bevordert. Het stralingsverlies kan men beperken door reflectieve materialen aan te brengen of metalen te deponeren. (Riede P.M., 1960).

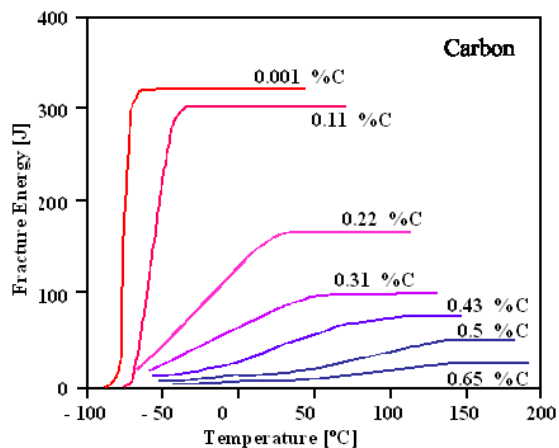
Om het beste isolerende effect te krijgen moet de MLI bij een onderdruk van 1,33 mPa functioneren. Bij deze lagedruk is er geen convectie mogelijk. Bijvolg heeft men bij dit soort isolatie een thermische geleidbaarheid van $\pm 0,043$ mW/m-K. (Barron, 2000, pp. 4-332)

2.4. Opbouw materiaal

Als opbouw materiaal voor een cryogene toepassing wilt men vaak een sterk materiaal bij lage temperaturen. Metalen, één van de meest gebruikte materialen hebben een goede combinatie van sterkte en taaiheid. Maar bij lage temperaturen treedt er bij sommige metalen een zogenoemde “Ductile to Brittle Transition” (DBT) op. Dit is de transitietemperatuur waarbij een ductiel materiaal zich bros begint te gedragen. Echter is dit fenomeen enkel te zien bij materialen met een kubisch ruimtelijk gecentreerde structuur en een typisch voorbeeld is pure ijzer. (Wikipedia, 2017) De experimenteel bepaalde DBTT van pure ijzer is ongeveer $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$. (zie Figuur 13)



Figuur 13: DBTT uit kerfslagproef (Föll, Ductile to Brittle Transition or Cold Shortness, 2015)



Figuur 14: DBT in koolstofstaal (Rinebolt, Transaction American Society for Metals vol. 53, 1951)

Figuur 14 laat zien hoe de transitiefase van koolstofstalen met verschillende koolstofgehalten verloopt. Het is duidelijk dat deze ductile-to-brittle temperatuur van het koolstofstaal lager wordt naarmate het koolstofgehalte stijgt.

Om de mechanische eigenschap van het materiaal te evalueren, gebruikt men vaak de term: vloeispanning (Pa). De vloeispanning is vrijwel belangrijk voor alle lage temperatuur toepassingen. Deze term geeft aan hoeveel spanning het materiaal aankan voordat de plastische vervorming begint op te treden. Bij een zeer lage temperatuur kan deze vloeispanning oplopen tot 200% in metalen en 500% in kunststoffen. In het algemeen kiest men vaak koper, aluminium en austenitisch rvs als de keuze van materiaal voor een cryogeen systeem (Kent, 1993, p. 14).

Bij cryogene temperaturen is de vloeispanning afhankelijk van de kristalstructuur van het materiaal. Metalen met een kubisch vlak gecenterd structuur (KVC), zoals: aluminium, koper en nikkel, ervaren een kleine toename in de vloeispanning en een grote toename in de treksterkte bij verlaagde temperaturen. Maar in dezelfde omgevingstoestand, ziet men een stijging in zowel de vloeispanning als de treksterkte bij metalen met een kubisch ruimtelijk gecenterd structuur (KRC) (McHenry, 1989, pp. 4-4).

Zowel austenitisch rvs en aluminiumlegeringen zijn geschikt voor lage temperatuur omgevingen. Austenitisch rvs is een legering van voornamelijk ijzer, chroom, nikkel en mangaan. AISI-300, als reeks daarvan heeft matige sterkte en uitstekende taaheid. De specifieke soorten 304N en 316N zijn met stikstof versterkt en worden het meest toegepast bij cryogene temperaturen. Aluminiumlegeringen met een KVC-structuur kunnen hoge sterkte en taaheid behouden bij lage temperaturen. (McHenry, 1989, pp. 4-6) Onderaan is een tabel met de mechanische eigenschappen van die materialen.

Tabel 3: Mechanische eigenschappen van AISI 304N & 316N en aluminiumlegeringen

Legering		Temperatuur (°C)	Vloeispanning (MPa)	Treksterkte (MPa)
Benaming	Legeringselementen			
AISI 304N	20Cr, 12Ni	20	285	590
		-195	681	1496
		-270	814	1703
AISI 316N	18Cr, 14Ni, 3Mo, 0.16N	20	649	342
		-195	1220	765
		-270	1503	986
2219- T851	5,8-6,8Cu	20	371	466
		-195	440	568
		-270	484	659
6061- T651	0,4-0.8Si, 0,8-1,2Mg	20	291	309
		-195	337	402
		-270	379	483
7075- T5351	1,0-1.8mg, 4,0- 5,0Zn	20	379	427
		-195	465	572
		-270	521	672

Gegevens afkomstig van: McHenry, Handbook of applied thermal design, 1989, p. 4-7

2.5. Afdichtingselementen

Volgens een artikel van Pfeiffer Vacuum GmbH (2017) worden vaak metalen afdichtingselementen gebruikt voor lage temperatuur toepassingen. Die hebben een lange levensduur en kunnen beter tegen het doordringingsvermogen van straling en gas. De meest gebruikte materialen hiervoor zijn koper, aluminium en indium.

Metalen afdichtingselementen vereisen een hogedruk om de plastische vervormingen op te treden. Bij plastische vervorming vullen ze de spelingen tussen twee contactoppervlakten. Om die reden kunnen ze enkel eenmaal gemonteerd worden.

KF- en ISO-flensen zijn uit rvs vervaardigd en hebben ook een binnenflens voor de afdichtingselementen. Hiervoor worden vaak aluminium afdichtingen gebruikt en die vereisen een contactkracht van ± 100 N voor iedere millimeter van de af te dichten lengte. Dankzij het verschil in de thermische uitzettingscoëfficiënten tussen rvs en aluminium, is zijn maximale bedrijfstemperatuur beperkt tot ± 150 °C.

Koper afdichtingen worden vooral gebruikt bij vlakke flensen, nl. de CF- en COF-flensen. In tegenstelling tot de aluminium afdichtingen, heeft koper bijna dezelfde thermische uitzettingscoëfficiënt als austenitisch rvs. De maximale bedrijfstemperatuur van dit soort afdichting is ongeveer 200 °C en het kan tot 450 °C oplopen door een zilveren coating aan te brengen. Bovendien kan koper heel snel oxideren bij hoge temperatuur. Om die reden kiest men vaak enkel OF- (Oxygen Free) of OFHC (Oxygen Free High Conductivity) -koper voor de afdichtingselementen.

Indium afdichtingen zijn het meeste gebruikte soort bij cryogene toepassingen. Die hebben een lagere hardheid dan alle bovenvermelde materialen en vereisen ook veel kleinere contactkrachten om ze te doen vervormen. Echter, het grootste nadeel van dit materiaal is zijn maximale bedrijfstemperatuur. Het heeft een relatieve lage bedrijfstemperatuur van ± 100 °C en bij nog hogere temperaturen zal het materiaal beginnen te smelten. Hieronder is een tabel met de voornaamste eigenschappen van de mogelijke materialen.

Tabel 4: Vergelijking tussen metalen afdichtingselementen

Materiaal	Contactkracht per lengte-eenheid (N/mm)	Maximale bedrijfstemperatuur (°C)
Aluminium	30 - 200	150
Koper	150 - 600	450
Indium	± 7	100
Goud	100 - 500	800

Gegevens afkomstig van: Pfeiffer Vacuum GmbH, Metal seals, 2017

3. Berekeningen

3.1. De invloed van de stromingsnelheid op de afkoel- of opwarmingsnelheid

In deze paragraaf wordt de afkoelingsnelheid van een ijzeren monster binnen het temperatuurgebied van -60 tot -80 °C berekend. In dit gebied is het temperatuurverschil tussen het koudemiddel en de omgeving klein. Om die reden zal het koelvermogen van het systeem fors dalen in dit gebied.

Het ijzeren monster bevindt zich in een met stikstofgas gevulde kamer en een ventilator blaast over het monster met een stromingsnelheid van 10 m/s. Om de berekening te vereenvoudigen wordt hierbij verondersteld dat de temperatuur van het stikstofgas reeds afgekoeld is tot -80 °C. In werkelijkheid is dit nooit het geval. De temperatuur van het gas daalt samen met die van het monster. Tenslotte heeft het monster de volgende eigenschappen. (zie Tabel 5)

Tabel 5: Parameters van het ijzer monster

Ijzeren monster	
B	0,04 m
L	0,10 m
t	0,01 m
ρ	7870 kg/m ³
C_p	450 J/kg-K
k	58 W/m-K

De gasstroom is de oorzaak van de gedwongen convectie en bepaalt het koelvermogen op het monster. De totale warmteoverdracht op het monster is afhankelijk van de convectieve warmteoverdrachtcoëfficiënt (of de filmcoëfficiënt) en de warmtegeleidbaarheid van het materiaal. Om de filmcoëfficiënt te berekenen moeten eerst de eigenschappen van het gas gekend zijn en die staan weergegeven in Tabel 6.

Tabel 6: Eigenschappen van stikstofgas bij kamertemperatuur

Stikstofgas	
ρ	1,25 kg/m ³
ν	$1,6 \cdot 10^{-5}$ m ² /s
C_p	1040 J/kg-K
k	0,024 W/m-K

Bovendien is de filmcoëfficiënt van het monster in functie van het Nusselt-getal, dat weer gebonden is met twee andere dimensieloze getallen, nl. het Reynoldsgetal en het Prandtl-getal. Het Reynoldsgetal bepaalt of een stroming laminair of turbulent is en wordt uitgedrukt als volgt:

$$Re = \frac{vL\rho}{\mu} = \frac{vD\rho}{\mu} \quad (7)$$

Met:

- v : de karakteristieke snelheid (m/s)
- L : de karakteristieke lengte (m)
- ρ : de dichtheid van het stromende fluïdum (kg/m³)
- μ : de dynamische viscositeit van het stromende fluïdum (kg/m-s)
- ν : de kinematische viscositeit van het stromende fluïdum (m²/s)

Na het invullen van de gegevens:

$$Re = \frac{vD\rho}{\mu}$$
$$= \frac{10 \frac{m}{s} * 0,04 m * 1,25 kg/m^3}{1,6 * 10^{-5} kg/m * s} = 3215$$

De bekomen waarde voor het Reynoldsgetal in dit geval is 3215. Voor een plaat betekent dit dat de stroming laminair is. (Charmchi, 1989, pp. 1-65)

Vervolgens moet het Prandtl-getal bepaald worden. Het Prandtl-getal weergeeft de verhouding tussen impuls- en warmteoverdracht en kan berekend worden met onderstaande formule.

$$Pr = \frac{v}{\alpha} = \frac{\mu c_p}{k} \quad (8)$$

Met:

- v : de kinematische viscositeit van het stromend fluïdum (m^2/s)
- α : de temperatuurvereffeningscoëfficiënt (m^2/s)
- μ : de dynamische viscositeit van het stromend fluïdum ($kg/m \cdot s$)
- c_p : de warmtecapaciteit van het stromend fluïdum bij constante druk ($J/kg \cdot K$)
- k : de thermische geleidbaarheid van het stromend fluïdum ($W/K \cdot m$)

Na het invullen van de gegevens:

$$Pr = \frac{\mu c_p}{k}$$
$$= \frac{1,6 * 10^{-5} (kg/m * s) * 1,04 (J/kg * K)}{0,024 (W/m * K)} = 0,7$$

Het berekeningsresultaat is een Prandtl-getal van 0,7. Wanneer het Prandtl-getal groter is dan 0,6 en het Reynoldsgetal kleiner is dan 5×10^5 , kan men het lokale Nusselt-getal, volgens (Charmchi, 1989), met de onderstaande vergelijking berekenen.

$$Nu_L = 0,664 Re_L^{1/2} Pr^{1/3} \quad (9)$$
$$= 0,664 * 3215^{1/2} * 0,7^{1/3} = 33$$

Hierbij is het gemiddelde lokale Nusselt-getal over een isotherme plaat gelijk is aan 33. Verder kunnen we met dit getal de filmcoëfficiënt bepalen met de volgende vergelijking.

$$Nu = \frac{hL}{k} \quad (10)$$

Met:

- h : de filmcoëfficiënt van het monster ($W/K \cdot m^2$)
- L : de karakteristieke lengte (m)
- k : de thermische geleidbaarheid van het stromend fluïdum ($W/K \cdot m$)

Na het omvormen en het invullen van de gegevens:

$$h = Nu \frac{k}{L}$$
$$= 33 * \frac{58 (W/mK)}{0,1 (m)} = 7,88 (W/m^2K)$$

Hierbij zijn het Nusselt-getal en de thermische geleidbaarheid reeds bepaald. De filmcoëfficiënt in dit geval is gelijk aan 7.88.

Eenmaal de filmcoëfficiënt gekend is kan men pas de totale warmteoverdrachtscoëfficiënt berekenen. De totale warmteoverdrachtscoëfficiënt U is afhankelijk van zowel de filmcoëfficiënt h als de thermische geleidbaarheid k van het materiaal. De formule voor de totale warmteoverdrachtscoëfficiënt ziet er als volgt uit:

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{h} + \frac{t}{k} \quad (11)$$

Met:

- U : de totale warmteoverdrachtscoëfficiënt ($W/K \cdot m^2$)
- h : de filmcoëfficiënt van het monster ($W/K \cdot m^2$)
- k : de thermische geleidbaarheid van het stromend fluïdum ($W/K \cdot m$)

Na het invullen van de getallen:

$$U = \left(\frac{1}{h} + \frac{t}{k} \right)^{-1}$$
$$= \left[\frac{1}{7,88} \left(\frac{m^2K}{W} \right) + \frac{0,005}{58} \left(\frac{m^2K}{W} \right) \right]^{-1} = 7,88 (W/m^2K)$$

Aangezien de convectieve warmteoverdracht een groter aandeel heeft in de bovenstaande formule, krijgt men een totale warmteoverdrachtscoëfficiënt die bijna gelijk is aan de filmcoëfficiënt. Daarna kunnen we met de wet van Fourier (vergelijking 12) het koelvermogen op het monster bepalen.

$$P_{koel} = \dot{Q}_{koel} = UA(T_{sample} - T_{N2}) \quad (12)$$

Ten slotte staat de snelheid van temperatuurverandering in functie van het reeds bepaalde koelvermogen.

$$P_{koel} = \dot{Q}_{koel} = mc_p \frac{dT}{dt} \quad (13)$$
$$\frac{dT}{dt} = \frac{\dot{Q}_{koel}}{mc_p}$$

Tabel 7 geeft de berekeningsresultaten voor de koelvermogens en de afkoelsnelheden in het temperatuurgebied van -60 °C tot -80 °C.

Tabel 7: Berekende afkoelsnelheden van het ijzer monster bij gedwongen convectie

T (°C)	P (W)	dT/dt (°C/min)
-60	0,57	0,240
-65	0,43	0,180
-69	0,31	0,132
-75	0,14	0,060
-79	0,03	0,012

De gemiddelde afkoelsnelheid in dit temperatuurgebied is 0,12 °C/min en wordt gerealiseerd met een stromingsnelheid van 10 m/s. Indien de afkoelsnelheid nog verhoogd moet worden, dient men rekening te houden met de turbulentie van de gasstroming. Want het lokale Nusselt-getal daalt bij een turbulente stroming. Bijgevolg dalen de filmcoëfficiënt en het koelvermogen ook mee.

De onderstaande formule voor het gemiddelde Nusselt-getal van een turbulente stroming is enkel geldig op voorwaarden dat $5 \cdot 10^5 < Re_L < 10^7$ en $Pr > 0,6$. (Charmchi, 1989, pp. 1-66) Een Reynoldsgetal van $5 \cdot 10^5$ wilt zeggen dat gasstroming een minimale snelheid van ± 160 m/s moet hebben.

$$Nu_L = 0,036(Re_L^{0,8} - 9200)Pr^{0,43} \left(\frac{\mu_\infty}{\mu_w}\right)^{0,25} \quad (14)$$

Kort samengevat, de afkoelsnelheid van het monster kan men versnellen door de windsnelheid te verhogen. Maar de limietwaarde van 160 m/s is de grens van turbulentie en mag nooit overschreden worden.

3.2. Vergelijking tussen inerte gassen

De eerdere berekeningsresultaten worden gerealiseerd door stikstofgas als het fluidum te gebruiken. In deze paragraaf zullen die berekeningen opnieuw gedaan worden met argon- en heliumgas. Onderaan is een tabel met de benodigde gegevens van die gassen.

Tabel 8: Eigenschappen van de inerte gassen bij kamertemperatuur

	Stikstofgas	Argongas	Heliumgas	
Dichtheid, ρ	1,25	1,78	1,78	kg/m ³
Dynamische viscositeit, μ	1,60E-05	2,10E-05	1,87E-05	N- s/m ²
Warmtecapaciteit, c_p	1,04E+03	5,22E+02	5,19E+03	J/kg-K

De thermische prestaties van deze gassen worden vooral beoordeeld op het convectieve koelvermogen en de energieverandering voor iedere Kelvin temperatuurverandering. De filmcoëfficiënt, zoals eerder werd besproken, is een belangrijke indicator voor de efficiëntie van de convectieve warmteoverdracht. Door het lokale Nusselt-getal over een plaat te herrekenen voor verschillende stromingssnelheden, kan men via vergelijking 10 de filmcoëfficiënten bepalen. Hieronder is een tabel met de opnieuw bepaalde filmcoëfficiënten voor ieder inert gas.

Tabel 9: Filmcoëfficiënten met verschillende inert gassen (W/m^2K)

Snelheid	Stikstofgas	Argongas	Heliumgas
1 m/s	2,49	2,26	4,96
2 m/s	3,53	3,20	7,01
5m/s	5,38	5,06	11,09
10 m/s	7,61	7,15	15,68
15 m/s	9,66	8,76	19,21

Hierbij is te zien dat de filmcoëfficiënten toenemen bij versnelde stromingssnelheden. Echter is de realiseerbare filmcoëfficiënt met heliumgas ongeveer tweemaal groter dan die met stikstof- of argongas.

Daarna worden de opgenomen warmte voor ieder temperatuurverschil berekend. Het interne volume van de kamer wordt verondersteld op ± 50 L en de warmtecapaciteiten van alle gassen zijn te vinden in Tabel 8. Met de algemene formule van de warmtecapaciteit (15) kan men deze warmteafname berekenen.

$$Q = c_p m \Delta T \quad (15)$$

Met de uitkomsten in tabelvorm:

Tabel 10: Opgenomen warmte van inerte gassen bij 1K temperatuurverandering

	Warmte (J)
Stikstofgas	65
Argongas	46
Heliumgas	465

De trend in deze tabel is vergelijkbaar met die voor de filmcoëfficiënten. Heliumgas, met een grotere thermisch massa, neemt veel meer energie op ($\pm 7 \times$) dan stikstof- en argongas. D.w.z. dat de afkoel-/ opwarmingsnelheid in het heliumgas ongeveer zevenmaal trager is. Hierdoor blijkt dat stikstof- en argongassen betere opties zijn voor de convectieve warmteoverdracht.

Niettemin, wordt hier toch het stikstofgas als het medium gekozen. Enerzijds is het verschil tussen de twee gassen zeer klein. Het argongas geven in dit geval enkel $\pm 10\%$ minder energie af. Anderzijds heeft de filmcoëfficiënt een grotere wegingsfactor dan de afgegeven energie. Want alle componenten worden met verschillende snelheden afgekoeld. Maar de gasstroming moet eerst afgekoeld worden om de energieverschillen tussen de componenten te kunnen compenseren via de convectieve warmteoverdracht.

3.3. De filmcoëfficiënt van de leiding i.f.v. de binnendiameter

Voor de toepassing binnen het temperatuurbereik van -80 °C tot 100 °C, kan men gebruik maken van een temperatuurregelsysteem van het merk Julabo. Dit toestel kan ten diepste tot -85 °C afkoelen en zijn bovenste temperatuurlimiet ligt op 250 °C. Daarnaast circuleert het een speciale thermische vloeistof in een extern systeem om zijn vermogen over te dragen. Het temperatuurbereik van die vloeistof is echter kleiner, van -85 °C tot 170 °C,

Met de bedoeling om het vermogen van dat toestel door te geven, wordt het gekoppeld aan een koperen leiding. Het doel van dit hoofdstuk is om de diameter van die leiding te dimensioneren. De standaard leidingdiameters voor koeltechnieken, volgens ASTM international (2008), staan hieronder in Tabel 11 weergegeven.

Tabel 11: Standaard dimensies voor koeltechnische koperen leidingen

Standard Size, in.	Outside Diameter, in. (mm)	Wall Thickness, in. (mm)	Weight, lb/ft (kg/m)
3/8	0.375 (9.52)	0.030 (0.762)	0.126 (0.187)
1/2	0.500 (12.7)	0.035 (0.889)	0.198 (0.295)
5/8	0.625 (15.9)	0.040 (1.02)	0.285 (0.424)
3/4	0.750 (19.1)	0.042 (1.07)	0.362 (0.539)
7/8	0.875 (22.3)	0.045 (1.14)	0.455 (0.677)
1 1/8	1.125 (28.6)	0.050 (1.27)	0.655 (0.975)
1 3/8	1.375 (34.9)	0.055 (1.40)	0.884 (1.32)
1 5/8	1.625 (41.3)	0.060 (1.52)	1.14 (1.70)
2 1/8	2.125 (54.0)	0.070 (1.78)	1.75 (2.60)
2 5/8	2.625 (66.7)	0.080 (2.03)	2.48 (3.69)
3 1/8	3.125 (79.4)	0.090 (2.29)	3.33 (4.96)
3 5/8	3.625 (92.1)	0.100 (2.54)	4.29 (6.38)
4 1/8	4.125 (105)	0.110 (2.79)	5.38 (8.01)

Gegevens afkomstig van: ASTM International, ASTM B280, 2008, p. 2

Om berekeningen te kunnen uitvoeren, moet men de gegevens van de circulerende vloeistof en het temperatuurregelsysteem kennen. Het gebruikte vloeistof *Thermalfluid HL80* wordt eerst afgekoeld/ opgewarmd in het toestel *Presto A85* en geeft vervolgens het vermogen door aan het externe systeem via een interne ingebouwde leiding.

Tabel 12: Specificaties van de Thermalfluid HL80 (Bijlage B: Julabo ThermalFluid HL80)

Thermalfluid HL80	
ρ	793 kg/m ³
C_p	1500 J/kg-K
μ	0,0017 N-s/m ²
k	0,12 W/m-K

Tabel 13: Specificaties van Presto A85 (

Presto W85		
Werkings temperatuur	-85 ... 250	°C
Temperatuur stabiliteit	0,05 ... 0,1	°C
Koelvermogen	2,8 (200°C)	kW
	2,5 (20°C)	kW
	2,4 (0°C)	kW
	2,4 (-40°C)	kW
	2,2 (-60°C)	kW
	0,4 (-80°C)	kW
Warmtevermogen	15	W
Volumedebiet	35 ... 80	l/min
Druk	0,48 ... 3,2	Bar

In dit eerste gedeelte wordt er onderzocht wat de invloed van de leidingdiameter is op de gedwongen convectie van de vloeistof binnen de leiding. De twee belangrijke factoren voor de stromingskwaliteit zijn het Reynoldsgetal en het Prandtl-getal. In de meeste gevallen blijven ze constant voor een bepaalde situatie. Want het Reynoldsgetal is afhankelijk van het volumedebiet (vergelijking 7) en het Prandtl-getal hangt enkel af van de eigenschappen van de vloeistof (vergelijking 8). Aangezien het volumedebiet van de pomp van 35 tot 80 l/min varieert, is het Reynoldsgetal hier ook niet meer een vaste waarde. Maar de invloed hiervan zal dadelijk besproken worden. Bovendien is het Reynoldsgetal ook een functie van de leidingdiameter (Baeten, 2014, p. 44).

$$Re = \frac{vD\rho}{\mu} \quad (7)$$

$$Pr = \frac{\mu c_p}{k} \quad (8)$$

Ten eerste bepalen we het Nusselt-getal met de onderstaande formule. (Charmchi, 1989, pp. 1-60)

$$Nu = \frac{\left(\frac{f}{2}\right) * Re * Pr}{k_1 + k_2(Pr^{\frac{2}{3}} - 1)\sqrt{\frac{f}{2}}} \quad (16)$$

Met:

- $k_1 = 1 + 13,6f$
- $k_2 = 11,7 + 1,8/Pr^{0,33}$

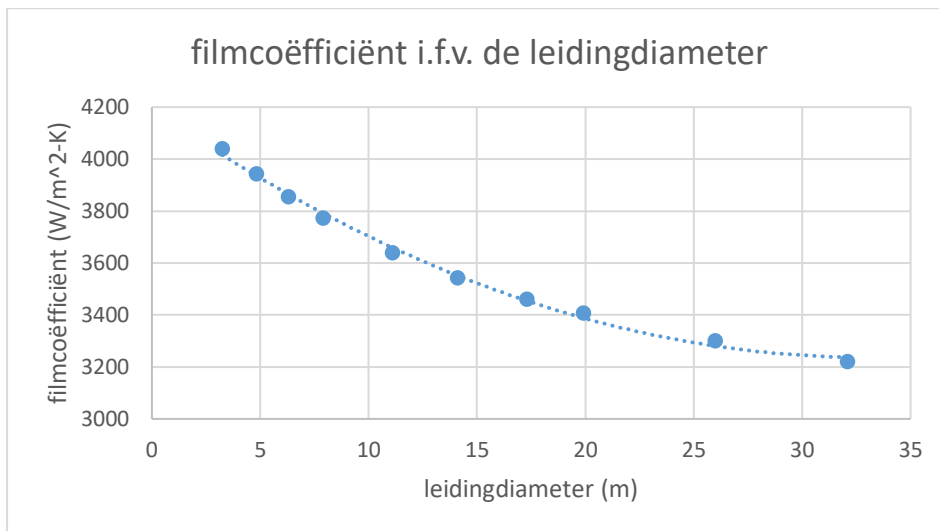
Dit is het Nusselt-getal voor turbulente stromingen in een leiding met cirkelvormige doorsnede. Echter is deze formule enkel toepasbaar als $0,5 < Pr < 2000$ en $10^4 < Re < 10^7$. Daarnaast kan men de wrijvingscoëfficiënt f bepalen met volgende formule.

$$f = [1,581 * \ln(Re) - 3,28]^{-2} \quad (17)$$

Deze formule is bruikbaar op voorwaarde dat: $10^4 < Re < 10^7$

Uit vergelijking 16 is te zien dat het Nusselt-getal toenemen als de diameter van de leiding groter wordt. Dit heeft ook een directe invloed op de filmcoëfficiënt van de leiding. (zie vergelijking 10) Hieruit volgt dat de filmcoëfficiënt stijgt naarmate de leidingdiameter groter wordt en het Reynoldsgetal stijgt eveneens mee met het volumedebiet van de pomp. Beide factoren leiden tot een verbeterde filmcoëfficiënt en dus efficiëntere warmteoverdracht.

De berekeningsresultaten voor verschillende leidingdiameters staan hieronder in de grafiekvorm. Hierbij is te zien dat de filmcoëfficiënt met een tweedegraadsfunctie daalt bij een toenemende leidingdiameter. (Figuur 15)



Figuur 15: De filmcoëfficiënt van de leiding i.f.v. de diameter

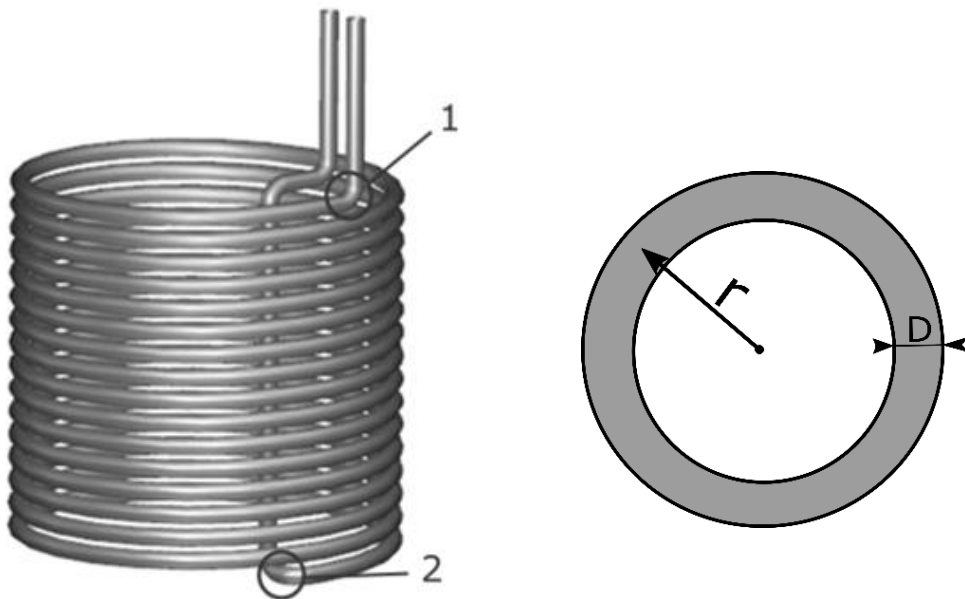
3.4. Het drukverlies in de leiding

De diameter van de leiding wordt bepaald a.d.h.v. het drukverlies in het systeem. M.a.w. met een gegeven minimum ingangsdruk van 1,48 bar (zie Tabel 13) en een vaste leidinglengte van ± 20 m, moet de uitgangsdruk groter zijn dan de absolute atmosferische druk 1 bar. Het drukverlies hiervan kan bepaald worden met de aangepaste vergelijking van Bernoulli (vergelijking 18) en het ladingsverlies met vergelijking 19 (Baeten, 2014, p. 84).

$$\frac{p_1}{\rho g} + h_1 - h_L = \frac{p_2'}{\rho g} + h_2 \quad (18)$$

$$h_L = \zeta \frac{v^2}{2g} \quad (19)$$

Hierbij is de h_L het lokale verlies in de leiding, uitgedrukt in de eenheid meter. De verliescoëfficiënt ζ is in functie van de geometrie van de leiding en het Reynoldsgetal van de stroming. Zoals Figuur 16 laat zien is de leiding spiraalvormig. Om het ladingsverlies in de leiding te bepalen beschouwen we iedere omwenteling als vier bochten van 90° . Tabel 14 geeft ons de waarde van de verliescoëfficiënt bij een bocht van 90° .



Figuur 16: Spiraalvormige koperen leiding en het bovenaanzicht

Hierbij is r de straal van de omwenteling en D de binnendiameter van de leiding (zie Figuur 16). Het resultaat is een verliescoëfficiënt van 0,11. Echter moet deze waarde nog vermenigvuldigd worden met een factor 4 om tot een volledige cirkel te komen. Deze uitkomst is namelijk het geometrische verlies van de leiding.

Tabel 14: Richtwaarden voor de verliescoëfficiënt bij een bocht van 90° (Baeten, 2014, p. 101)

r/D	1	2	4	6	10
ξ_{glad}	0,21	0,14	0,11	0,09	0,11
ξ_{ruw}	0,51	0,3	0,23	0,18	0,2

Gegevens afkomstig van: Baeten, Fluidomechanica, 2014, p. 101

Daarna worden het Reynoldsgetal van de stroming en de ruwheid van de leiding bepaald. Het Reynoldsgetal hier is afhankelijk van het volumedebiet van de pomp en ook de leidingdiameter. De relatieve ruwheid kan als volgt berekend worden:

$$r = \frac{\varepsilon}{D} \quad (20)$$

Met:

- ε : de absolute ruwheid coëfficiënt, m
- D : de hydraulische hoogte, m

De absolute ruwheid coëfficiënt ε van de koperen leidingen is bij benadering gelijk aan $2 \cdot 10^{-6}$ m (The engineering toolbox, 2017) en de hydraulische hoogte wordt als volgt bepaald (Baeten, 2014, p. 82).

$$D = \frac{4A}{P} \quad (21)$$

Met:

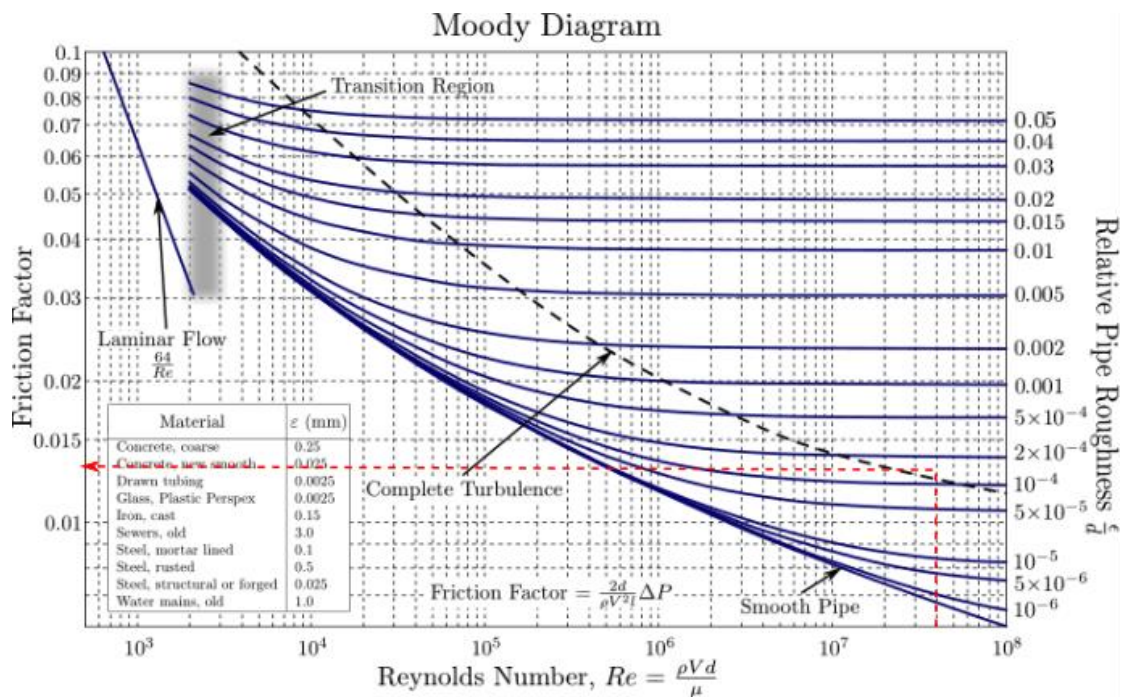
- A : de sectie van de leiding, m^2
- P : de omtrek van de binnenkant van de leiding, m

Vervolgens worden de reeds bepaalde relatieve ruwheid en het Reynoldsgetal in de Moody-diagram gezet om de wrijvingscoëfficiënt f te bepalen. (zie Figuur 17) Deze wrijvingscoëfficiënt is belangrijk om het drukverlies in de leiding te bepalen. Integendeel tot het geometrische verlies in de leiding, hangt dit drukverlies af van de dichtheid van de vloeistof en de lengte van de leiding (Baeten, 2014, p. 81).

$$\Delta p = f \rho \frac{L v^2}{D} \quad (22)$$

Met:

- f : de wrijvingscoëfficiënt
- ρ : de dichtheid van de vloeistof, kg/m^3
- L : de lengte van de leiding, m
- D : de binnendiameter van de leiding, m
- v : de stromingssnelheid, m/s



Figuur 17: Moody-diagram (Wikipedia, Moody chart, 2017)

Voordat men de verliescomponenten terug in de vergelijking van Bernoulli kan vullen, dient deze vergelijking nog aangepast te worden. Na het herschrijven wordt het:

$$\frac{p_1}{\rho g} + h_1 - h_L = \frac{p_2 + \Delta p}{\rho g} + h_2 \quad (23)$$

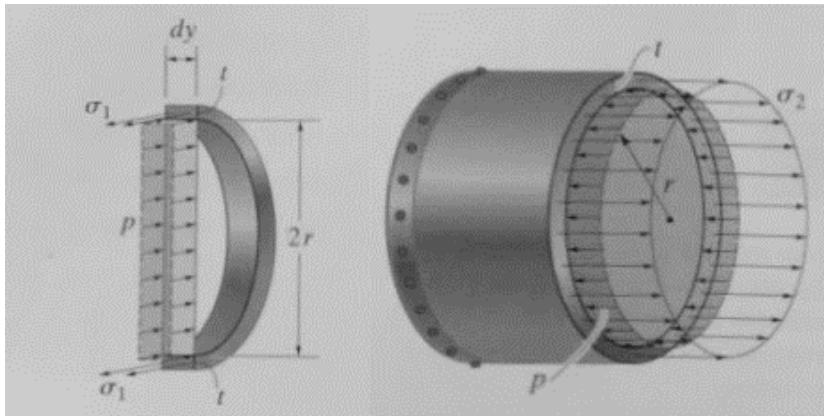
Nadat men een iteratief berekeningsproces heeft uitgevoerd, zal die een binnendiameter van 14 mm krijgen. Dit is dus de minimum binnendiameter voor de leiding bij een ingangsdruk van 1,48 bar. Verder weet men uit eerdere berekeningen dat de filmcoëfficiënt stijgt naarmate de leidingdiameter kleiner wordt. Hieruit volgt dat 14 mm de optimale binnendiameter is en 15,9 mm voor de buitendiameter. (Tabel 11)

3.5. Minimale wanddikte van de vacuümisolatie

Vrijwel alle cryogene toepassingen gebruiken een of andere vacuüm isolatie om hun systeem thermische te isoleren van de omgeving. Onze toepassing vereist een goede isolatie tegen zowel de warmtegeleiding als convectie. Vacuüm isolatie is een antwoord op deze vraag.

De vacuümisolatie die toegepast wordt is een dubbelwandige cilindervormige vat. De cilindrische vorm kan de atmosferische druk evenredig verdelen in de radiale en longitudinale richtingen. Het resultaat is homogene spanningsgradiënten op zowel de mantel als de boven- en de onderkant.

Het materiaal dat we gaan gebruiken is rvs 316N. Een type uit de AISI 300 reeks dat stikstof bevat ter verhoging van de sterkte. Zijn combinatie van hoge sterkte en goede taaheid maken hem een van beste opties die er is voor lage temperatuur toepassingen.



Figuur 18: Belastingtoestand van een cilindrisch drukvat (Hibbeler, Sterkteleer, 2014, p. 426)

Wanneer de isolatielaag vacuüm wordt getrokken, ondergaat het vat een longitudinale en een radiale kracht. De wanddikte van dit cilindrische drukvat volgens de radiale richtingen kan als volgt berekend worden (Hibbeler, 2014, p. 426).

$$\sigma_1 = \frac{pr}{t_1} \quad (24)$$

en de wanddikte volgens de longitudinale richting:

$$\sigma_2 = \frac{pr}{2t_2} \quad (25)$$

Met:

- σ_1, σ_2 : de vloeispanning van het materiaal
- p : het drukverschil tussen de benodigde onderdruk voor de vacuüm isolatie en de atmosferische druk
- r : de inwendige straal van de cilinder
- t : de dikte van de wand

In Tabel 3 is te vinden dat de vloeispanning van AISI 316N bij kamertemperatuur ± 649 MPa is. Daarnaast is de straal van het vat 0,4 m. Na het invullen van die gegevens krijgen we:

$$t_1 = \frac{pr}{\sigma_1} = \frac{10^5 [N/m^2] * 0,4[m]}{649 * 10^6 [N/m^2]} = 6 * 10^{-5} m$$

$$t_2 = \frac{pr}{2\sigma_1} = \frac{10^5 [N/m^2] * 0,4[m]}{2 * 649 * 10^6 [N/m^2]} = 3 * 10^{-5} m$$

Uit deze resultaten volgt dat de minimum wanddikte van een cilindrisch drukvat zeer dun kan zijn. Echter zijn deze waarden enkel bruikbaar in een ideaal geval. Want deze berekeningen houden geen rekening met het eigen gewicht van het materiaal, noch mogelijke extra belastingen tijdens bedrijf. Daarom kan men deze getallen enkel als richtwaarden gebruiken om de vacuümisolatie te dimensioneren.

4. Metingen

4.1. Laagtemperatuurmetingen

De mechanische excitator en microfoon zijn de standaard meetinstrumenten voor de impuls excitatietechniek bij IMCE. Met deze laagtemperatuurmeting wordt er nagegaan of die instrumenten steeds toepasbaar zijn in die temperaturomgeving. Daarna wordt er eveneens onderzocht wat de effecten zijn op de signalen van het monster. In deze laagtemperatuurmeting worden twee totaal verschillende monsters getest, een van kunststof en een van metaal.

Om de laagtemperaturomgeving te simuleren, werd de diepvries van het merk New Brunwicks Scientific gebruikt. (zie Figuur 1) Het type ULT Freezer U101 heeft een cascade dampcompressiesysteem. De gebruikte koudemiddelen voor de HT- en LT-trappen zijn respectievelijk R404A en R508B. Verder staat in het datasheet dat de minimumtemperatuur van R508B $-86\text{ }^{\circ}\text{C}$ is en de gemiddelde afkoelsnelheid van dit toestel is ongeveer $5\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$.

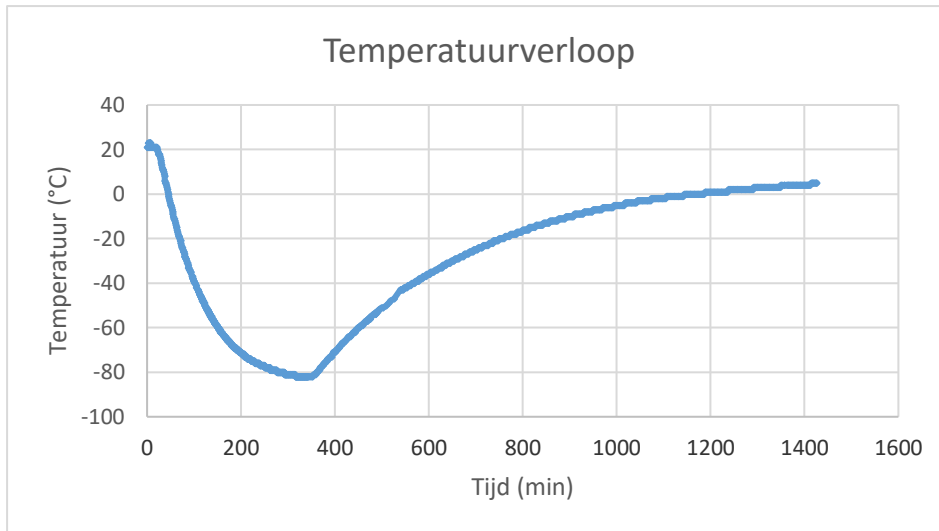


Figuur 19: laagtemperatuurmeetopstelling

Voor de laagtemperatuurmetingen werd er de excitator en microfoon van de kamertemperatuurmeetopstelling herbruikt en in de diepvries gezet. Verder is de diepvries voorzien met twee gaten op de zijkant voor de bekabeling. (Figuur 19) Deze doorvoeren werden eveneens gebruikt om de kamer te spoelen met stikstofgas. De temperatuursensor die in deze test werd toegepast is een type-K thermokoppel. Het werd naast het monster geplaatst en via een Eurotherm kon men het signaal direct aflezen.

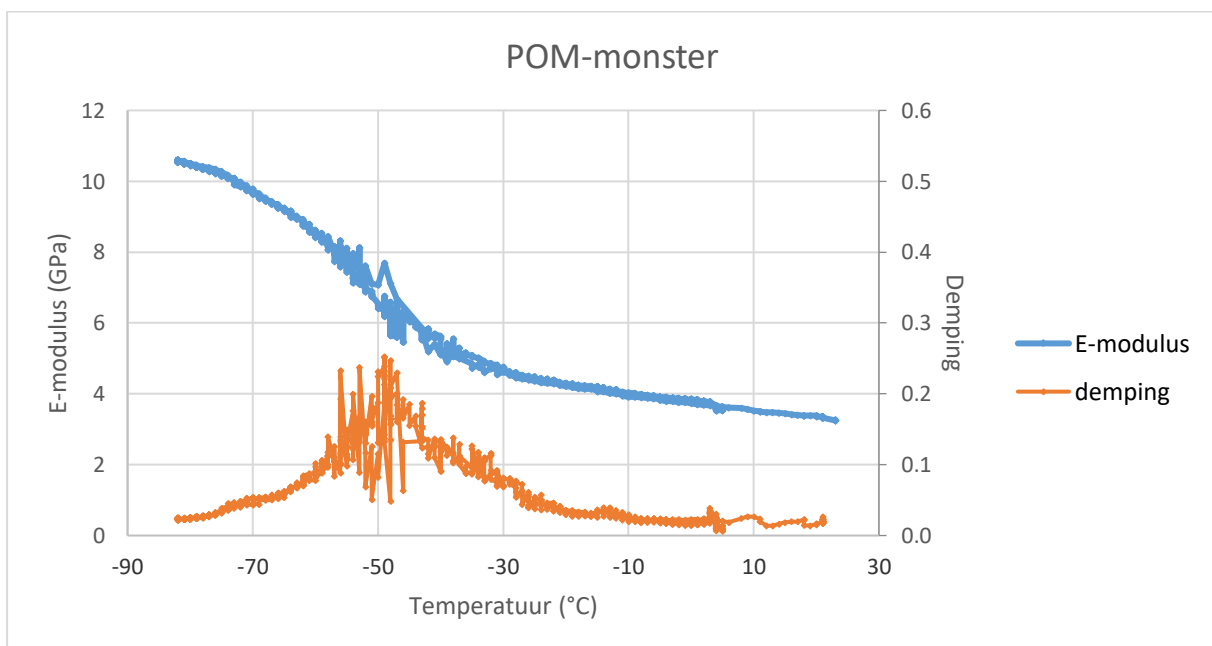
4.1.1. Meetresultaten

Tijdens beide metingen werd de temperatuur binnen de kamer eerst tot -86 °C afgekoeld. Vervolgens werd het toestel uitgezet en de temperatuur steeg langzaam terug tot de kamertemperatuur. Het tijdsinterval tussen iedere meting is 60 s en het temperatuurverloop wordt afgebeeld in Figuur 20.



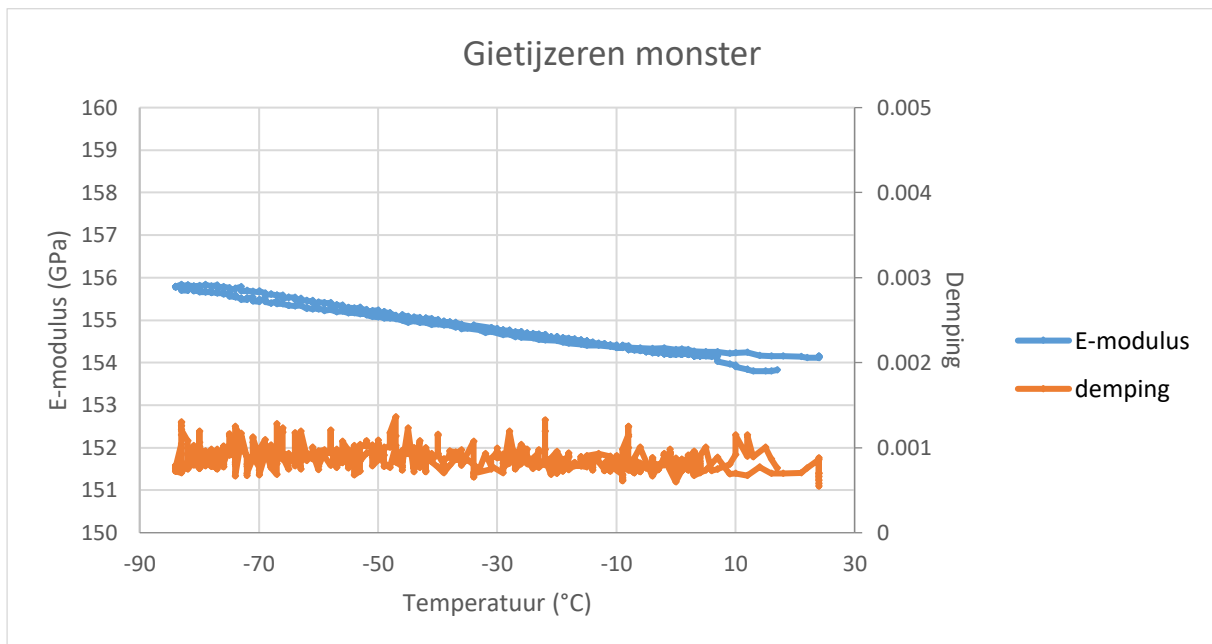
Figuur 20: Het temperatuurverloop van de lagetemperatuurmetingen

Het eerste monster dat werd getest was die van de kunststof. Dit is een balkvormig monster van het materiaal polyoxymethylene (POM). Het POM-materiaal heeft een theoretische glastemperatuur van -40 °C . (Wikipedia, 2017) Maat het meetresultaat toont een sprong in de E-modulus tussen -30 °C en -70 °C . De E-modulus van het POM-monster is na deze glastransitie verdrievoudigd. In hetzelfde gebied is er ook een forse toename in de dempingswaarde. Eenmaal deze transitiefase voorbij is daalt de demping terug naar zijn oorspronkelijke waarde. (Figuur 21)



Figuur 21: E-modulus en demping van het POM-monster i.f.v. de temperatuurverandering

Het tweede monster is een balkvormig monster van vermiculair gietijzer. De elasticiteit van het monster was weinig gewijzigd gedurende de meting. Slechts een toename van $\pm 1.2\%$ in de E-modulus is te zien bij een temperatuurverandering van $\pm 110\text{ }^\circ\text{C}$. (Figuur 22) Daarnaast was er ook weinig verandering in de demping voor het gietijzeren monster. Om de grafiek overzichtelijk te behouden wordt er twee verschillende schalen gebruikt voor de E-modulus en de demping. Maar de toename in de demping ($\pm 13\%$) was eigenlijk groter dan die in de E-modulus.



Figuur 22: E-modulus en demping van het gietijzeren monster i.f.v. de temperatuurverandering

4.1.2. Conclusie

De eerste conclusie van deze laagtemperatuurtest is dat de standaard kamertemperatuurmeetinstrumenten probleemloos bij een lage temperatuur van $-80\text{ }^\circ\text{C}$ kunnen functioneren. Daarnaast zullen de meeste metalen en legeringen enkel een minuscule toename in de E-modulus ervaren bij lage temperaturen. Indien de glastemperatuur wel in het temperatuurbereik, van $-80\text{ }^\circ\text{C}$ tot $100\text{ }^\circ\text{C}$ ligt, kan de E-modulus ook flink oplopen. Maar deze toename gaat wel gepaard met een tijdelijke stijging in de dempingswaarde.

De tweede conclusie is dat de diepvries een toereikend vermogen levert met het tweetraps dampcompressiesysteem. Uit het meetresultaat blijkt dat deze diepvries een gemiddelde afkoelsnelheid van $\pm 0,3\text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$ heeft. Deze koelsnelheid is niet laag, maar kan nog verbeterd worden door het koelsysteem aan een kleinere kamer te koppelen. Want het impulsexcitatiesysteem vereist een veel kleinere ruimte en de extra constructiematerialen in de diepvries verhogen enkel de thermische massa van het hele systeem.

4.2. Invloed van de gasstroming op het opnemen van signalen

Aangezien de stromingssnelheid een belangrijke rol speelt op de convectieve warmteoverdracht, moet een ventilatiesysteem in het ontwerp geïntegreerd worden. Hierbij wordt onderzocht welk effect dat de stromingssnelheid heeft op de uiteindelijke meetresultaten. Om tot een antwoord op die vraag te komen wordt er twee testen gedaan met de twee monsters van de laagtemperatuurtest.

In het begin van de test, werd er eerst de juiste dimensies en massa's van de monsters in de software gegeven. Vervolgens moest men een passende schietkracht kiezen. Want deze kracht moet het monster voor een bepaalde tijd doen galmen en het monster moet ook gedurende de test ter plaatse blijven.

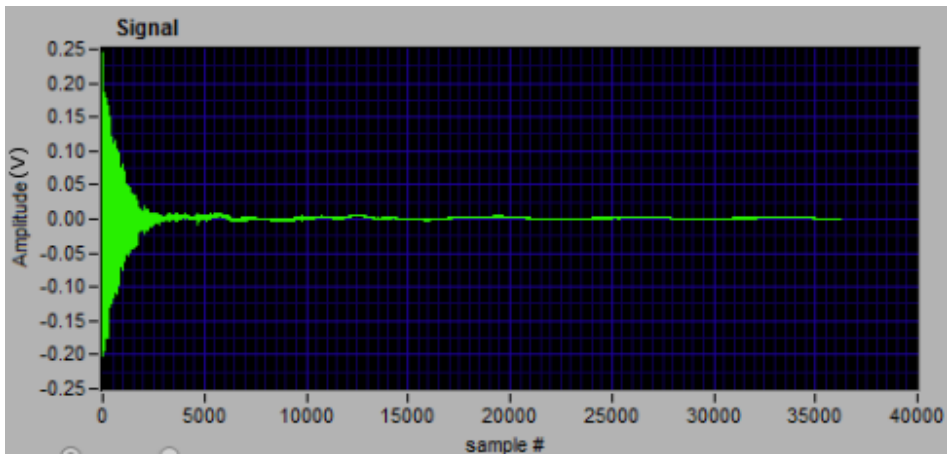
Om de terugstroming te kunnen simuleren, werd de meetopstelling in de diepvries geplaatst. Vervolgens werd er een huishoudelijke ventilator voor de meetopstelling geplaatst om een horizontale luchtstroming te genereren. Op deze manier kreeg de microfoon de grootste storing op het signaal.



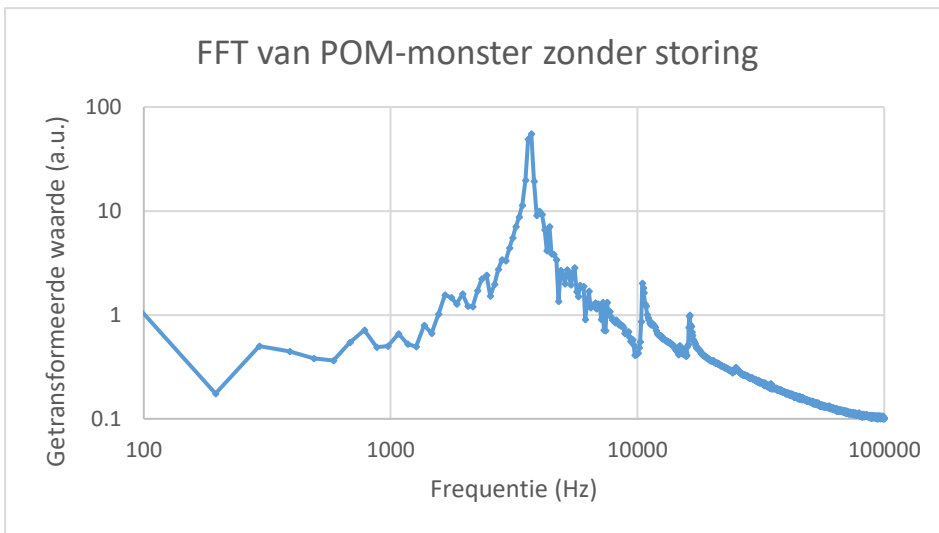
Figuur 23: Meetopstelling voor de windtest

4.2.1. Meetresultaten

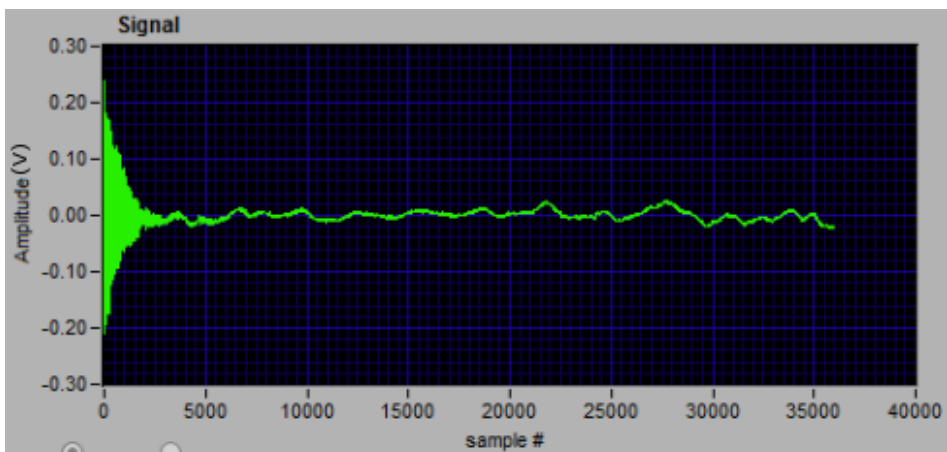
Bij het uitvoeren werd iedere test twee keer herhaald voor ieder monster. Bij de eerste keer stond de ventilator stil en de tweede keer met de maximale stromingssnelheid die de ventilator kon genereren. Zodat het onverstoorde en het verstoorde signaal met elkaar vergelekt kunnen worden. Hieronder staan de meetresultaten van het POM-monster.



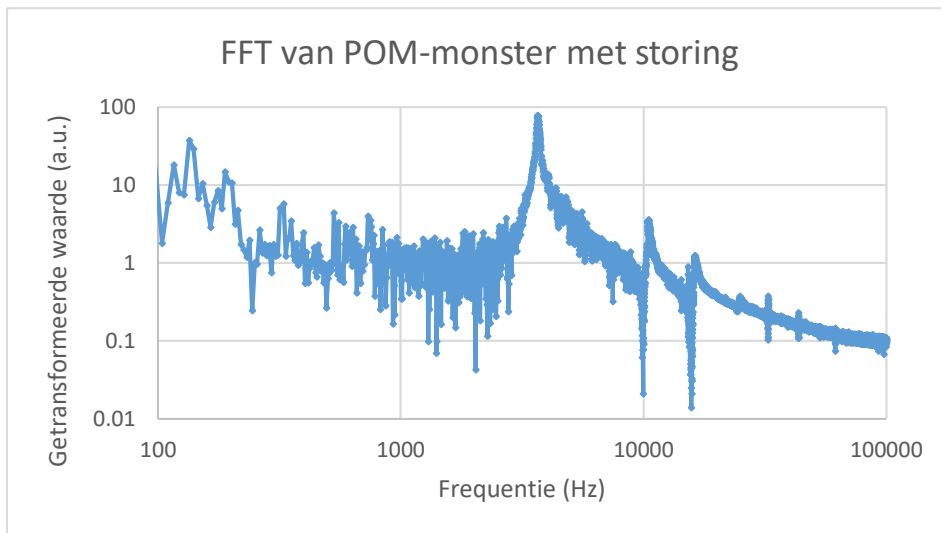
Figuur 24: Het onverstoorte signaal van POM-monster



Figuur 25: de onverstoorte FFT-diagram van POM-monster



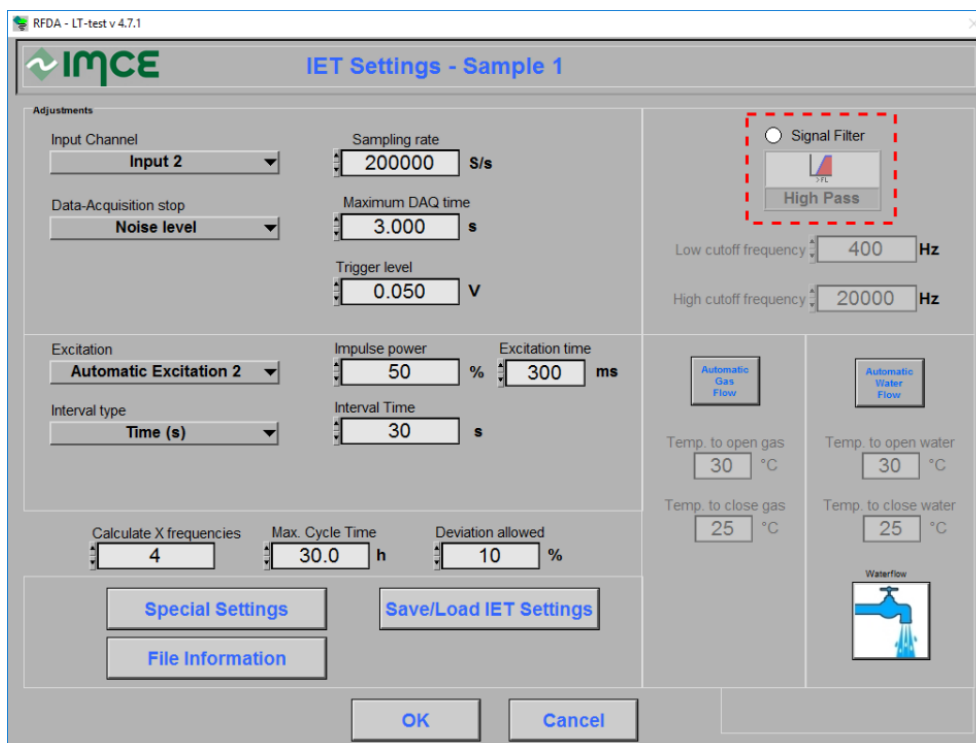
Figuur 26: Het verstoorte signaal van POM-monster



Figuur 27: de verstoorde FFT-diagram van POM-monster

In Figuur 24 en Figuur 26 is te zien dat de signalen van het POM-monster na een zeer korte tijd, ± 3000 samples, al uitgedempt is. De ruis in de onverstoorde toestand is bijna een rechte, terwijl die in het verstoerde signaal nog fluctuaties toont. Dit verschil is waarschijnlijk te wijten aan de luchtstroming en het geluid die veroorzaakt worden door de ventilator.

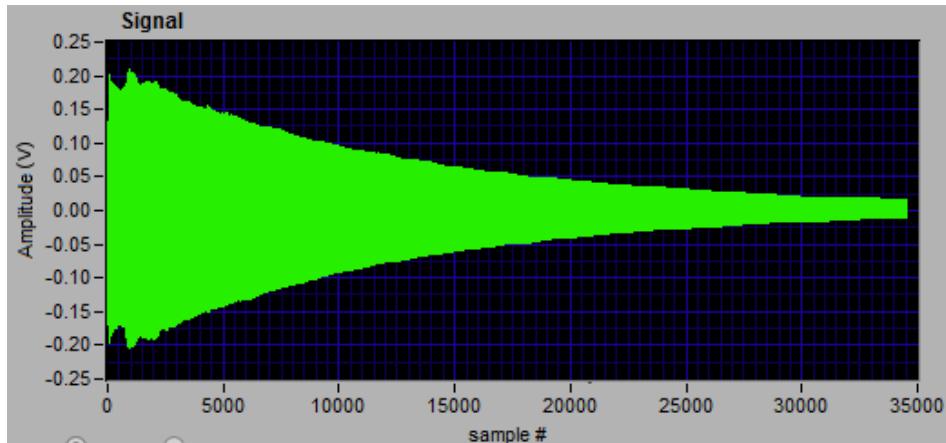
In de FFT-diagrammen komt de ruis voor als hoge signaalpieken in het laagfrequente gebied. De twee bijkomende pieken in de diagrammen zijn respectievelijk de tweede en derde harmonisch signaal. Aangezien de fundamentele resonantiefrequentie van dit monster op ongeveer 3600 Hz ligt, kan men de signaalfilter van de software gebruiken om de laagfrequente ruis weg te filteren (zie Figuur 28).



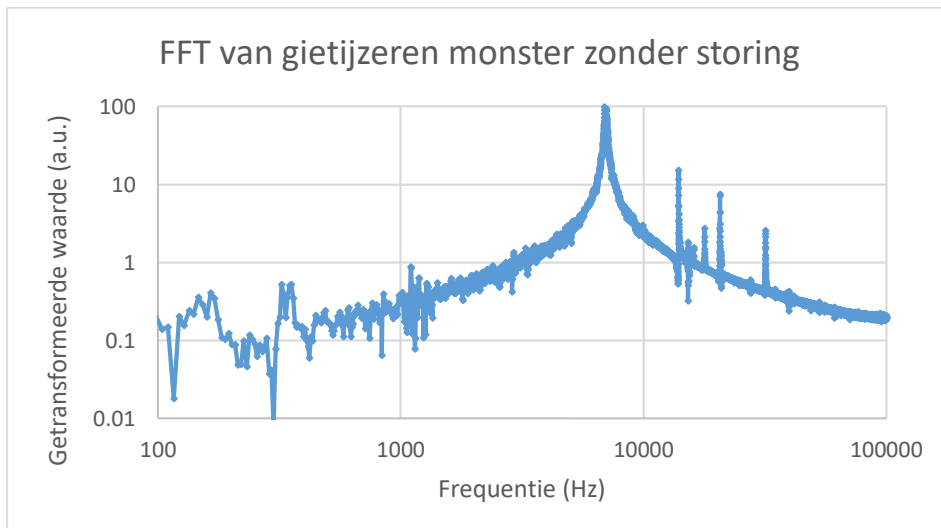
Figuur 28: Softwareinstelling voor signaalfilter

In tegenstelling tot het POM-monster heeft het signaal bij het gietijzeren monster een veel langere tijd nodig om zich uit te dempen. De signalen bij beide toestanden duren even lang, ± 35000 samples. Maar die zijn tienmaal langer dan die van het POM-monster.

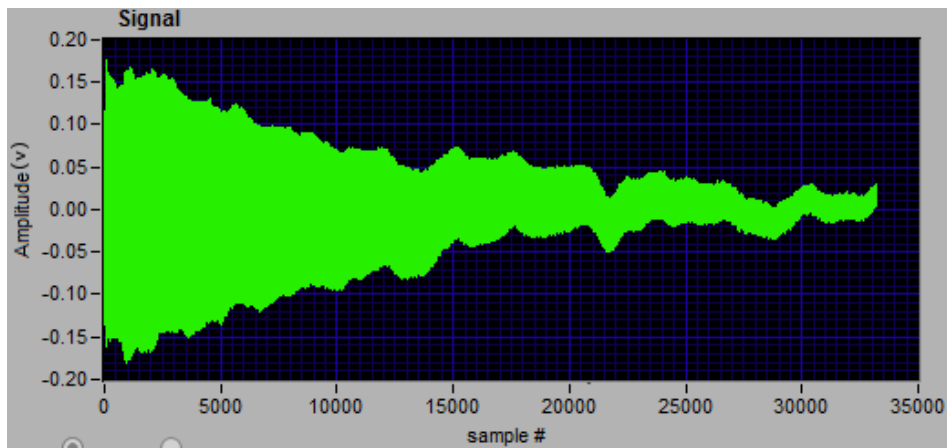
De eerst vier harmonische signalen zijn te zien in de FFT-diagrammen. Daarnaast is de invloed van de ventilator eveneens zichtbaar op de diagram (zie Figuur 31). Aangezien de fundamentele resonantiefrequentie van dit monster op ± 7000 Hz ligt, kan die gemakkelijk weggefilterd worden met de signaalfilter. Opvallend is dat de ruis verdwenen is in de FFT-diagram. Daardoor is geen verschil te zien tussen Figuur 30 en Figuur 32.



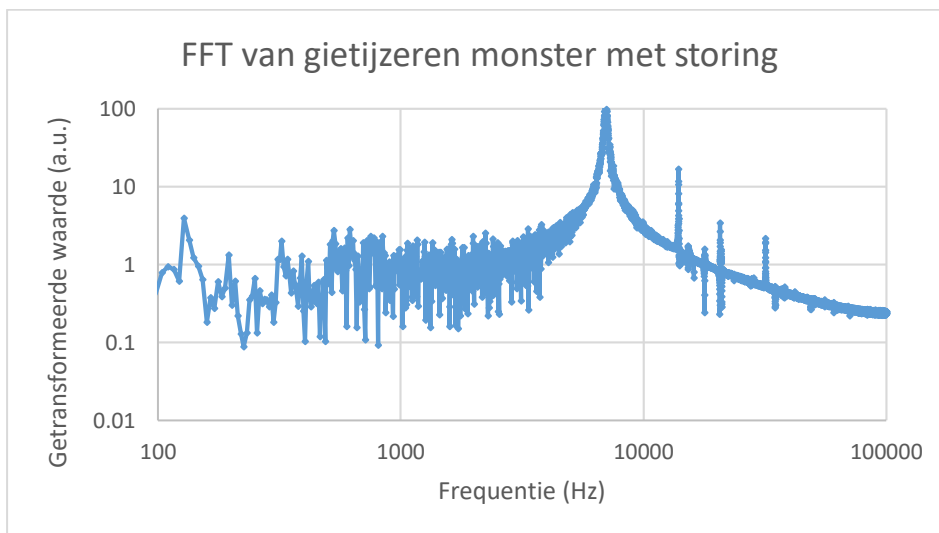
Figuur 29: Het onverstoorte signaal van gietijzeren monster



Figuur 30: de onverstoorte FFT-diagram van gietijzeren monster



Figuur 31: het verstoorte signaal van gietijzeren monster



Figuur 32: de verstoorte FFT-diagram van gietijzeren monster

4.2.2. Conclusie

Uit de meetresultaten is te zien dat de luchtstroom enkel een invloed heeft op het laagfrequente gebied van een kort signaal. De ingebouwde filterfunctie in de software is voldoende om de ruis weg te filteren.

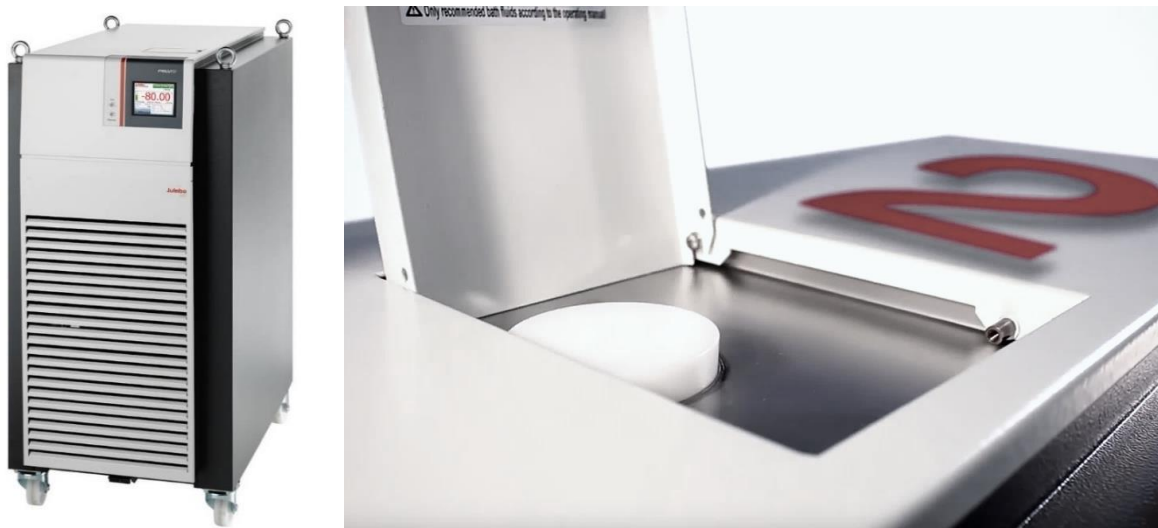
5. Ontwerpen

5.1. Meetopstelling bij het temperatuurbereik van -80 °C tot 100 °C

5.1.1. Temperatuurregelsysteem

Het toestel Presto A85 van het merk Julabo werd reeds in 3.3 geïntroduceerd en is geschikt om de temperatuur van een relatief groot volume te regelen. Met een cascade dampcompressiesysteem en een verwarmingselement kan dit toestel een maximaal koelvermogen van 2,8 kW en een maximaal warmtevermogen van 1,5 kW behalen. De nauwkeurigheid van de temperatuurregeling ligt tussen 0,01 °C – 0,05 °C.

Dit toestel is echter niet bedoeld om iets direct op te warmen of af te koelen. Het vermogen van het toestel moet via een thermische vloeistof doorgegeven worden aan een extern systeem. Hierbij wordt de ThermalFluid HL80 gebruikt. Dit is eveneens een product van Julabo en heeft een zeer breed temperatuurbereik, van -85 °C tot 170 °C.



Figuur 33: Julabo Presto A85 (Julabo, PRESTO A85 temperature control system, 2017)

Het maximale volume van de interne vloeistoftank is 9L, maar een groter volume kan gecirculeerd worden in een extern systeem. De vloeistof kan men bijvullen via een poort die zich aan de bovenkant van het toestel bevindt (zie Figuur 33). Achteraan zijn er twee M30 aansluitingen voor de interne pomp en die zullen met een extern systeem verbonden worden.

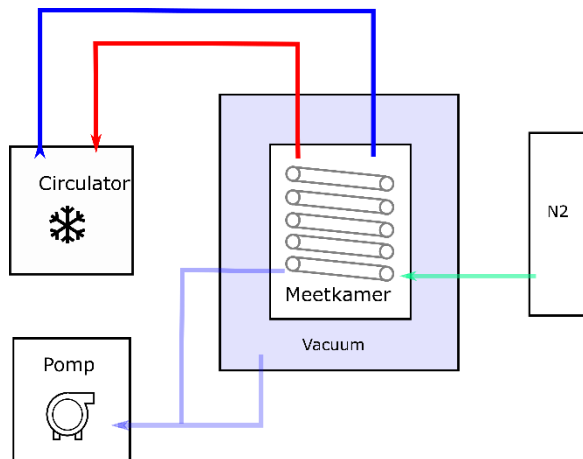
Wat betreft de temperatuurmeting in het externe systeem, kan de Presto A85 verbonden worden met een externe PT100. De voorziene aansluiting voor PT100 staat eveneens op de achterkant van het toestel (zie Figuur 34).



Figuur 34: Het aansluitpaneel van Presto A85 (Julabo, PRESTO A85 temperature control system, 2017)

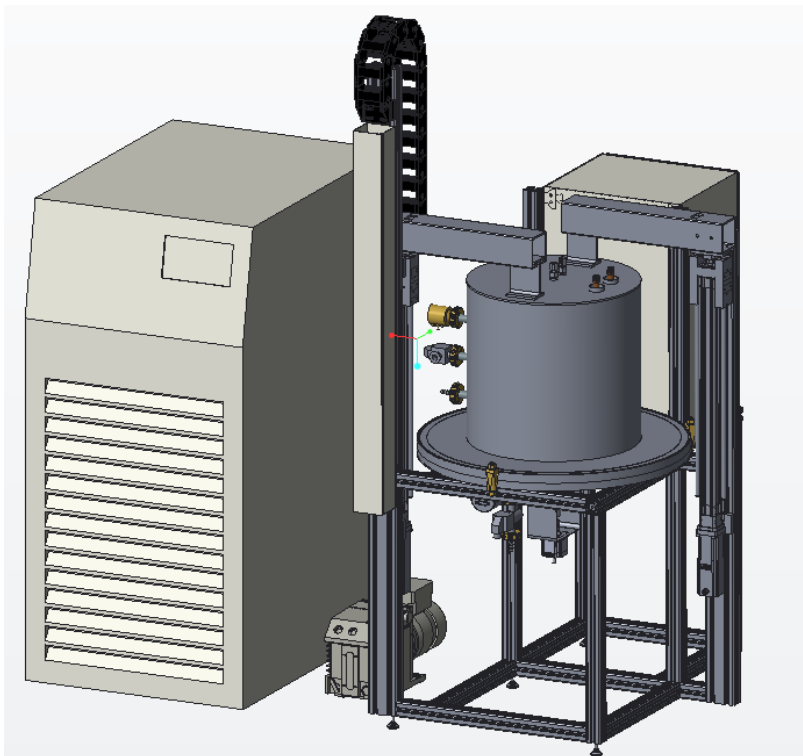
5.1.2. Basisprincipe

Het basisprincipe van het ontwerp is om het toestel Presto A85 aan een meetkamer te koppelen (zie Figuur 35). De kamer wordt zo gedimensioneerd dat het juist groot genoeg is om het impulsexcitatiesysteem daarin te zetten teneinde het vermogen optimaal gebruikt kan worden. Het vermogensverlies van het systeem wordt beperkt door het monster in een thermisch geïsoleerde kamer te plaatsen. Een vacuümlaag wordt gebruikt om de kamer thermisch te isoleren. M.b.v. een vacuümpomp wordt deze isolatielaag tot een onderdruk van ± 113 Pa gepompt. Schottenpompen met het redelijk rendement en drukverhouding zijn geschikt voor deze taak.



Figuur 35: Schets van de basisprincipe

Dezelfde pomp trekt eveneens de meetkamer tot vacuüm om luchtdeeltjes uit het systeem te halen. Vervolgens wordt de kamer terug opgevuld met stikstofgas. Dit is het spoelproces en de bedoeling daarachter is om een condensvrije meetomgeving te creëren. Hieronder is een afbeelding van het ontworpen systeem.

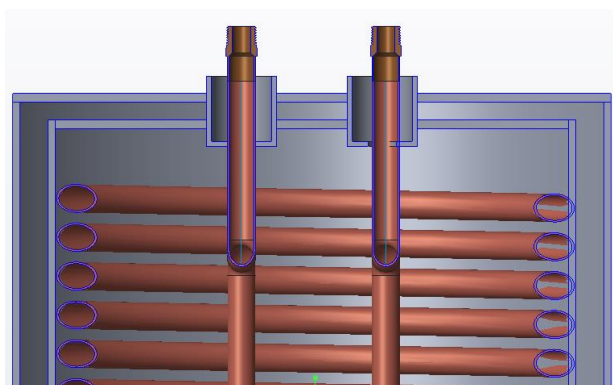


Figuur 36: Overzicht van het systeem

5.1.3. Thermische isolatie

Eerst en vooral wordt de thermische isolatie van het systeem besproken. De thermische isolatie dient om de warmteflux doorheen de wand van meetkamer te minimaliseren. Er worden vacuümlagen gebruikt om het systeem te isoleren. De vorm van de kamer is een $\varnothing 0,4\text{m} \times 0,4\text{m}$ cilindrische vat. Het opbouw materiaal voor het systeem is rvs 316N. Zoals de berekening in 3.5 toont, kan men met de hoge vloeispanning van dit materiaal een zeer dunne wand maken bij medium vacuüm ($1,33 \cdot 10^{-1} \text{ Pa} \leq p \leq 1,33 \cdot 10^{-3} \text{ Pa}$). Bijgevolg wordt er ook minder energie ingestoken om de temperatuur van de wand te doen wijzigen.

De kamer wordt opgebouwd door de onderdelen aan elkaar te lassen. De specifieke lastechniek die hier wordt toegepast is fusiellassen en het vereist twee onderdelen met gelijkaardige samenstellingen en smeltpunten. Bij het smeltpunt zullen ze een fusie aangaan en het resultaat is een lasverbinding met een kleine lasnaad.



Figuur 37: Doorsnede van de vloeistofdoorvoer

Op de bovenkant van de kamer wordt er vijf gaten geboord, twee zijn voor de koperen leiding en drie voor de kabeldoorvoeren. Om de doorvoer van de koperen leiding vacuümdicht te maken, wordt een kleine buis op de leiding aangebracht (zie Figuur 37). Dit is een aan één kant gesloten rvs-buis met een gat van $\varnothing 16 \text{ mm}$ op het andere uiteinde. Vervolgens worden de koperen leiding, m.b.v. hardsolderen, aan de rvs-buis vastgesoldeerd. Want met hardsolderen kan men een heel sterke verbinding (vloeispanning tussen ± 275 en 482 MPa) maken tussen koper en rvs (Lincoln Electric, 2017).

De koperen leiding wordt onrechtstreeks gekoppeld aan de Presto A85. De dimensies van de leiding zijn reeds bepaald in 3.4. De tussenverbinding tussen de interne pomp en de koperen leiding wordt gerealiseerd met twee thermische geïsoleerde buizen en twee adapters.



Figuur 38: De thermische geïsoleerde buis (links) en leidingadapter (rechts) (Julabo, PRESTO A85 temperature control system, 2017)

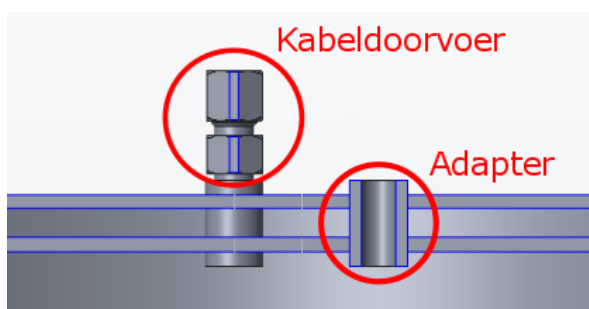
De thermische geïsoleerde buis heeft een vrouwelijke M30 aansluiting en wordt rechtstreeks aan de pompaansluitingen gekoppeld. De koperen leiding wordt eerst dichtgelast op een M16 koperen leidingadapter en de overgang van M16 naar M30 wordt eveneens gedaan via een adapter (zie Figuur 38).

De kabeldoorvoeren, die hier worden toegepast, maken gebruik van een speciale afdichting (zie Figuur 39). Deze afdichting is geschikt voor toepassingen met een temperatuurbereik tussen -185 °C en 232 °C (Conax Technolgies, 2012). De drie kabeldoorvoeren zijn in getapte buizen vastgedraaid en die buizen zijn eveneens op de kamer vastgelast.

Voordat de kabeldoorvoeren ingeschroefd zijn, moet men eerst indiumdraden aanbrengen. De indiumdraad is zacht en dient zich vaak als afdichtingselement voor cryogene toepassingen. Bij de plastische vervorming van de draad, wordt de spelling tussen de contactoppervlakken volledig afgedicht.

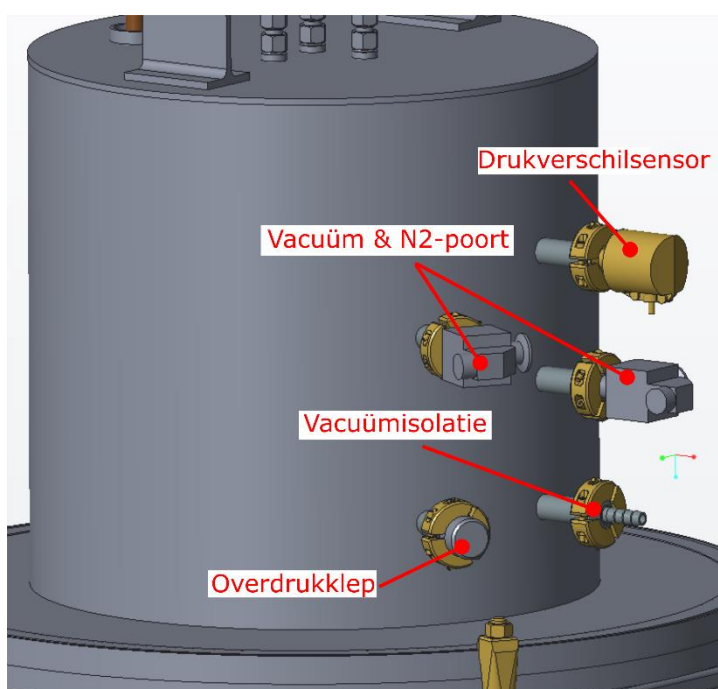


Figuur 39: Vacuüm kabeldoorvoer (Conax Technolgies, Compression Seal Fittings, 2012)



Figuur 40: Doorsnede van de kabeldoorvoer en adapter

Op de zijkant van het vat zijn er 5 gaten voorzien. Drie van de vijf zijn respectievelijk voor de vacuümisolatie, de overdrukklep en de drukverschilsensor (zie Figuur 41). De andere twee worden gebruikt voor het spoelproces. Via DN16 KF-fenzen zijn die op de mantel bevestigd. Tussen de flenzen is er nog een metalen afsluitring geplaatst om het drukverlies van het systeem tegen te gaan. M.b.v. een KF-klemring worden de twee flenzen aan elkaar vastgebonden.



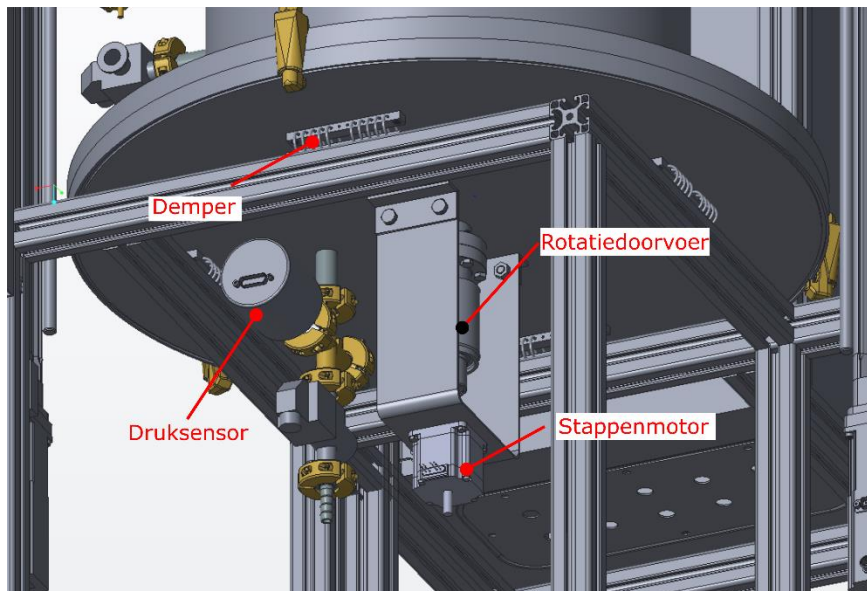
Figuur 41: De zijpoorten van de vat

Voor het spoelproces wordt hier twee ventielen gebruikt. Dat zijn twee elektropneumatische ventielen met een minimum bedrijfsdruk van ± 1 mPa. Bij het begin van het proces wordt eerst één ventiel geopend om de kamer vacuüm te pompen. Wanneer de ingestelde druk bereikt is, sluit dit ventiel en wordt de andere ingeschakeld. Dan begint het spoel proces. De veiligheidsschakelaar zal een signaal geven als de kamer terug op atmosferische druk zit.

Daarnaast is er een drukverschilsensor geplaatst om de kamer tegen onder- of overdruk te beveiligen. Uit ervaring weet IMCE dat monsters, bij verschillende drukken, variaties in dempingen kunnen meten. Daardoor moeten de metingen bij atmosferische druk uitgevoerd worden.

De onderste helft van de kamer bestaat uit vijf platen. De vloerplaat is een ISO K-blindflens met een diameter van 690 mm en de andere onderdelen zijn aanmaakstukken. D.m.v. fusiessen zijn die op elkaar vastgelast (zie Figuur 45).

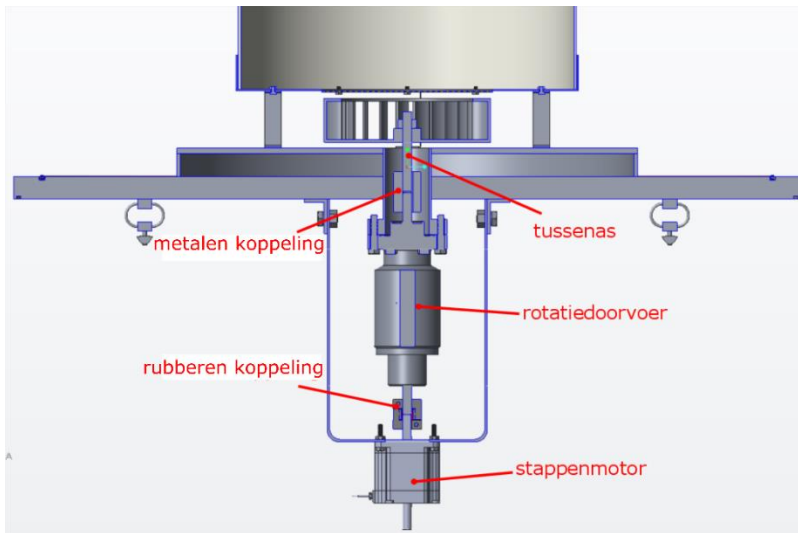
Op de onderkant wordt er twee gaten geboord, één voor het ventilatiesysteem en één voor de vacuümisolatie. De vacuümdoorvoer is via een kruisstuk met de andere vacuümleiding en een druksensor verbonden (zie Figuur 42). Hierbij stuurt de druksensor een signaal wanneer de vacuümpomp stopgezet moet worden. Bovendien kan deze ook als melder van isolatielekken dienen. De boven- en onderste isolatielagen worden samen met éénzelfde pomp vacuümgetrokken. De verbindingen tussen de twee delen wordt gerealiseerd met rubberen vacuümleidingen.



Figuur 42: Constructie van de onderste helft van het systeem

Dit systeem is ook voorzien van een ventilator. Het andere gat, die zich in het midden van de vloerplaat bevindt, is voor de rotatiedoorvoer van de ventilator. A.d.h.v. een CF-flens wordt deze op de onderkant bevestigd. De functie van deze doorvoer is om de roterende beweging van een stappenmotor over te brengen aan een centrifugaal schoepenwiel dat zich aan de binnenkant van de kamer bevindt. De stappenmotor is gemonteerd op twee L-profielen die gelast zijn op die vloerplaat.

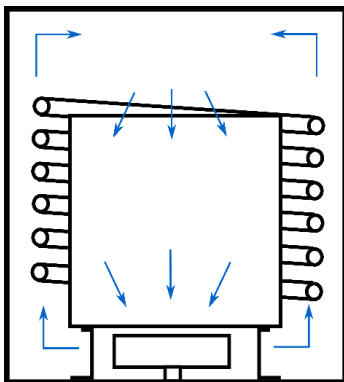
Via een rubberen koppeling is de motoras met de rotatiedoorvoer verbonden (zie Figuur 43). De overbrenging tussen de rotatiedoorvoer en het schoepenwiel wordt gerealiseerd a.d.h.v. een tussenas en een metalen koppeling. De reden waarom er een centrifugaal schoepenwiel wordt gekozen, is zijn hoge drukverhouding tussen de in- en uitgang. Het hoge drukverschil betekent in dit geval een grote stromingssnelheid in het systeem.



Figuur 43: Verbinding tussen de stappenmotor en het schoepenwiel

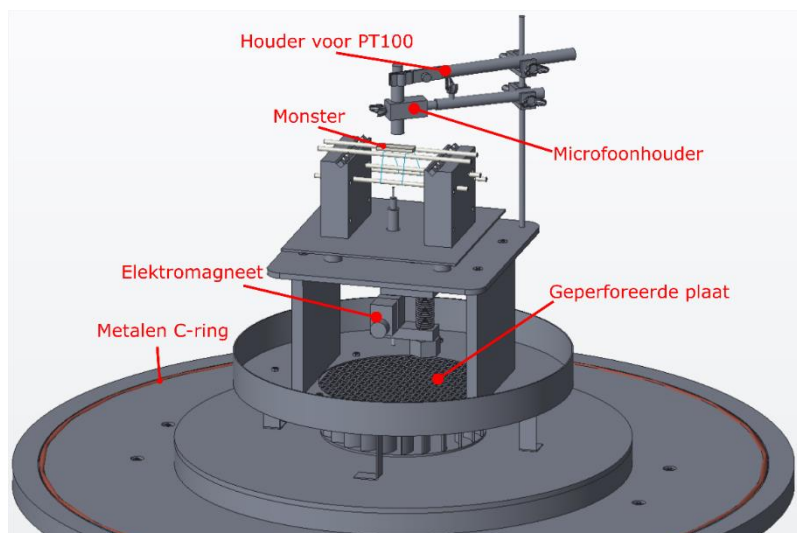
De bedoeling van de positie voor het schoepenwiel is om het koude gas naar boven te sturen. Op zo'n manier wordt een homogene temperatuur in de meetkamer gecreëerd (zie Figuur 44).

Bovenop het schoepenwiel is er een cirkelvormige plaat, d.m.v. vier voetstukken, op de vloerplaat gemonteerd. Deze plaat heeft in het midden een holte die even groot is als het schoepenwiel. Om het schoepenwiel te beschermen tegen mogelijke brokstukjes van het monster bij hoge rotatiesnelheid, wordt in de holte van de cirkelvormige plaat nog een tweede geperforeerde plaat vastgeschroefd. Daarna wordt een kleine cilindrische mantel op die plaat vastgelast. Met de bedoeling om de gasstroming helemaal naar boven te leiden, wordt er nog een keramische buis binnen de cilindrische mantel geplaatst (zie Figuur 46).

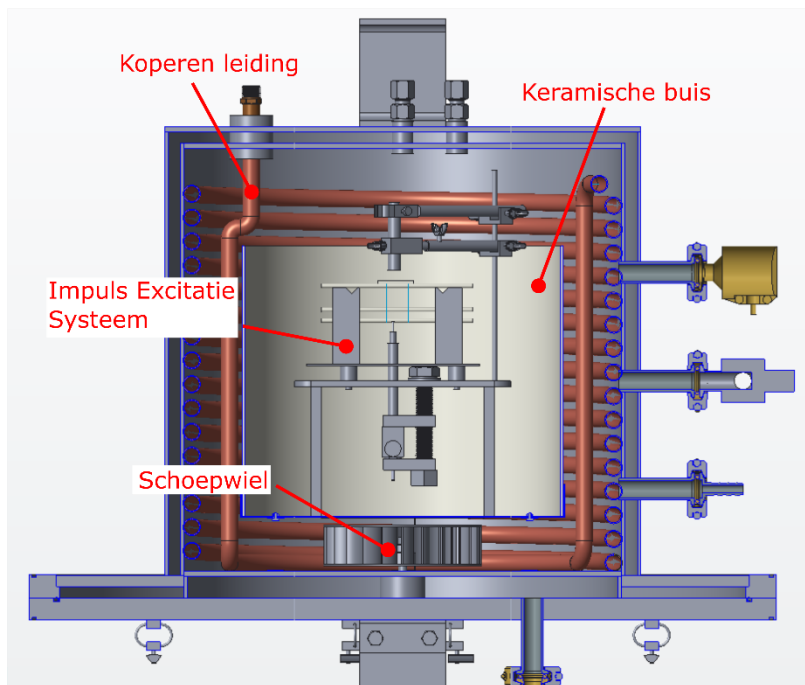


Figuur 44: Gasstroming in de meetkamer

Op de rand van de vloerplaat is er nog een gleuf voorzien voor de metalen C-ring. Dit is het afdichtingselement van de meetkamer en is geschikt voor systemen met een ultrahog vacuüm en een cryogene temperatuur (zie Figuur 45).



Figuur 45: Onderste helft van de meetkamer

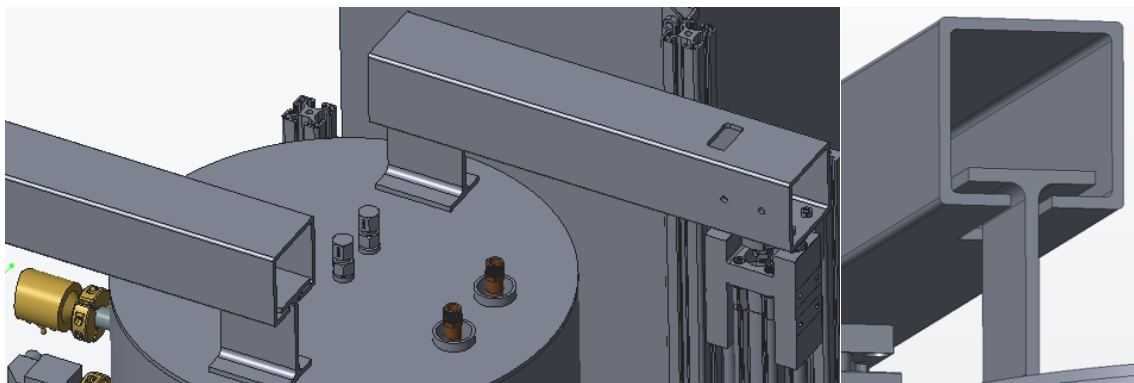


Figuur 46: Doorsnede van de hele meetkamer

5.1.4. Het liftstelsel

De bovenste helft van de kamer weegt, bij benadering, ± 80 kg en kan via twee elektrische cilinders opgetild worden. De cilinders hebben een interne kogelomloopspindel en worden aangedreven door twee stappenmotoren. Wanneer de motoren beginnen te draaien, brengen ze de kogelomloopspindels ook in beweging. Wat betreft de regelmogelijkheid van de motoren, zijn ze volledig regelbaar via controlemodules en controlesoftware.

Ieder cilinder is via twee adapterblokken en twee montagestukken op het aluminium profiel bevestigd. Daarnaast is er een externe geleiding op het uiteinde van de spindel gemonteerd. Dit helpt om het moment op de spindel op te vangen (zie Figuur 47).



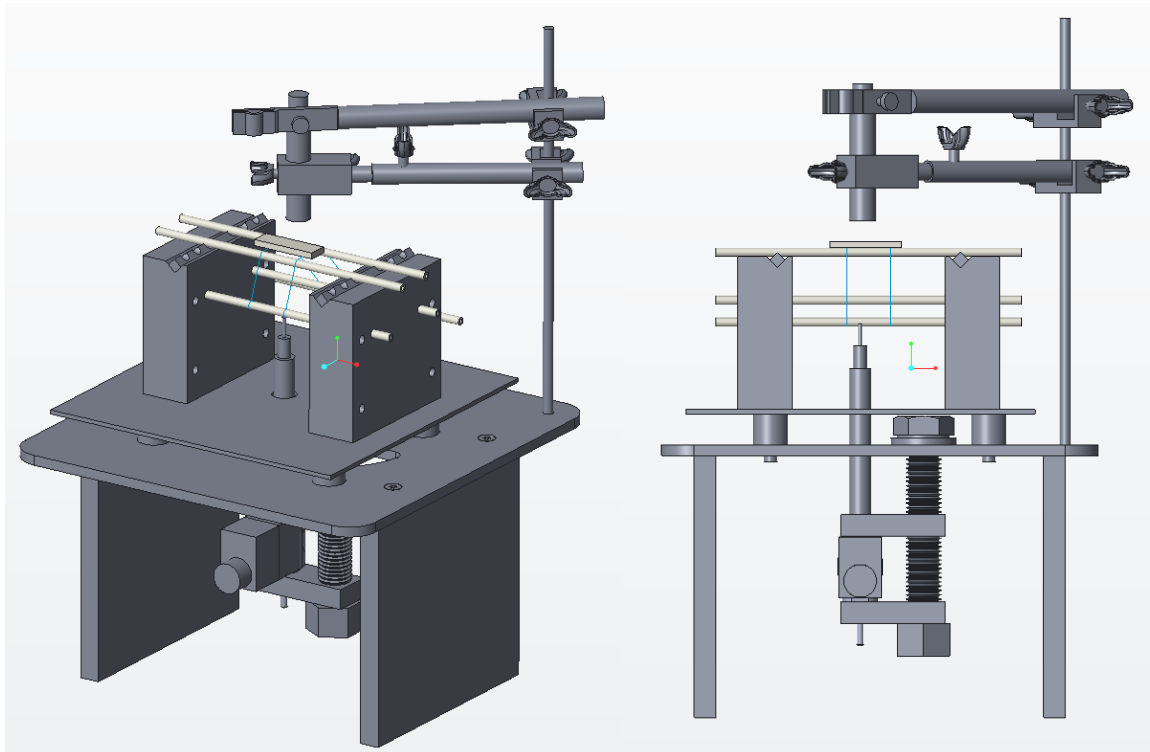
Figuur 47: Verbinding via metalen balken en I-profielen

De verbinding tussen de cilinder en de meetkamer wordt gemaakt via twee standaard metalen balken en twee I-profielen. Aan een uiteinde zijn de balken met vier M6 schroeven op de geleiding vastgemaakt. Een rechthoek wordt op de balk gefreesd om de monteerbaarheid te vergemakkelijken. Aan het andere uiteinde wordt een gleuf, die iets breder is dan de dikte van het I-profiel, gefreesd. De I-profielen zijn vastgelast op de kamer. Door deze gleuf in het I-profiel te schuiven wordt er een ontkoppelde verbinding verkregen.

Bij het neerzetten, zal het eigengewicht van de kamer een relatief hoge druk van ± 40 MPa uitoefenen op de metalen C-ring. Dit is ongeveer 1/10 van de maximale druk die de C-ring aankan. De meetkamer rust, via speciale dempers, op een onderstel dat opgebouwd is uit aluminium profielen. De functie van die dempers is om de meetkamer te isoleren van externe trillingsbronnen.

5.1.5. Het impulsexcitatiesysteem

Het originele impulsexcitatiesysteem van IMCE wordt hierbij overgenomen. Uit de laagtemperatuurtesten (zie paragraaf 4.1), blijkt dat het impulsexcitatiesysteem steeds toepasbaar is bij -85 °C.

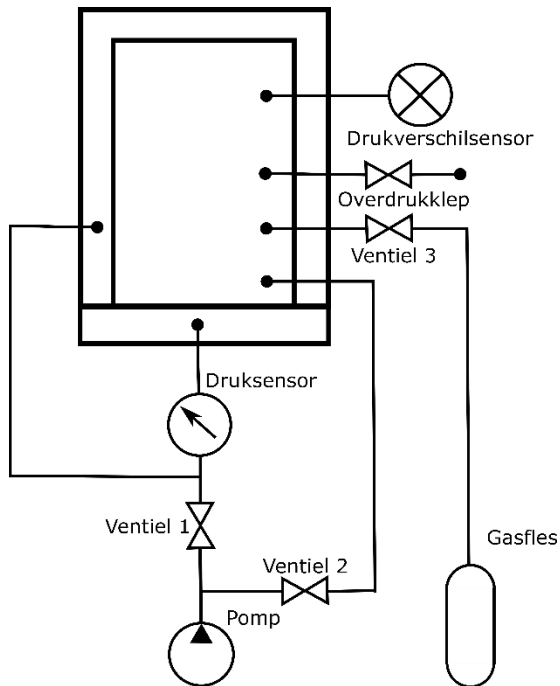


Figuur 48: Impulsexcitatiesysteem

Het principe van de impulsexcitatietechniek werd reeds in 2.1 uitgelegd. De hoofdcomponenten zijn immers de excitatiebron en de signaalopnemer. De excitatiebron in dit geval is een elektromagneet. Hij zal een keramisch projectiel afschieten wanneer de interne spoel bekrachtigd wordt. Hij wordt via een moer op een M16 schroef bevestigd. Bijgevolg kan de hoogte daarvan makkelijk ingesteld worden. Het meetplatform rust op vier schroeven met rubber koppen (zie Figuur 48).

Omwille van het stabiliteitsprobleem van het systeem, worden zijn voetstukken op die cirkelvormige plaat vastgelast. Op de hoek van de onderste platform wordt er ook een statief vastgemaakt. De staaf heeft een getapt uiteinde en kan gemakkelijk in het voorziende gat geschroefd worden. Bovendien zijn er twee verlengstangen, doormiddel van twee dubbelklemmen, op dit statief bevestigd. Één is voor de akoestische opnemer en één voor de PT100 thermometer. De posities van beide zijn gemakkelijk instelbaar via de vleugelschroeven.

5.1.6. Het vacuüm- en spoelproces



Figuur 49: Het vereenvoudigde processchema

Om dit hoofdstuk af te sluiten, wordt hier de volgorde van alle ventielen en drukkleppen tijdens het vacuüm- en het spoelproces besproken. Dit zal een beter inzicht geven op deze processen.

Eerst wordt de isolatielaag via ventiel 1 vacuümgepompt. Eenmaal de ingestelde druk in de isolatielaag bereikt is, zal de druksensor een signaal geven. Waarna ventiel 1 dicht en ventiel 2 open gedaan wordt. Dit is het begin van het spoelproces.

Aangezien hoog vacuüm niet vereist is bij dit spoelproces, is hier ook geen druksensor geïnstalleerd. Ventiel 2 zal samen met de pomp na een bepaalde tijd stopgezet worden. Deze tijd is ongeveer 38 s en wordt berekend op basis van het volume van de kamer (± 50 l) en het volumedebiet van de pomp ($\pm 1,3$ l/s).

Vlak nadat ventiel 2 dicht is, wordt ventiel 3 opengedaan. De hogedruk in de stikstofgasfles zorgt ervoor dat het stikstofgas onmiddellijk binnen de kamer wilt stromen. Hierbij bepaalt de drukverschilsensor wanneer het spoelproces stopgezet moet worden.

Belangrijk is dat hier, gedurende het spoelproces, de drukverschilsensor alarmsignaal zal blijven sturen. Deze sensor is bedoeld om het systeem tegen over- en onderdruk te beveiligen en zal alleen stoppen als de druk in de kamer terug op de atmosferische druk is. De grenswaarde voor deze sensor is $1,013 \pm 0,006$ bar.

Tijdens de werking zal het gas in het systeem, afhankelijk van het temperatuurverschil met de oorspronkelijke toestand, uitzetten of inkrimpen. Om die reden kan de druk in de meetkamer, van $\pm 0,66$ bar(a) tot 1.27 bar(a), variëren. Wanneer de ingestelde ondergrens in de drukverschilsensor overschreden is, zal ventiel 3 opengedaan worden. De overdrukklep opent automatisch vanaf een vaste overdruk van 1,1 bar.

6. Concept en aanbeveling voor de meetopstelling bij -180 °C

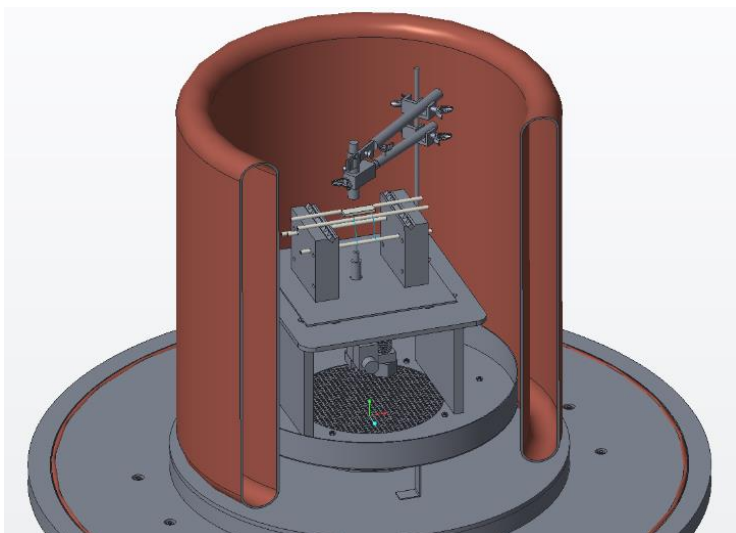
Het ontwerp van de meetopstelling met een temperatuurbereik van -80 °C tot 100 °C, focust vooral op het selecteren en dimensioneren van componenten. De integratie van de koel- en vacuümtechniek is ook één van de hoofdtakken. Maar wegens tijdsgebrek was het andere concept met het temperatuurbereik van -180 °C tot 100 °C, niet volledig uitgewerkt.

Het systeem met een eindtemperatuur van -180 °C verschilt niet veel met dat van -80 °C. Hetzelfde isolatiesysteem is steeds toepasbaar. Het kiezen van een gepast koelsysteem is moeilijker bij de lagere eindtemperatuur. Hierbij zal men twee tegenstrijdige opties tegenkomen. Aan de ene kant moet het systeem een hoger koelvermogen kunnen leveren. Dit is realiseerbaar met vloeibare stikstof, maar tegelijkertijd wordt het systeem ook moeilijker regelbaar. Aan de andere kant kan men m.b.v. cryokoeler een veel stabielere en regelbaardere koeleffect krijgen, maar wel tegen een beduidend laag koelvermogen.

Wat betreft het opwarmen van het monster, kan men gebruik maken van infraroodverwarmingselementen. Die hebben het voordeel dat ze, los van de convectieve warmteoverdracht, direct objecten kunnen opwarmen. Maar het nadeel is dat het warmtevermogen, afhankelijk van de emissiviteit en de oppervlakteruwheid, varieert bij verschillende materialen.

Voor ieder voordeel is er altijd een overeenkomstig nadeel. In het bedachte concept voor -180 °C wordt de vloeibare stikstof gebruikt om het monster af te koelen. De vloeibare stikstof wordt vaak opgeslagen in een thermisch geïsoleerd vat. Tussen dit vat en de meetkamer plaatst men een buffervat waarbij de temperatuur van de vloeibare stikstof tijdelijk oploopt en begint te verdampen. Het resultaat is een hogedruk opslagvat gevuld met vloeibare stikstof. Het debiet van de vloeibare stikstof kan men regelen via een solenoïde ventiel dat zich tussen het buffervat en de meetkamer bevindt.

De structuur van de meetkamer blijft hierbij ongewijzigd. De koperen leiding wordt vervangen door een dubbelwandige koperen vat (zie Figuur 50). Het verwarmingselement dat hiervoor in aanmerking komt is een infraroodverwarmingselement. Zoals hierboven wordt vermeld, biedt het de mogelijkheid om het monster direct op te verwarmen. Aangezien de warmteoverdracht via straling gebeurt, moeten alle componenten lagere oppervlakteruwheden hebben om de emissiviteiten te verlagen. Op de monsters wilt men juist het tegengesteld effect creëren en moeten die een zo hoog mogelijke ruwheid bezitten.



Figuur 50: Doorsnede van de dubbelwandige koperen vat

Maar voor dit concept zijn er nog een aantal onopgeloste vragen. Éen van de vragen is welke componenten van het impulsexcitatiesysteem kunnen zich nog ten dienste stellen bij $-180\text{ }^{\circ}\text{C}$. Dit kan men enkel te weten komen door testen uit te voeren. In het slechtste geval kan men de microfoon vervangen door een laservibrometer en de excitator uitrusten met een cryogene temperatuur compatibele elektromagneet.

Daarnaast moet men ook uitzoeken welk ventilatiesysteem past bij deze temperatuur. Want de externe beweging moet via een vacuümdichte en een laagtemperatuur compatibele manier aan het interne schoepenwiel overgebracht worden. Op de markt zijn er lagers voor ruimtevaarttoepassingen te vinden, maar die zijn vaak veel te duur voor commerciële toepassingen waarbij massaproductie vereist is. Daarom is het belangrijk om dit probleem op te lossen op een economische manier.

Verwijzingen

- Ali Reza Moazed, L. S. (1989). Granular and powdered insulations. In D. L. Eric C. Guyer, *Handbook of applied thermal design* (pp. 3-25). New York: McGraw-Hill.
- ASTM International. (2005, February). ASTM E1876: Standard Test Method for Dynamic Young's Modulus, Shear Modulus, and Poisson's Ratio by Impulse Excitation of Vibration. West Conshohocken, Pennsylvania, United States.
- ASTM International. (2008, April 15). ASTM B280: Standard Specification for Seamless Copper Tube for Air Conditioning and Refrigeration Field Service. West Conshohocken, Pennsylvania, Verenigde Staten.
- ASTM International. (2013, March). ASTM E1875: Standard Test Method for Dynamic Young's Modulus, Shear Modulus, and Poisson's Ratio by Sonic Resonance. West Conshohocken, Pennsylvania, Verenigde Staten.
- Baeten, B. (2014). *Fuidomechanica*. België: Universiteit Hasselt.
- Barron, R. F. (2000). Cryogenic systems. In F. Kreith, *The CRC handbook of thermal engineering* (pp. 4-317). Verenigde Staten: CRC Press LLC.
- Bejan, A. (1997). *Advanced engineering thermodynamics*. New York: John Wiley & Sons, Inc.
- Charmchi, M. (1989). Forced convection heat transfer. In E. C. Guyer, *Handbook of applied thermal design* (pp. 1-48). Verenigde Staten: McGraw-Hill.
- Conax Technologies. (2012). *Compression Seal Fittings: The Complete Guide to Vacuum and Pressure Seal Assemblies*. Buffalo, New York, Verenigde Staten.
- E.I. Mikulin, A. T. (1984). Low-temperature expansion pulse tubes. In A. F. K.D. Timmerhaus, *Advances in Cryogenic Engineering, vol. 30* (p. 629). New York, Verenigde Staten: Plenum Press.
- eppendorf. (2017). *Innova ULT Upright Freezers*. Opgehaald van eppendorf.
- Fesmire, J. E. (2014). *Standardization in cryogenic insulation systems testing and*. Verenigde Staten: NASA Kennedy Space Center.
- Föll, H. (2015, Juli). *Ductile to Brittle Transition or Cold Shortness*. Opgehaald van Christian-Albrechts-Universität zu Kiel: https://www.tf.uni-kiel.de/matwis/amat/iss/kap_9/illustr/s9_1_1.html
- Frank, K. (2000). The CRC handbook of thermal engineering. In K. Frank, *The CRC handbook of thermal engineering* (p. 324). Boca Raton : CRC.
- Guyer, E. C., & Brownell, D. L. (1989). *Handbook of applied thermal design*. New York: McGraw-Hill.
- Hibbeler, R. C. (2014). Samengestelde belastingen. In R. C. Hibbeler, *Sterkteleer* (p. 425). Nederland: Pearson Benelux.
- IMCE.nv. (2017). *RFDA Basic*. Opgehaald van IMCE: <http://www.imce.eu/products/rfda-basic>
- Julabo. (2017, Juli). PRESTO A85 temperature control system / process system. *Highly Dynamic Temperature Control Systems Presto & Forte HT*. Gerhard-Juchheim-Strasse 1, Seelbach, Duitsland. Opgehaald van Julabo.

- Kent, A. (1993). *Experimental low-temperature physics*. Verenigd Koninkrijk, Chatham, Kent: Mackays of Chatham PLC.
- Kreith, F. (. (2000). *The CRC handbook of thermal engineering*. Boca Raton : CRC.
- Leybold. (2016, September). Oil sealed pump. Bonner Strasse, Cologne, Duitsland.
- Lincoln Eletric. (2017). *Tensile Strength of Brazed Joints*. Opgehaald van Lincoln Eletric: <http://www.harrisproductsgroup.com/en/Expert-Advice/tech-tips/tensile-strength-of-brazed-joints.aspx>
- McHenry, H. I. (1989). Metals and alloys for low temperatures. In E. C. Guyer, *Handbook of applied thermal design* (pp. 4-2). Verenigde Staten: McGraw-Hill.
- Morrell, J. D. (2006). Measurement Good Practice Guide No. 98 Elastic Modulus Measurement. Hampton Road, Middlesex, Scotland.
- Mountain Instruments. (2016, 1 6). *UNDERSTANDING THE GIFFORD-MCMAHON CRYOCOOLER CYCLE: SINGLE STAGE*. Opgehaald van Mountain Instruments: <http://resources.montanainstruments.com/help/understanding-the-gifford-mcmahon-cryocooler-cycle>
- Pfeiffer Vacuum GmbH. (2017). *Metal seals*. Opgehaald van Pfeiffer Vacuum: <https://www.pfeiffer-vacuum.com/en/know-how/mechanical-components-in-vacuum/materials/sealing-materials/metal-seals/>
- Ralph C. Longworth, Y. L. (1989). Cryogenic Fluids and design practice. In E. C. Gyuer, *Handbook of applied thermal design* (pp. 11-2). Verenigde Staten: McGraw-Hill.
- Riede P.M., W. D. (1960). Characteristics and Applications of Some Superinsulations. *Advances in Cryogenic Engineering vol.5*, 209-215.
- Rinebolt, H. (1951). *Transaction American Society for Metals vol. 53*, 1175. Opgehaald van Iron, Steel and Swords script: https://www.tf.uni-kiel.de/matwis/amat/iss/kap_9/illustr/s9_1_1.html
- The engineering toolbox. (2017, Juli 22). *Ventilation Ducts - Roughness & Surface Coefficients*. Opgehaald van The engineering toolbox: http://www.engineeringtoolbox.com/surface-roughness-ventilation-ducts-d_209.html
- Wikipedia. (2016, December 26). *Solderen*. Opgehaald van Wikipedia: <https://nl.wikipedia.org/wiki/Solderen>
- Wikipedia. (2017, Juli 4). *Ductility*. Opgehaald van Wikipedia: <https://en.wikipedia.org/wiki/Ductility>
- Wikipedia. (2017, Mei 26). *Moody chart*. Opgehaald van Wikipedia: https://en.wikipedia.org/wiki/Moody_chart
- Wikipedia. (2017, Juli 18). *Polyoxymethylene*. Opgehaald van Wikipedia: <https://en.wikipedia.org/wiki/Polyoxymethylene>
- Wikipedia. (2017, April 22). *Pulse tube refrigerator*. Opgehaald van Wikipedia: https://en.wikipedia.org/wiki/Pulse_tube_refrigerator
- Wikipedia. (2017, Juni 30). *Thermal conduction*. Opgehaald van Wikipedia: https://en.wikipedia.org/wiki/Thermal_conduction

Wikipedia. (2017, Juni 11). *Vapor-compression refrigeration*. Opgehaald van Wikipedia:
https://en.wikipedia.org/wiki/Vapor-compression_refrigeration

Yunus A. Cengel, M. A. (2011). *Thermodynamics: An Engineering Approach*. McGraw-Hill.

Bijlage A: Julabo Presto A85

Order No.	9420852																											
Category	Temperature Control PRESTO																											
Working temperature range (°C)	-85 ... +250																											
Temperature control	ICC																											
Temperature stability (°C)	±0.05 ... ±0.1																											
Setting / display resolution	±0.01 °C																											
Integrated programmer	8x60 steps																											
Temperature Display	TFT Touchscreen																											
Heating capacity (kW)	6 @ 400V; 6 @ 230V; 5.5 @ 208V																											
Cooling capacity (Medium: JULABO Thermal Ethanol)	<table border="0"> <tr> <td>°C</td> <td>200</td> <td> </td> <td>20</td> <td>0</td> <td>-</td> <td>-</td> <td>-</td> <td>-</td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>20</td> <td>40</td> <td>60</td> <td>80</td> </tr> <tr> <td>kW</td> <td>2.8</td> <td> </td> <td>2.5</td> <td>2.4</td> <td>2.4</td> <td>2.4</td> <td>2.2</td> <td>0.4</td> </tr> </table>	°C	200		20	0	-	-	-	-						20	40	60	80	kW	2.8		2.5	2.4	2.4	2.4	2.2	0.4
°C	200		20	0	-	-	-	-																				
					20	40	60	80																				
kW	2.8		2.5	2.4	2.4	2.4	2.2	0.4																				
Pump capacity flow rate (l/min)	35 ... 80																											
Pump capacity flow pressure (bar)	0.48 ... 3.2 @ 400V; 0.48 ... 3.2 @ 230V; 0.48 ... 3 @ 208V																											
Viscosity max. (cSt)	50																											
Pump connections	M30x1.5																											
External Pt100 sensor connection	integrated																											
Digital interfaces	RS232 SD memory card USB Ethernet Modbus Alarm-out Optional: RS485, Profibus																											
Analog connection input / output	Optional																											
Ambient temperature	5 ... 40 °C																											
Dimensions W x L x H (cm)	61 x 108 x 125																											
Weight (kg)	365																											
Sound pressure level (distance 1 m) max. (dBA)	69																											
Process volume min. (active heat exchanger volume) liters	9.5 (5)																											
Internal usable expansion vol. (liters)	7																											
Classification according to DIN12876-1	Classification III (FL)																											
Cooling of compressor	2-stage Air																											

Available voltage versions

3 x 208-230V/60Hz (+/- 5%) / 30A @ 208V, 33A @ 230V /
Without Plug
3 x 230V/50Hz (+/- 10%) / 30A / Plug 63A CEE
3 x 400V/50Hz (+/- 10%) / 18A / Plug 32A CEE

Gegevens afkomstig van: Julabo, Presto A85, 2017

Bijlage B: Julabo ThermalFluid HL80

Order no. 5 liters	8940121
Order no. 10 liters	8940120
Working temperature (°C)	-85...+170
Flash point (°C)	>+65
Fire point (°C)	+112
Viscosity (kinematic at 20 °C in mm²/s)	3.21
Density (at 20 °C in g/cm³)	0.89
Pour point (°C)	<-108
Boiling point (°C)	+230
Ignition temperature (°C)	+335
Color	clear
Thermal expansion coefficient K⁻¹	0.00097
Heat conductivity [W/m*K]	0.12
Specific volume resistivity [Ohm*cm]	4x10 ¹⁴

Gegevens afkomstig van: Julabo, Thermal HL80, 2017

Bijlage C: Pomp TRIVAC D 4 B

Technical Data

TRIVAC D 4 B

two-stage

50 Hz

60 Hz

		50 Hz	60 Hz
Nominal pumping speed ¹⁾	m ³ /h (cfm)	4.8 (2.8)	5.8 (3.4)
Pumping speed ¹⁾	m ³ /h (cfm)	4.2 (2.5)	5.0 (3.0)
Ultimate partial pressure without gas ballast ¹⁾	mbar (Torr)	10 ⁻⁴ (0.75 x 10 ⁻⁴)	10 ⁻⁴ (0.75 x 10 ⁻⁴)
Ultimate total pressure without gas ballast ¹⁾	mbar (Torr)	< 2 x 10 ⁻³ (< 1.5 x 10 ⁻³)	< 2 x 10 ⁻³ (< 1.5 x 10 ⁻³)
Ultimate total pressure with gas ballast ¹⁾	mbar (Torr)	< 5 x 10 ⁻³ (< 3.8 x 10 ⁻³)	< 5 x 10 ⁻³ (< 3.8 x 10 ⁻³)
Water vapor tolerance ¹⁾	mbar (Torr)	30.0 (22.5)	30.0 (22.5)
Water vapor capacity	g/h (lbs/h)	95 (0.209)	110 (0.243)
Oil filling, min. / max.	l (qt)	0.3 / 0.8 (0.3 / 0.85)	0.3 / 0.8 (0.3 / 0.85)
Noise level ²⁾ to DIN 45 635, without / with gas ballast	dB(A)	50 / 52	50 / 52
Admissible ambient temperature	°C (°F)	+12 to +40 (+54 to +104)	+12 to +40 (+54 to +104)
Motor rating ²⁾	W (HP)	370 (0.50)	370 (0.50)
Nominal speed	rpm	1500	1800
Type of protection	IP	3)	3)
Weight ²⁾	kg (lbs)	17.9 (39.4)	17.9 (39.4)
Connections, Intake and Exhaust	DN	16 KF	16 KF

Gegevens afkomstig van: Leybold, Oil sealed pump, 2016

Auteursrechtelijke overeenkomst

Ik/wij verlenen het wereldwijde auteursrecht voor de ingediende eindverhandeling:
Het ontwerpen van een meetopstelling voor de impuls excitatie techniek bij -80 °C tot 100 °C

Richting: **master in de industriële wetenschappen: elektromechanica**
Jaar: **2017**

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,

Zhu, Yongkang

Datum: **22/08/2017**