

2015•2016  
FACULTEIT INDUSTRIËLE INGENIEURSWETENSCHAPPEN  
*master in de industriële wetenschappen: energie*

## Masterproef

Optimalisatie van metingen aan het uiteinde van de loopmond van een .50 wapen

Promotor :  
dr. Stan WOUTERS  
Johan BAETEN

Promotor :  
Prof. dr. ir MARC PIRLOT  
Dhr. ALAIN DOUCET

Jonas Lens

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

Gezamenlijke opleiding Universiteit Hasselt en KU Leuven

2015•2016  
Faculteit Industriële  
ingenieurswetenschappen  
*master in de industriële wetenschappen: energie*

## Masterproef

Optimalisatie van metingen aan het uiteinde van de  
loopmond van een .50 wapen

Promotor :  
dr. Stan WOUTERS  
Johan BAETEN

Promotor :  
Prof. dr. ir MARC PIRLOT  
Dhr. ALAIN DOUCET

Jonas Lens

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

## Woord vooraf

In het kader van mijn opleiding tot master in de industriële wetenschappen energie/automatisering aan de universiteit Hasselt liep ik stage als masterproef bij de Koninklijke Militaire School te Brussel. De masterproef bestond uit het ontwikkelen van een drukmeetopstelling in en rondom een mondaccessoire van een .50 wapen- en munitie systeem.

Op de eerste plaats wil ik iedereen bedanken die mij heeft geholpen bij de realisatie en de goede afloop van deze masterproef. In het bijzonder wil ik de heer Marc Pirlot en de heer Alain Doucet, mijn stagepromotoren, bedanken dat ik de kans heb gekregen om deze masterproef bij de Koninklijke Militaire School te doen. Ook bedank ik hen voor de goede samenwerking en de steun die ik van hen gekregen heb. Ook alle andere medewerkers van het departement ABAL in het bijzonder Alain Vanhove, bedank ik voor hun hulp, voor de boeiende aanwijzingen en de stimulerende bedenkingen gedurende mijn masterproef. Tevens dank ik mijn stagepromotor van de UHasselt, de heer Stan Wouters, voor de ondersteuning en het advies.

Verder wil ik mijn ouders bedanken omdat zij mij de kans hebben gegeven om deze studie te verwezenlijken.

Jonas Lens



# Inhoudsopgave

Lijst van tabellen.....	5
Lijst van figuren .....	7
Verklarende woordenlijst.....	9
Verklarende symbolenlijst.....	11
1 Inleiding .....	13
1.1 Situering .....	13
1.2 Probleemstelling.....	13
1.3 Doelstellingen.....	14
1.4 Materiaal en methode.....	14
2 Grondbeginselen van de ballistiek .....	16
2.1 Ballistiek .....	16
2.1.1 Inwendige ballistiek.....	16
2.1.2 Intermediaire ballistiek .....	17
2.1.3 Uitwendige ballistiek .....	17
2.1.4 Terminale ballistiek .....	18
2.2 Vuurwapen .....	19
2.2.1 Verbrandingskamer .....	19
2.2.2 Ziel en loop .....	19
2.2.3 Munitie .....	19
2.4 Mondaccessoire .....	20
2.4.1 Mondingsrem .....	20
3 Meetkring .....	21
3.1 Algemene opbouw van een meetsysteem.....	21
3.2 De drukmeting.....	22
3.2.1 Piëzo-elektrische sensoren.....	23
3.4 De lineair variabele differentiaal-transformator.....	25
3.5 Signaalconditionering en signaalversterking.....	26
3.5.1 Ladingsversterker Kistler type 5011 .....	26
3.5.2 PCB piezotronics model 482 c series.....	26
3.5.3 Data-acquisitie.....	27
4 BMCI meetopstelling .....	28
5 Drukmetingen inwendige ballistiek.....	29
5.1 Opbouw van de sensoren.....	29

5.2 Meetresultaten van de inwendige ballistiek .....	30
6 Drukmetingen intermediaire ballistiek .....	32
6.1 Meetopstelling met het dispositief .....	32
6.1.1 Ontwerpen van de schijf waar de sensoren worden bevestigd .....	33
6.1.2 De opstelling.....	34
6.2 Meetopstelling met de kistler sensoren.....	37
6.2.1 De opstelling.....	38
6.3 Meetopstelling met geoptimaliseerde sensorhouder .....	40
6.3.1 Ontwerp sensorhouder .....	40
6.4 Meetopstelling met een onderlinge afstand van 47 mm tussen loopmond en sensorhouder ..	41
6.5 Meetopstelling met een onderlinge afstand van 30 mm tussen loopmond en sensorhouder ..	43
6.7 Meetopstelling met de blast pencils .....	45
6.7.1 De opstelling.....	45
7 De uiteindelijke meetopstelling voor het meten van de intermediaire ballistiek .....	48
7.1 De meetopstelling .....	48
7.2 Meetopstelling voor een video-opname van de uitstroomgassen .....	49
7.3 Opstelling in de operatorkamer .....	49
7.4 Meetresultaten en signaalverwerking .....	50
7.3.1 Filterkeuze .....	51
7.3.2 Frequentie-analyse.....	53
8 LabVIEW .....	56
8.1 Inleiding .....	56
8.2 Verschillende VI's .....	56
8.2.1 Signaalverwerking voor de verschillende meetopstellingen.....	56
8.2.2 Fast Fourier-transformatie .....	57
8.2.3 Signaalconditionering en verwerking voor de uiteindelijke meetopstelling.....	58
Besluit.....	59
Bibliografie .....	60
Bijlagen .....	62

## Lijst van tabellen

Tabel 1: Verschillende eenheden en hun omzettingen. ....	22
Tabel 2: Parameterinstellingen Butterworth filter.....	53





## Lijst van figuren

Figuur 1: Werking van de gasdruk in het vuurwapen. [5] .....	13
Figuur 2: Meetopstelling met schijfhouder en muzzle flash.....	14
Figuur 3: Inwendige ballistiek [4] .....	16
Figuur 4: Intermediaire ballistiek. [11].....	17
Figuur 5: Uitwendige ballistiek. [4].....	18
Figuur 6: Terminale ballistiek. [4].....	18
Figuur 7: Munitie .50. ....	19
Figuur 8: Schematische opbouw van de meetketen.....	21
Figuur 9: De verschillende drukken.[1] .....	22
Figuur 10: Afname van de piëzo-elektrische gevoeligheid. ....	23
Figuur 11: Principiële voorstelling van het kristal.[1].....	24
Figuur 12: a) Opbouw en b) principiële schakeling van de LVDT. ....	25
Figuur 13: De 'DC' en 'AC' overdrachtskarakteristiek bij een LVDT.[1].....	25
Figuur 14: Kistler type 5011 [8] .....	26
Figuur 15: PCB piëzotronics model 482C [14] .....	26
Figuur 16: NI PXIe-1075.....	27
Figuur 17: BMCI opstelling .50. ....	28
Figuur 18: Zandbak.....	28
Figuur 19: Mogelijke plaatsen voor een drukmetingen in het vuurwapen.[4] .....	29
Figuur 20: Doorsnede van een afdichting met een o-ring. ....	29
Figuur 21: De gemeten drukken bij de inwendige ballistiek. ....	30
Figuur 22: De terugloopbeweging bij meting van de inwendige ballistiek. ....	31
Figuur 23: Met uitsparing (Recessed mount) [13] .....	33
Figuur 24: Zonder uitsparing (Flush mount) [13] .....	33
Figuur 25: Sensorhouders voor M109C12.....	34
Figuur 26: Dispositief.....	34
Figuur 27: Meetopstelling met dispositief. ....	34
Figuur 28: De gemeten drukken bij meetopstelling met dispositief.....	35
Figuur 29: De gemeten drukken bij meetopstelling met dispositief weergegeven vanaf de tussen ballistiek. ....	35
Figuur 30: De terugloopbeweging bij meetopstelling met dispositief. ....	36
Figuur 31: De gemeten drukken bij meetopstelling met dispositief waarbij de afstand is veranderd (20mm).....	36
Figuur 32: De gemeten drukken in de tussen ballistiek bij meetopstelling met dispositief waarbij de afstand is veranderd (20mm).....	37
Figuur 33: De terugloopbeweging bij meetopstelling met dispositief waarbij de afstand is veranderd (20mm).....	37
Figuur 35: Sensor positie voor de schijf .....	38
Figuur 34: Sensor positie achter de schijf .....	38
Figuur 36: De gemeten drukken bij de kistler sensoren. ....	38
Figuur 37: Ingezoomd op figuur 36. ....	39
Figuur 38: De terugloopbeweging bij de kistler sensoren. ....	39
Figuur 39: Achteraanzicht schijf .....	40
Figuur 40: Vooraanzicht schijf .....	40
Figuur 41: De gemeten drukken bij de geoptimaliseerde sensorhouder. ....	41
Figuur 42: Ingezoomd op figuur 41. ....	41
Figuur 43: De gemeten drukken op een onderlinge afstand van 47mm tussen loopmond en sensorhouder .....	42

Figuur 44: Ingezoomd op figuur 43. ....	42
Figuur 45: De terugloopbeweging bij een onderlinge afstand van 47mm tussen loopmond en sensorhouder. ....	43
Figuur 46: De gemeten drukken op een onderlinge afstand van 30mm tussen loopmond en sensorhouder. ....	43
Figuur 47: Ingezoomd op figuur 46. ....	44
Figuur 48: Meetopstelling met de blast pencils. ....	45
Figuur 49: De gemeten drukken en teruglooptlengte bij de meetopstelling met blast pencils.....	46
Figuur 50: Ingezoomd op figuur 49. ....	46
Figuur 51: De gemeten drukken bij de meetopstelling met blast pencils waarvan er twee pencils omgewisseld zijn. ....	47
Figuur 52: Ingezoomd op figuur 51. ....	47
Figuur 53: De uiteindelijke meetopstelling voor het meten van de intermediaire ballistiek. ....	48
Figuur 54: Cameraopstelling. ....	49
Figuur 55: Opstelling in de operatorkamer. ....	50
Figuur 56: De gemeten drukken bij de intermediaire ballistiek.....	50
Figuur 57: Laagdoorlaatfilter. [15] ....	51
Figuur 58: Stapresponse van Bessel, Butterworth en Chebyshev.....	52
Figuur 59: Doorlaatband van Bessel, Butterworth en Chebyshev. ....	52
Figuur 60: Frequentie analyse.[4] ....	53
Figuur 61: De gemeten drukken voor en achter de schijf. ....	54
Figuur 62: De gemeten drukken bij de blast-pencils.....	54
Figuur 63: Mach-kegel. ....	55
Figuur 64: Voorlopig LabVIEW programma.....	56
Figuur 65: LabVIEW programma FFT.....	57
Figuur 66: LabVIEW programma .....	58

## Verklarende woordenlijst

<b>Ballistiek</b>	De wetenschappelijke studie van verschijnselen die zich voordoen bij het vertrek, de vlucht en de aankomst van projectielen op doel.
<b>BMCI</b>	Bloc Manométrique à Canon Interchangeable
<b>Chambrage</b>	De verhouding tussen de diameter van de ziel en de diameter van de verbrandingskamer van een vuurwapen.
<b>Deflagratie</b>	Een explosieve verbranding van propulsief kruit.
<b>Huls</b>	Een omhulsel bestaat uit een slaghoedje, het propulsief kruit en de kogel. Meestal vervaardigd uit metaal (meestal messing of staal).
<b>Kaliber</b>	De diameter van de ziel (gladde loop) of de diametrale afstand tussen de velden (getrokken loop).
<b>Kulas (sluitstuk)</b>	Dit gedeelte van het vuurwapen zal de achterkant van de verbrandingskamer afsluiten.
<b>Mondingsdruk</b>	De druk van de verbrandingsgassen ter hoogte van de loopmond op het moment dat het projectiel het vuurwapen verlaat.
<b>Mondingsrem</b>	Een accessoire dat bevestigd wordt op het uiteinde van de loop om zo de terugloopenergie te reduceren.
<b>Propulsief kruit</b>	Een vaste stuwstof d.w.z. een energetische stof waarbij de reactie die gepaard gaat met het verbreken van het schijfnevenwicht wordt gekenmerkt door deflagratie.
<b>Slaghoedje</b>	Een ontsteker die wordt gebruikt voor percussiemechanismen. Het hoedje is gevuld met een kleine hoeveelheid gevoelige primaire springstof. De deflagratie van de springstof vindt plaats onder invloed van het inslaan van een slagpin op het slaghoedje. Het propulsief kruit wordt aangestoken door de voortgebrachte vlam.
<b>Terugloopbeweging</b>	De achterwaartse beweging die wordt uitgevoerd door de kulas en de aan de kulas verbonden onderdelen. Ten gevolge van de drukkrachten afkomstig van de verbrandingsgassen, die ontstaan bij het afvuren van een projectiel.
<b>Verbrandingskamer</b>	Hierin wordt het propulsief kruit verbrand en vindt de initiële drukopbouw van de verbrandingsgassen plaats.
<b>Ziel</b>	De binnenruimte van de schietbus van een vuurwapen waarin de eigenlijke versnelling van het projectiel plaatsvindt.
<b>Zielas</b>	De centrale as van de ziel.



## Verklarende symbolenlijst

Symbool	eenheid	verklaring
F	N	De kracht dat inwerkt op het kristal
k	N/m	De stijfheid deze is typisch ( $2 * 10^9$ N/m)
S	m <sup>2</sup>	De oppervlakte
K		Het kristal dit is een piëzo-elektrisch materiaal
Q	C	De elektrische lading opgewekt door het kristal
P	Pa	De druk
m	kg	De massa bij massa-veersysteem
b	Ns/m	Dempingscoëfficiënt bij massa-veersysteem
k	N/m	De veerconstante bij massa-veersysteem
$\omega_n$	r/s	De natuurlijke eigenpulsatie
$\zeta$		Zeta (wordt vaak aangeduid met de letter z)
p		In het algemeen is dit een complex getal door te veronderstellen dat "p=j* $\omega$ " kan de frequentie response op een makkelijke manier berekend worden.



## **Abstract**

Het Departement Wapensystemen en Ballistiek (ABAL) van de Koninklijke Militaire School doet onderzoek naar de ballistische fenomenen in en rondom vuurwapens. Eén van de onderzoeksprojecten bestudeert de effecten van de terugstoot van vuurwapens die ingezet worden op lichte mobiele platformen voor onder andere helikopters. De ontwikkelde terugstootkrachten zijn zodanig groot dat de helikopters onderhevig zijn aan trillingen wat een onveilig gevoel creëert voor de piloten. Met behulp van een mondingsrem kan de terugstootkracht gereduceerd worden. Ook de oriëntatie van de openingen van de mondingsrem kan nadelige blast-effecten op de structuur veroorzaken. Deze masterproef heeft tot doel een drukmeetopstelling aan de loopmond en in het loopaccessoire te ontwikkelen, deze vervolgens te optimaliseren en te automatiseren. Het bekomen drukprofiel rondom de loopmond moet gevisualiseerd en geanalyseerd worden.

De drukmetingen rond de loopmond worden gemeten met behulp van een dispositief en de bijhorende schijven waarop druksensoren kunnen bevestigd worden. Met blast-pencils kan de druk in de omgeving van de loopmond gemeten worden. De sensoren zijn speciaal ontwikkeld voor ballistische doeleinden. De uitlezing van de sensoren, het filteren van de signalen en het analyseren van de drukken gebeurt met een VI (virtual instrument) gecreëerd met het software programma LabVIEW.

De onderzoekers zullen een mondingsrem ontwerpen aan de hand van een mathematisch voorspellingsmodel voor overdrukken. De meetopstelling zal dit model controleren.





## **Abstract**

The Department of Weapon Systems and Ballistics (ABAL) of the Royal Military School, is conducting research on ballistic phenomena in and around fire weapons. One of the research projects examines the effects of the recoil of fire weapons that are used on lightweight mobile platforms including a.o. helicopters. The developed recoil forces are so great that the helicopters are prone to vibration which creates an unsafe feeling for the drivers. With the aid of a muzzle brake the recoil force can be reduced. Also, the orientation of the apertures of the muzzle brake can cause adverse effects on the structure. This master thesis aims to develop a pressure measuring device to the mouth of the barrel and in the course accessory, to optimize it and then automate it. The obtained pressure profile around the mouth of the barrel must be visualized and analyzed.

The pressure measurements around the mouth of the barrel can be measured by means of an operative part and the corresponding discs on which pressure sensors can be attached. With blast-pencils, the pressure in the vicinity of the muzzle can be measured. The sensors are designed specifically for ballistic purposes. The readout of the sensors, the filtering of the signals and the eventual analysis are done by a VI (virtual instrument) created by the LabVIEW software program.

The researchers will design a muzzle brake based on a mathematical prediction model for gauge pressure. The measurement setup will verify this model.



# 1 Inleiding

## 1.1 Situering

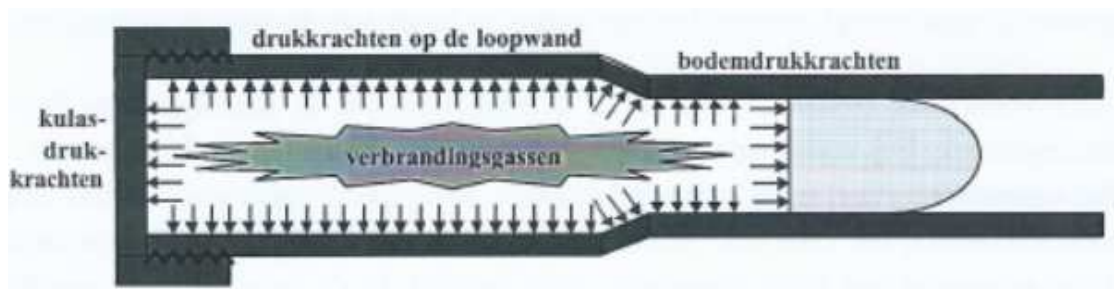
Deze masterproef vindt plaats in het Departement Wapensystemen en Ballistiek (ABAL) van de Koninklijke Militaire School. Het departement ABAL is uniek in België aangezien het de enige plaats in België is waar zowel aan academische vorming als aan wetenschappelijk onderzoek op het gebied van wapensystemen en ballistiek wordt gedaan. Ze beschikken over een laboratorium dat uitgerust is met hoogtechnologische meetapparatuur die toelaat om zowel theoretische aspecten van de ballistiek te illustreren als gespecialiseerde onderzoeksprojecten uit te voeren.

## 1.2 Probleemstelling

Eén van de onderzoeksprojecten bestudeert de effecten van de terugstoot van vuurwapens en meer bepaald de fenomenen die optreden bij het zware machinegeweer .50 Browning. Dit type wapen wordt ingezet op lichte mobiele platformen, zoals bijvoorbeeld op helikopters. De ontwikkelde terugstootkrachten zijn zodanig groot dat de helikopters onderhevig zijn aan trillingen, wat leidt tot een onveilig gevoel voor de piloten. Met behulp van een mondingsrem kan de terugstootkracht gereduceerd worden. Er dient echter rekening gehouden te worden met het feit dat de oriëntatie van de openingen van de mondingsrem nadelige blast-effecten op de structuur kunnen veroorzaken.

Bij het afvuren van een projectiel ontstaat er een verbranding die plaatsvindt in de kamer van het wapen. De verbrandingsgassen die op dat moment vrijkomen oefenen niet enkel druk uit op het projectiel dat wordt afgevuurd, maar ook op de inwendige loopwand en op de kulas. Ten gevolge van de drukkrachten die op de kulas werken, maken de kulas en de loop een achterwaartse beweging, genaamd de terugstootbeweging. Deze fenomenen spelen zich af in het inwendig gedeelte van de ballistiek. Wanneer het projectiel de loop heeft verlaten, heerst er over een bepaalde tijd een niet te verwaarlozen gasdruk op de kulas. Vanaf het moment dat het projectiel de loop verlaat, start het intermediair gedeelte van de ballistiek. De druk tijdens de verbranding gecombineerd met de druk die ontstaat wanneer het projectiel de loop verlaat, vormen samen de resulterende terugstootkracht. Om deze kracht te reduceren zullen de onderzoekers een mondaccessoire ontwikkelen. Dit accessoire bevindt zich in het intermediair gedeelte van de ballistiek. Te dien gevolge zal dit gedeelte voor deze masterproef een belangrijke rol spelen. De drukgolven zullen aan het uiteinde en rondom de omgeving van de loopmond gemeten moeten worden. Met behulp van een meetopstelling zullen de verschillende drukken gemeten en geanalyseerd worden. De drukken die ontstaan in het inwendig gedeelte van de ballistiek zijn reeds opgemeten bij eerdere onderzoeken. De druk fenomenen die zich voordoen bij het intermediair gedeelte zijn totaal onbekend en het zijn net deze drukken die essentieel zijn voor het ontwikkelen van een mondingsrem.

De onderzoeksvraag luidt daarom als volgt: *“Het ontwikkelen en optimaliseren van de drukmetingen in het intermediair gedeelte in het kader van onderzoek naar de terugstootkracht”*.



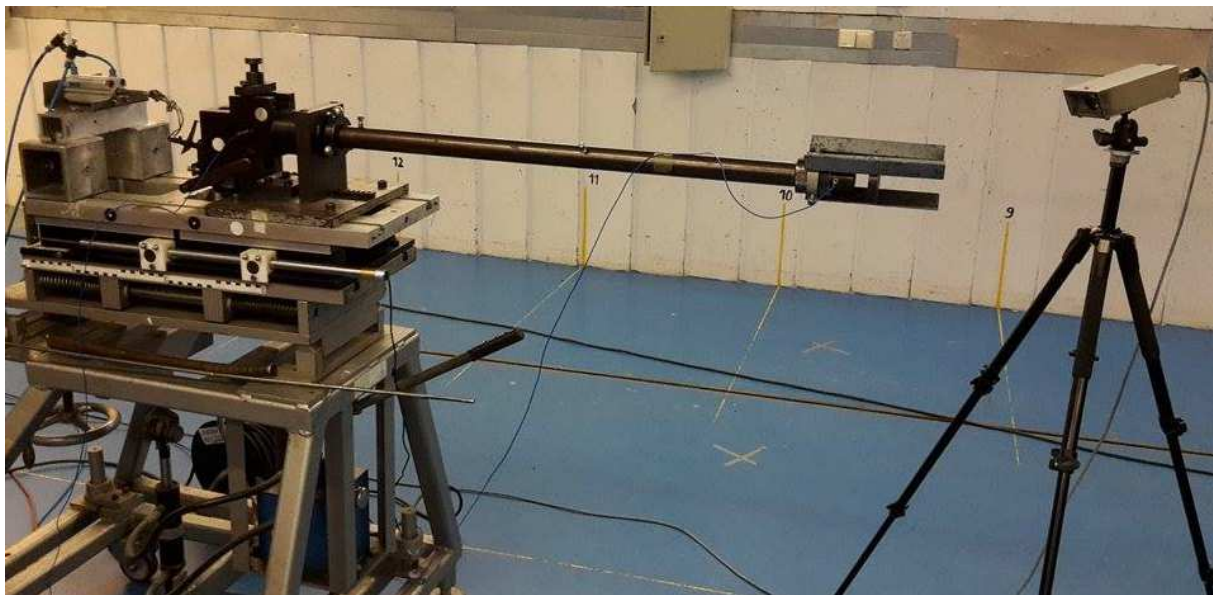
Figuur 1: Werking van de gasdruk in het vuurwapen. [5]

### 1.3 Doelstellingen

De concrete doelstelling bestaat erin de fenomenen te bestuderen die zich voordoen in het intermediair gedeelte van de ballistiek. De drukken rondom en aan het uiteinde van de loopmond zullen hierbij een grote rol spelen. Er zal een totaal nieuwe meetopstelling rond het intermediaire gedeelte ontwikkeld moeten worden om de druk-fenomenen te meten, te filteren en te analyseren. Ten gevolge hiervan zullen de onderzoekers bij ABAL naderhand een mondaccessoire kunnen ontwikkelen op basis van de drukmeetopstelling. De drukverdeling wordt gemeten net achter de loopmond en tevens rond de omgeving van de loopmond. Om de drukken net achter de loopmond te kunnen meten moet er een dispositief worden ontwikkeld waar verschillende schijven op geplaatst kunnen worden. Op deze schijven kunnen vervolgens de druksensoren bevestigd worden. Om rond de omgeving van de loopmond drukken te meten zal er gebruik gemaakt worden van blast-sensoren. Door de meetopstelling telkens te optimaliseren kan er uiteindelijk een drukprofiel worden opgesteld dat de basis vormt voor het ontwerpen van een mondingsrem. Tevens moet de uiteindelijke meetopstelling volledig geautomatiseerd kunnen werken. De data wordt verwerkt, gefilterd en gepresenteerd in de eenheden die zijn afgesproken met de onderzoekers. Het uiteindelijke doel is om een meetopstelling te realiseren die de verschillende drukgolven in het intermediair gedeelte van de ballistiek meet en analyseert. Dit alles diende gerealiseerd te worden gedurende een tijdspanne van 13 weken.

### 1.4 Materiaal en methode

Het herhaaldelijk inklemmen van een machinegeweer is niet eenvoudig en brengt veel problemen met zich mee, zoals bijvoorbeeld kleine discrepanties wat betreft de nauwkeurigheid. Bij het afvuren van een projectiel ontstaan er grote krachten waardoor de positie van het geweer kan wijzigen. Daarom wordt gebruik gemaakt van een proefopstelling met een .50 BMCI (Bloc Manométrique à Canon Interchangeable). Deze opstelling simuleert het machinegeweer .50 en blijft ten allen tijden nauwkeurig ingeklemd. Door de bediening van een drukknop die zich in de operatorzaal bevindt zal het elektro-pneumatisch afvuurmechanisme in werking treden. De slagpin zal inslaan op het slaghoedje, het propulsief kruit zal deflagieren en het projectiel zal afgevuurd worden.



Figuur 2: Meetopstelling met schijfhouder en muzzel flash.

De meetopstelling bestaat uit een dispositief waarop schijven kunnen bevestigd worden. Er worden verschillende schijven ontworpen en het gebruik van deze schijven is afhankelijk van de gebruikte sensoren. In eerste instantie werd aluminium gebruikt voor het ontwikkelen van de schijf. De reden

dat men hiervoor opteert is dat aluminium als voordeel heeft dat het makkelijk bewerkbaar is. De uiteindelijke schijf zal uit een ander soort materiaal bestaan dat robuuster is en tevens beter bestand tegen de warme uitstootgassen. De schijven zijn instelbaar op verschillende afstanden van het uiteinde van de loop. De blast-sensoren zullen de drukken in de omgeving van de loopmond meten. De sensoren moeten echter wel aan een aantal vereisten voldoen. Zo moeten ze nauwkeurig zijn, temperatuur bestendig zijn, een correct meetbereik hebben en speelt vooral de gevoeligheid van de sensoren een belangrijke rol. De gebruikte sensoren zijn speciaal ontwikkeld voor ballistische doeleinden en dus uitermate geschikt.

De fabrikanten van sensoren waar voornamelijk met gewerkt zijn, zijn PCB Piezotronics<sup>®</sup> en Kistler<sup>®</sup>. Afhankelijk van het verloop van het onderzoek zal er gewerkt worden met verschillende types sensoren. De signaalconditionering gebeurt op twee manieren. Dit gebeurt ofwel met landingsversterkers of met spanningsversterkers. Deze eersten zetten het elektrisch geladen signaal van de sensoren om in een spanningssignaal (Volt) terwijl deze laatsten een elektrische spanning omzetten naar een bruikbare spanning. Alle metingen worden verwerkt met het software programma LabVIEW, en de nodige apparatuur voor data-acquisitie is ter beschikking in de Koninklijke Militaire School. De signalen afkomstig van de verschillende sensoren zullen eveneens aan de hand van software gefilterd worden met een Butterworth filter. Met behulp van de Fast Fourier-transformatie zal de juiste afsnijfrequentie van de verschillende signalen bepaald worden.

De terugstoot kan op twee manieren gemeten worden. De eerste methode is door gebruik te maken van de lineair variabele differentiaaltransformator (LVDT) die reeds bevestigd is op de proefopstelling. De tweede methode is het plaatsen van een accelerometer.

Voor de loop wordt een lichtsensor DRELLO MFS 607 geplaatst die de lichtintensiteit meet. Op het ogenblik dat het projectiel de loop verlaat, neemt de intensiteit sterk toe. Wanneer het projectiel de loop verlaten heeft, geeft de sensor een triggerpuls door aan het programma in LabVIEW. Het is vanaf dit moment dat de metingen starten.

De hete uitstroomgassen kunnen waargenomen worden met een hogesnelheidscamera. De gassen verspreiden zich op dezelfde wijze als de drukgolven. Op deze manier kan men de druk fenomenen waarnemen die zich voordoen bij het intermediair gedeelte van de ballistiek, wat het uiteindelijke doel van deze masterproef is.



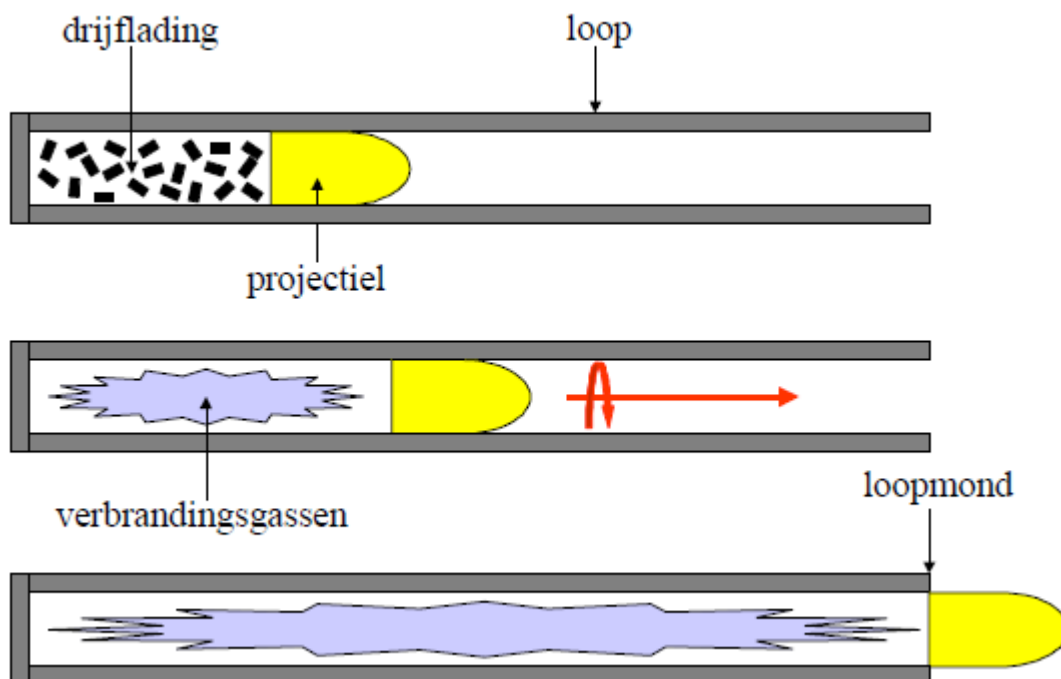
## 2 Grondbeginselen van de ballistiek

### 2.1 Ballistiek

Ballistiek bestudeert de verschijnselen die zich voordoen bij het afvuren van projectielen. Meer bepaald bij het vertrek, de vlucht en de aankomst van het projectiel op doelen. De ballistiek kan onderverdeeld worden in vier grote domeinen: inwendige ballistiek (vertrek), intermediaire ballistiek, uitwendige ballistiek (vlucht) en terminale ballistiek (aankomst). De inwendige ballistische cyclus neemt weinig tijd in beslag, slechts enkele milliseconden.

#### 2.1.1 Inwendige ballistiek

De inwendige ballistiek bestudeert alle verschijnselen die in het vuurwapen plaatsvinden. Vanaf het ogenblik dat de trekker bediend wordt zal de slagpin op het slaghoedje vallen en zal de drijfvlading van het propulsief kruit ontsteken. De verbrandingsgassen die hier zijn vrijgekomen oefenen een druk uit op de bodem van het projectiel. De drukkrachten versnellen op deze wijze het projectiel in de loop. Wanneer het projectiel de loop verlaat stopt de inwendige ballistiek. Er bestaat een relatie tussen druk, volume en temperatuur. Wanneer het volume constant blijft zal de druk bij verbranding van het kruit toenemen. De verbrandingskamer wordt achteraan afgesloten door de kulas en vooraan door het projectiel, wat in het begin een constant volume bepaalt. Op een bepaald ogenblik zal de gasdruk een dergelijke hoge waarde bereiken dat het projectiel een voorwaartse beweging maakt. Het volume zal hierdoor vergroten. Indien het volume constant zou blijven bij een voortdurend stijgende gasdruk, bestaat het gevaar dat de verbrandingskamer uit elkaar spat. Een volumetoename resulteert in een drukafname, maar toch zal de druk blijven stijgen door de intense gasproductie. Even later zal de volumetoename de intensiteit van de gasproductie overwinnen en start de ontspanningsfase, waarbij de druk begint af te nemen. De versnelling is maximaal wanneer de gasdruk maximaal is. Het projectiel zal nog wel versnellen, maar de grootte van de versnelling neemt af. Uiteindelijk zal het projectiel de loop verlaten met een welbepaalde mondsnelheid.[5],[11]



Figuur 3: Inwendige ballistiek [4]

### 2.1.2 Intermediaire ballistiek

In de vorige paragraaf werd beschreven wat er zich afspeelt in het vuurwapen zelf. De volgende fase begint vanaf het moment waarop het projectiel de loop verlaten heeft. Wanneer de bodem van het projectiel het mondingsvlak overschrijdt, wordt het projectiel niet meer geleid door de loop en kan het dus vrij bewegen. Achter het projectiel bevinden zich hete gassen die in aanraking komen met de atmosfeer. Door gebrek aan zuurstof in de loop zal een deel van het kruit pas volledig verbrand worden wanneer het in contact komt met de atmosfeer aangezien hier wel voldoende zuurstof aanwezig is. Dit resulteert in een kleine deflagratie. Het vuurwapen ondervindt hier geen invloed van wat leidt tot het feit dat, in tegenstelling tot het projectiel, de ontploffing een extra versnelling zal veroorzaken. De drukken die bij dit verschijnsel ontstaan zijn voor deze toepassing uiterst belangrijk.[11]



Figuur 4: Intermediaire ballistiek. [11]

### 2.1.3 Uitwendige ballistiek

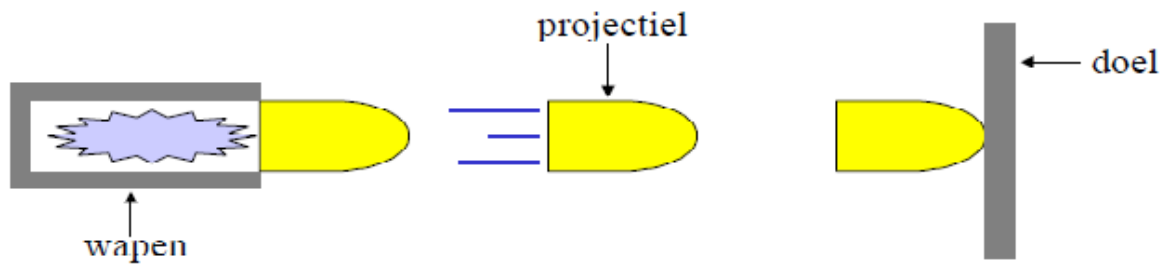
Dit verschijnsel start eveneens wanneer het projectiel de loop verlaat en stopt wanneer het projectiel aankomt op het doel. De uitwendige ballistiek beschrijft de baan die het projectiel aflegt tot het doel. Het projectiel verlaat de loop met een bepaalde initiële snelheid en een bepaalde richting. Tijdens de vlucht is het projectiel onderhevig aan verschillende krachten die inwerken op het oppervlak. De belangrijkste inwerkende krachten zijn: de zwaartekracht en de luchtweerstandskracht.

De zwaartekracht is de eerste kracht die invloed heeft op het projectiel. De zwaartekracht is een gevolg van twee massa's die elkaar aantrekken, in dit geval de aarde en het projectiel. De massa van het projectiel is te verwaarlozen ten opzichte van de massa van de aarde. Het projectiel zal zich in de richting van de aarde bewegen en niet omgekeerd. Men gaat uit van een constante zwaartekracht. In werkelijkheid is dit niet het geval aangezien de zwaartekracht op elke plaats op aarde verschillend is en afhankelijk van de middelpunts-afstanden van grond en projectiel. Maar de verschillen zijn zodanig klein dat ze voor deze toepassing verwaarloosd worden. Beschouwt men de zwaartekracht constant en de massa van de aarde oneindig groot ten opzichte van de massa van het projectiel, dan zal de zwaartekracht voor een constante versnelling zorgen die gericht is naar het middelpunt van de aarde. De valversnelling is  $9,81\text{m/s}^2$ .

De luchtweerstand is de tweede kracht die invloed zal uitoefenen op het projectiel. Wanneer het projectiel zich beweegt in de atmosfeer zal het projectiel invloeden van de atmosfeer zelf ondergaan. Het projectiel ondervindt een weerstand, en deze weerstand zorgt voor een vertraging. Het is moeilijk om via een wiskundige benadering een idee te krijgen in hoeverre het projectiel vertraagd is. Er zijn een aantal factoren die de vertraging bepalen zoals: dichtheid van de atmosfeer, snelheid waarmee het projectiel zich verplaatst, vorm, massa en materiaal waaruit het projectiel vervaardigd is. Een bepaald getal dat gelegen is tussen 0 en 1 geeft de mate weer in hoeverre het projectiel invloed



ondervindt van de luchtweerstand. Dit getal wordt “ballistische coëfficiënt” genoemd of afgekort “BC”. Hoe dichter de waarde van het getal bij 1 ligt, hoe minder invloed het projectiel ondervindt van de luchtweerstand, dus hoe minder snelheid het projectiel verliest.[5],[11]

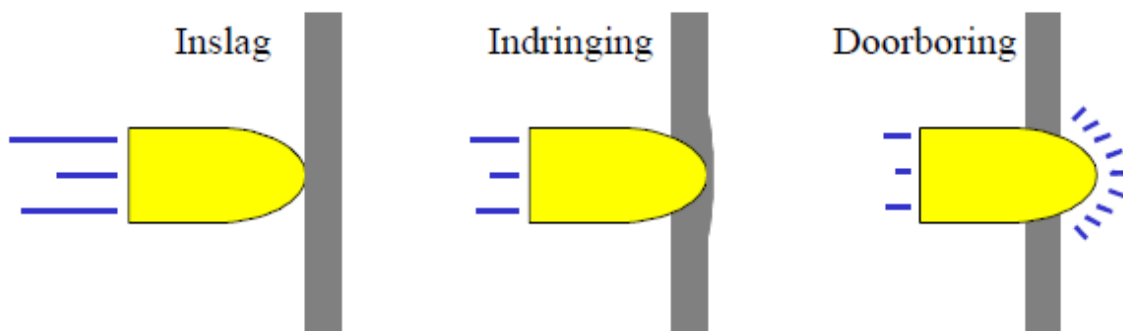


Figuur 5: Uitwendige ballistiek. [4]

#### 2.1.4 Terminale ballistiek

Tot nu toe heeft men de verschijnselen besproken vanaf het moment waarop de schutter het vuurwapen gebruikt tot net voor de impact op een doel. Terminale ballistiek start wanneer het projectiel het doel bereikt heeft. Het projectiel moet een zekere impact hebben op het doel. Deze impact is afhankelijk van de constructie van het projectiel, de resterende snelheid en de invalhoek van het projectiel.

Wordt het vuurwapen gebruikt voor de jacht, dan is het de bedoeling het wild zo snel mogelijk te doden. Projectielen worden dus zodanig geconstrueerd dat ze bij impact het doel doden. Vuurwapens kunnen ook gebruikt worden ter verdediging, meer bepaald voor militaire doeleinden. In deze gevallen is het de bedoeling om de tegenstander uit te schakelen door hem te verwonden. Expansieve projectielen zijn in dit geval ten strengste verboden, alleen volmantel kogels zijn toegelaten voor het verwonden van soldaten. Een derde toepassing waar een vuurwapen gebruikt kan worden, is bij het sportschieten waarbij het projectiel door een kartonnen schrijf gaat.[5],[11]



Figuur 6: Terminale ballistiek. [4]

## 2.2 Vuurwapen

### 2.2.1 Verbrandingskamer

De verbrandingsgassen zullen op de bodem van het projectiel een drukkracht uitoefenen waardoor het projectiel zich verplaatst in de ziel van het vuurwapen. De ruimte waar de drukopbouw van de verbrandingsgassen gerealiseerd wordt noemt men de verbrandingskamer of de brandkamer. Deze kamer is cilindervormig maar kan ook de vorm aannemen van een afgeknotte kegel. Als de munitie langs achteren geladen wordt, zal in vele gevallen de diameter van de verbrandingskamer groter zijn dan de diameter van de ziel. De verhouding tussen beide diameters wordt de chambrage genoemd. Door te werken met een zekere chambrage zal het laden vergemakkelijkt worden. Dit maakt het mogelijk om in de verbrandingskamer met beperkte lengte toch voldoende propulsief kruit te plaatsen. Bij vuurwapens met een chambrage zal de verbindings- of overgangskegel zorgen voor een overgang tussen de verbrandingskamer en de ziel van het wapen. De forcekegel zorgt in het begin van de loop voor de afdichting van de gassen richting de loopmond.[5]

### 2.2.2 Ziel en loop

De drukkrachten zullen het projectiel doen versnellen en, deze versnelling vindt plaats in een schietbuis waarvan de binnenruimte de ziel wordt genoemd. De centrale as van de schietbuis noemt men de zielas. Bij een groot aantal wapens zal de binnenzijde van de schietbuis voorzien zijn van spiraalvormige groeven. De bedoeling hiervan is dat de projectielen niet enkel een translatiebeweging uitvoeren maar ook een rotatiebeweging zodat ze in de lucht gyroscopisch gestabiliseerd kunnen worden. In dit geval spreekt men van een getrokken loop. Een loop zonder groeven noemt men een gladde loop. De diameter van de ziel van een vuurwapen wordt uitgedrukt in kaliber. De ziel-diameter van een vuurwapen 0.50 kaliber is gelijk aan 12,7mm, want 1 duim (inch) is gelijk aan 25,4 mm. Er wordt een onderscheid gemaakt tussen de verschillende kalibers gaande van kleinkalibervuurwapens (kaliber < 20mm), middenkalibervuurwapens (kaliber tussen 20 en 50 mm) tot grootkalibervuurwapens (kaliber > 50 mm).[5]

### 2.2.3 Munitie

De munitie is opgebouwd uit een slaghoedje, het propulsief kruit, het omhulsel en het projectiel. De drijfvlading is het propulsief kruit dat gebruikt wordt om het projectiel voor te stuwten. Er zijn verschillende soorten kruit waarmee dit fenomeen tot stand komt: zwart kruit, rookzwakke kruitsoorten en composieten kruitsoorten. De gebruikte munitie voor dit onderzoek bevat rookzwak kruit. Dit kruit is krachtiger dan het vroeger gebruikte zwart kruit en produceert bijzonder weinig rook (vandaar de benaming). Tevens laat dit kruit weinig residu's achter in de loop waardoor deze minder snel vervuild geraakt. Het kruit bevindt zich in een omhulsel van de munitie, meer bepaald de huls. Het materiaal waaruit het omhulsel is vervaardigd is messing, een legering van koper en zink.[5]



Figuur 7: Munitie .50.

## 2.4 Mondaccessoire

### 2.4.1 Mondingsrem

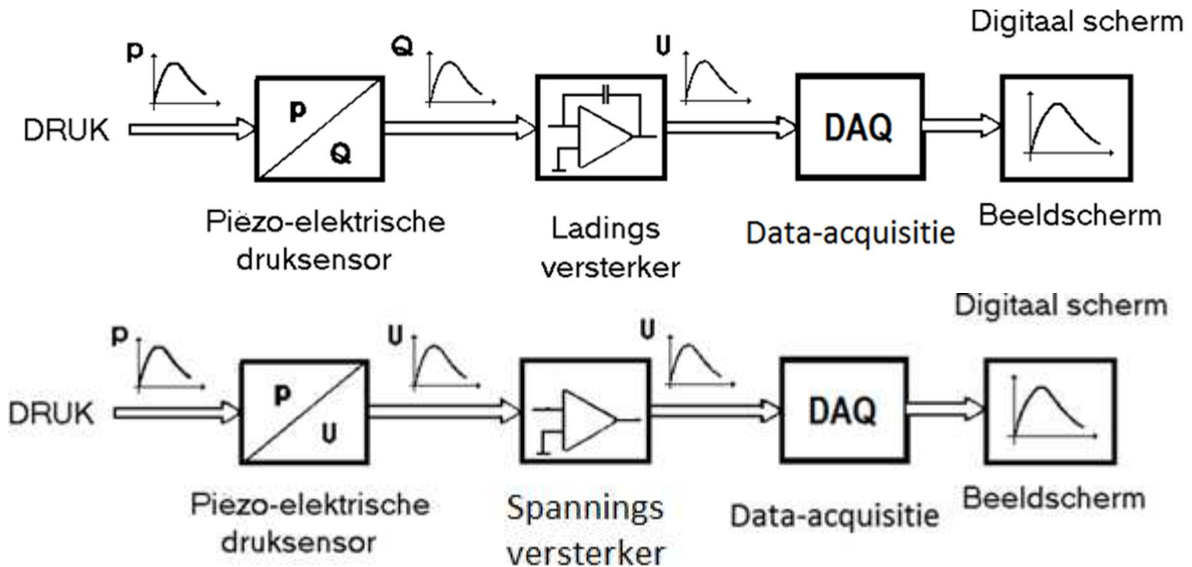
Om de terugloopkracht te bespreken moeten de teruglopende delen terug naar voren gebracht worden. De eerste methode om dit te bewerkstelligen is door gebruik te maken van een veer. Wanneer de teruglooprem onvoldoende arbeid levert om de terugloopenergie op te sloppen omdat bijvoorbeeld de beschikbare teruglooplengte te klein is, wordt de remkracht zodanig groot dat de stabiliteit van het wapen en/of de veiligheid van de schutter in gedrang komen/komt en moet er bijgevolg een andere methode gebruikt worden. Men gaat in dit geval gebruik maken van de mondingsrem. Aan het uiteinde van de loop wordt de mondingsrem bevestigd. De mondingsrem zal de gassen afbuigen in de gewenste richting. Er zijn een aantal openingen voorzien die symmetrisch staan ten opzichte van de zielas. Een stel van tegenoverliggende openingen wordt een trap genoemd. Er zijn een aantal factoren die het rendement van de mondingsrem beïnvloeden zoals bijvoorbeeld de richting, de grootte van de doorstroomopeningen en het aantal trappen. De eerste trap zal het grootste effect hebben op de terugloopenergie. Wanneer het projectiel de loopmond verlaat zal een deel van de verbrandingsgassen doorheen de openingen van de mondingsrem stromen. Hoe de gasstromen zich voortbewegen is afhankelijk van de vorm die de doorstroomopeningen hebben. Door de openingen zal de gasstroom zich in laterale richting verplaatsen of ietwat schuin naar achteren. Dit resulteert in een voorwaarts gerichte kracht die wordt uitgeoefend op de terugloopmassa. Hierdoor zal de terugloopenergie verminderd worden. Er zijn echter ook een aantal nadelen aan de mondingsrem verbonden. De uitstroomgassen zorgen voor een intense drukgolf, en deze kunnen een impact hebben op de omgeving. Wanneer de schutter zich op de grond bevindt kunnen de drukgolven stof doen opwaaien waardoor het zicht op het doel belemmerd wordt. De mondingsrem versterkt het effect van de mondvlam waardoor de positie van de schutter makkelijker kan worden prijsgegeven.[5]



### 3 Meetkring

#### 3.1 Algemene opbouw van een meetsysteem

Het meetsysteem wordt voorgesteld in figuur 8 door een aantal functieblokken. Deze zijn opnemer-omvormer of sensor, de signaalconditionering, de signaalverwerking en de gegevenspresentatie.



Figuur 8: Schematische opbouw van de meetketen.

De opnemer-omvormer of sensor zal de te meten fysische grootte omvormen naar een andere te meten grootte die makkelijk verwerkt kan worden. Onder een fysische grootte verstaat men: temperatuur, druk, niveau,.. Meestal zal deze omgevormd worden naar een elektrische grootte. Er bestaan verschillende soorten opnemers die ingedeeld worden naargelang hun eigenschappen en kenmerken. De opnemers worden ingedeeld op basis van:

- De grootte van de omgevormde fysische grootte zoals druk, debiet, kracht, temperatuur, snelheid, versnelling, licht enz.
- De verschillende meetmethodes: inductief, resistief, piëzo-elektrisch, opto-elektrisch enz.
- De hoeveelheid informatie die wordt doorgestuurd: binaire en één- of tweedimensionale.
- Opnemers worden ingedeeld in twee groepen op basis van de manier waarop ze een niet-elektrisch signaal omvormen naar een elektrisch signaal: actieve en passieve opnemers. Actieve sensoren zijn voelers, deze leveren meestal maar een beperkt vermogen zodat een versterking noodzakelijk is. Passieve sensoren bevatten passieve elementen: zo hebben zowel de condensator, weerstand en spoel een externe bron nodig.[1]

De signaalconditionering zet een niet elektrisch signaal om in een elektrisch signaal van enkele volts dat beter geschikt is voor verdere verwerking. Als signaalconditionering zal hier gebruik gemaakt worden van een ladingsversterker van het merk Kistler type 5011A.

De signaalverwerking zal het uitgangssignaal van de signaalconditionering omvormen naar een signaal dat beter geschikt is voor processturing of voor visualisatie. Een voorbeeld hiervan is een ADC, dit zal een analog signaal omzetten naar een digitaal signaal.

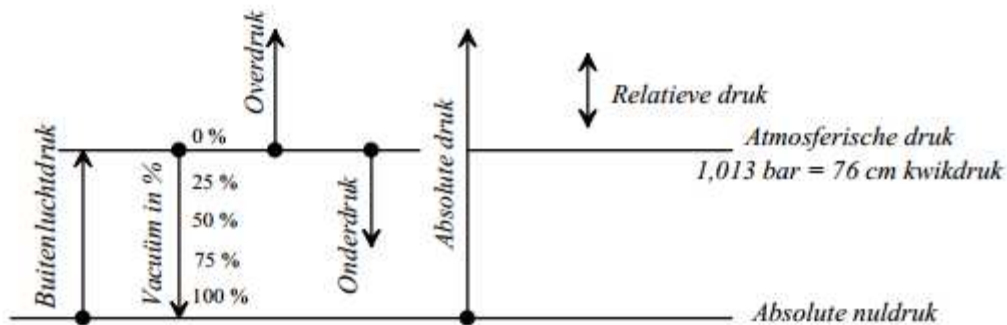
## 3.2 De drukmeting

Onder druk verstaat men “de kracht die inwerkt op een bepaald oppervlak” of in formulevorm:

$$P = \frac{F}{S} \quad (3.1)$$

Met de druk  $P$  in Pa of  $N/m^2$ , de kracht  $F$  in N en het oppervlak  $S$  in  $m^2$ .

Merk op dat de druk op aarde afhankelijk is van de atmosferische druk, elk voorwerp is hieraan onderhevig. De totale druk die inwerkt op een voorwerp is de kracht die op het oppervlak staat opgeteld bij de atmosferische druk die op dat moment aanwezig is. Bij drukmetingen moet dus altijd worden aangegeven t.o.v welke referentie dit gebeurt.[1] De verschillende drukken worden weergegeven in figuur 9:



Figuur 9: De verschillende drukken.[1]

De officiële SI-eenheid van druk is de Pascal:  $Pa = [N/m^2]$ . Er bestaan verschillende andere eenheden van druk, waarvan de meest bekende de “bar” is. Omdat er zoveel verschillende benamingen bestaan wordt in tabel 1 een overzicht gegeven tussen de verschillende eenheden:

	Pa	bar	atm	Torr	kg/cm <sup>2</sup>	PSI
Pa	1	E-5	9,87.E-6	0,01	1,02.E-5	14,5.E-5
bar	E5	1	0,99	750,06	1,02	14,50
atm	101325,00	1,01	1	760,00	1,03	14,70
Torr	133,32	1,33.E-3	0,0013	1	0,00	0,02
kg/cm <sup>2</sup>	0,98.E5	0,98	0,9679	735,60	1	14,22
PSI	6894,60	0,07	0,07	51,72	0,07	1,00

Tabel 1: Verschillende eenheden en hun omzettingen.

Er zijn verschillende methodes om drukken te meten. Een klein overzicht van de verschillende methodes:

- Elastische vervormingsopnemer:
  - Bourdon-veer
  - Balg
  - Membraan
- Piëzo-elektrische opnemer
- Piëzo-resistieve opnemer
- Capacitieve drukopnemer

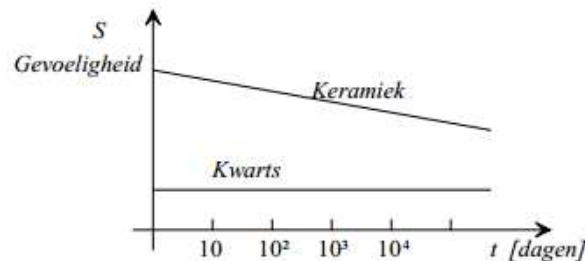
### 3.2.1 Piëzo-elektrische sensoren

Piëzo-elektrische sensoren kunnen worden gebruikt bij het meten van drukken en krachten. Met een geijkte massa kan deze sensor als compressie-accelerometer worden gebruikt, dit bijvoorbeeld om airbags te activeren.

Deze sensoren werken via het piëzo-elektrisch effect. Materialen die dit effect vertonen produceren een oppervlaktelading bij vervorming ten gevolge van een kracht, in dit geval een drukkracht. Er bestaan drie grote groepen piëzo-elektrische materialen:

- Natuurlijke piëzo-elektrische materialen: bv. kwarts
- Keramische materialen: bv. bariumtitaanaat
- Polymeren: bv. PVDF

De keramische materialen en de polymeren worden kunstmatig piëzo- elektrisch gemaakt door ze een bepaalde tijd bij hoge temperatuur bloot te stellen aan een sterk elektrisch veld. Het materiaal blijft na afkoeling gepolariseerd en vertoont piëzo-elektrische eigenschappen. Het nadeel van de gepoolde materialen is dat de piëzo-elektrische gevoeligheid na verloop van tijd. Uit figuur 10 kan men afleiden dat het verval negatief exponentieel verloopt.[1]



Figuur 10: Afname van de piëzo-elektrische gevoeligheid.

#### 3.2.1.1 Het piëzo-elektrisch effect

Wanneer er een kracht op het kristal inwerkt, zullen de kristalatomen in het kristalrooster van plaats veranderen. De symmetrie van het kristalrooster wordt verbroken en hierdoor genereert de asymmetrie een elektrische spanning.

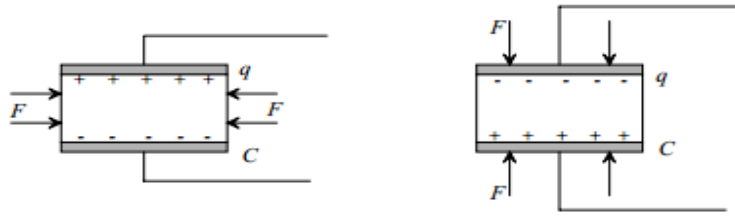
$$x = \frac{1}{k} * F \quad (3.2)$$

Met x de plaatsing in m, k de stijfheid in N/m en F de kracht in N

Aangezien er een vervorming plaatsvindt zal er een lading q op het kristal ontstaan die evenredig is met de verplaatsing x:

$$q = K * x = \frac{K}{k} * F = S * F \quad (3.3)$$

Met q de elektrische lading in C, K het kristal, k de stijfheid in N/m en F de kracht in N.



Figuur 11: Principiële voorstelling van het kristal.[1]

Een piëzo-elektrische sensor kan vergeleken worden met een massa-veer-demper systeem. Dit geeft volgende wiskundige vergelijking:

$$F(t) = m * \frac{d^2x(t)}{dt^2} + b * \frac{dx(t)}{dt} + k * x(t) \quad (3.4)$$

Met m de massa in kg, b de dempingscoëfficiënt Ns/m en k de veerconstante in N/m.

Door op deze vergelijking de Laplace-transformatie toe te passen wordt dit de transferfunctie:

$$F(p) = (m * p^2 + b * p + k) * X(p) \quad (3.5)$$

$$TF = \frac{X(p)}{F(p)} = \frac{1}{m * p^2 + b * p + k} \quad (3.6)$$

De noemer heeft twee als grootste macht, dit is een tweede-ordessysteem.

De relatie tussen de verplaatsing x en de kracht F kan dynamisch voorgesteld worden door een tweede-ordessysteem:

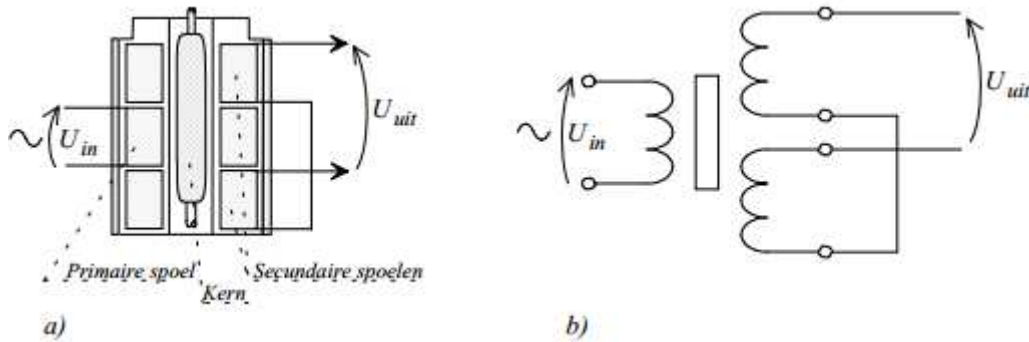
$$\frac{X(p)}{F(p)} = \frac{1/k}{\frac{1}{\omega n^2} p^2 + \frac{2\zeta}{\omega n} p + 1} \quad (3.7)$$

Waarbij  $\omega n = 2 * \pi * f n \gg \gg \zeta$



### 3.4 De lineair variabele differentiaal-transformator

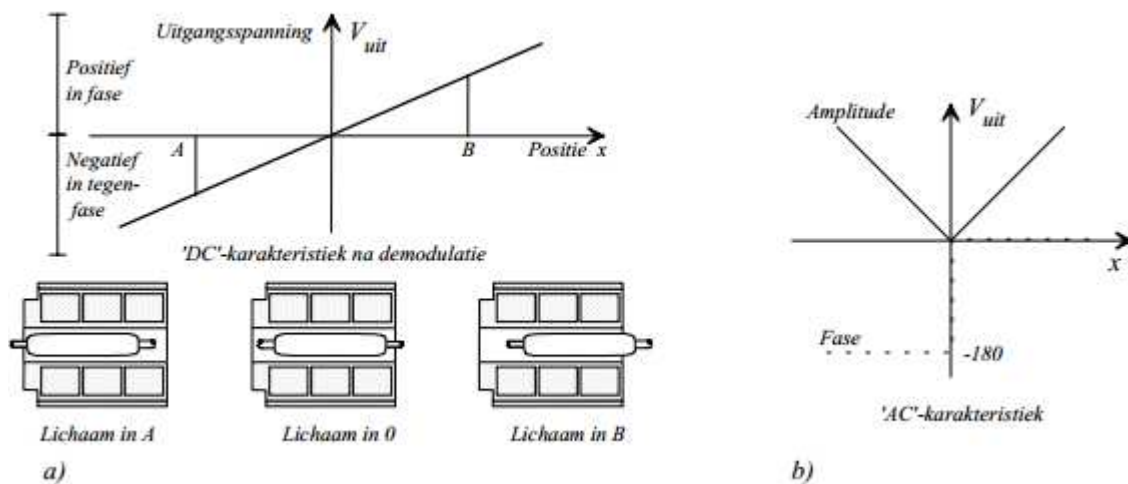
De lineair variabele differentiaal-transformator of kortweg de LVDT is een inductieve sensor die een lineaire verplaatsing omzet in een elektrisch signaal. De LVDT is opgebouwd uit een bijzonder beweegbare staafvormige kern die axiaal kan verschuiven in een holle cilinder. De holle cilinder is voorzien van drie spoelen die op gelijke afstand van elkaar liggen. De kern beïnvloedt de weerstand van de opgewekte magnetische flux tussen de spoelen.



Figuur 12: a) De opbouw en b) principe schakeling van de LVDT. [1]

De primaire spoel bevindt zich in het midden van de holle cilinder en wordt gevoed door een wisselspanning. In de twee buitenste of secundaire spoelen wordt een spanning geïnduceerd, de spoelen zijn in serie en in oppositie met elkaar verbonden zodat de twee spanningen in tegenfase zijn. Het verschil van deze twee spanningen geeft de netto-uitgangsspanning. Als de kern zich in het midden van de cilinder bevindt zal de uitgangsspanning nul zijn. Dit noemt men de nulstand of het evenwichtspunt van de LVDT.

Wanneer de kern zich verplaatst in de cilinder zal de geïnduceerde spanning in de spoel, waarnaar de kern zich beweegt, verhogen, terwijl de spanning over de andere secundaire spoel net verlaagt. Het verschil tussen deze twee spanningen resulteert in de uitgangsspanning en wordt de differentiaalspanning genoemd. Deze verandert lineair met de stand van de kern. De gevoeligheid van de LVDT wordt uitgedrukt in V/m.[1]



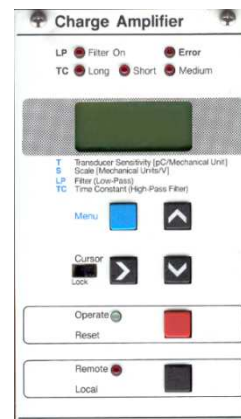
Figuur 13: De 'DC' en 'AC' overdrachtskarakteristiek bij een LVDT.[1]

De LVDT meet de teruglooptijd van de .50. Het merk dat gebruikt wordt is RDP electronics type ACT6000.

## 3.5 Signaalconditionering en signaalversterking

### 3.5.1 Ladingsversterker Kistler type 5011

Deze ladingsversterker zal de opgewekte lading afkomstig van de sensor omvormen naar een bruikbare spanning. Deze spanning wordt verwerkt met behulp van LabVIEW. Vier parameters kunnen ingesteld worden via de ladingsversterker: de gevoeligheid van de sensor uitgedrukt in [pC/bar]; de tijdsschaal; de laagdoorlaatfilter en de hoogdoorlaatfilter. Door op de menu knop te drukken kunnen de verschillende parameters geselecteerd worden. Via de pijltjes kunnen de juiste parameters ingesteld worden. Wanneer de metingen effectief van start gaan moet de “operate” knop ingedrukt worden, waarbij de groene led zal branden.



Figuur 14: Kistler type 5011 [8]

### 3.5.2 PCB piezotronics model 482 c series

Deze signaal conditioneereenheid zal het spanningssignaal afkomstig van de sensor omvormen naar een bruikbare spanning. Hier moeten verder geen parameters worden ingesteld. Er wordt gewerkt met twee types: één die frequenties doorlaat tot 0,2MHz en een andere die frequenties doorlaat tot 1MHz. De blast-pencils worden aangesloten op de conditioneereenheid die frequenties doorlaat tot 1MHz waarbij alle hogere frequenties weg worden gefilterd. De andere druksensoren worden aangesloten op de eenheid die frequenties tot 0.2MHz doorlaat.



Figuur 15: PCB piëzotronics model 482C [14]

### 3.5.3 Data-acquisitie

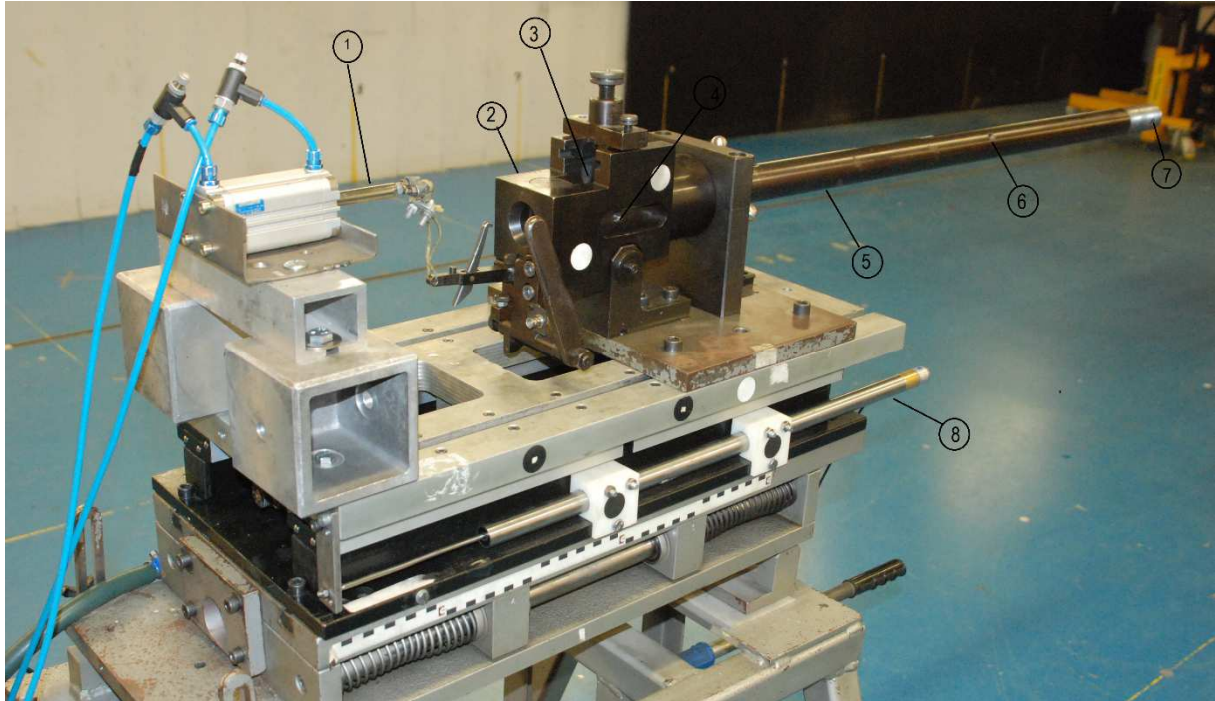
Data-acquisitie is een proces voor het meten van fysische of elektrische verschijnselen door gebruik te maken van een computer. Het voordeel van dit meetsysteem t.o.v. een traditioneel meetsysteem is de rekenkracht en de productiviteit. Het is echter wel duurder dan een traditioneel meetsysteem. Het meetsysteem dat men gebruikt is de NI PXIe-1075. Dit meetsysteem is voorzien van acht kanalen.



Figuur 16: NI PXIe-1075.



## 4 BMCI meetopstelling



Figuur 17: BMCI opstelling .50.

Uit veiligheidsoverwegingen zal de bediening van het wapen gebeuren met een elektro-pneumatisch afvuurmechanisme (1). Dit laat toe dat de operator het wapen kan bedienen vanuit de controlezaal. Het voordeel hiervan is dat de bediening gebeurt op een veilige afstand en gelijktijdig kan de meetketen bestudeerd worden. De cilinder zal een ingaande beweging maken, de trekker zal bediend worden en zal de slagpin op het slaghoedje impacteren, waarna de drijfvlading van het propulsief kruit zal ontsteken. De verbrandingsgassen die hier zijn vrijgekomen oefenen een druk uit op de bodem van het projectiel. De drukkrachten versnellen het projectiel in de loop. Er worden verschillende drukken gemeten: de kamerdruk (4) en de kraagdruk die op twee posities gemeten kan worden ofwel langs de zijkant (2) ofwel langs boven (3). De kraagdruk wordt telkens gemeten langs de zijkant (2), hierdoor moet de bovenzijde (3) afgesloten worden met een spie. In de loop zelf zijn drie boringen voorzien om de druk te meten: loop1 (5), loop2 (6) en loop3 (7). De LVDT (8) zal de terugloopafstand meten. Er worden telkens drie metingen uitgevoerd bij dezelfde opstelling om noemenswaardige variaties vast te stellen.

Wanneer het projectiel de loop heeft verlaten zal dit na enkele milliseconden inslaan op het doel. De metalen bak is aan de voorkant voorzien van een rubberen plaat en is geheel gevuld met zand. Dit zal het projectiel opvangen.

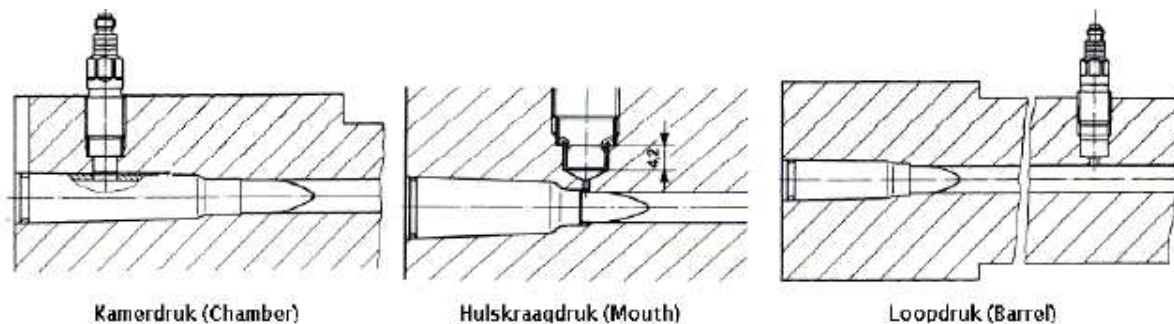


Figuur 18: Zandbak.



## 5 Drukmetingen inwendige ballistiek

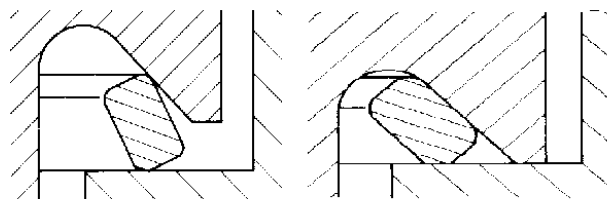
De drukken die zich ontwikkelen in de inwendige ballistiek (in het vuurwapen zelf) zijn reeds bestudeerd in voorgaande onderzoeken. Dit zal even kort besproken worden om zo een totaalbeeld te krijgen. Bij de inwendige ballistiek kent men al de fenomenen die zich kunnen voordoen. Tevens weet men dat de gemeten waardes correct zijn. Het is dus zeer nuttig om deze metingen in het achterhoofd te houden. Op deze wijze kan men nadien de bekomen resultaten van de metingen rond de loopmond vergelijken met de metingen die eerder onderzocht zijn om zo foute meetresultaten te elimineren. Dit vergemakkelijkt ook de analyse van de nieuwe metingen. De meetpunten voor druk in de inwendige ballistiek zijn: de kamerdruk, de kraagdruk, en de drukken in de loop. De drukken in de loop worden onderverdeeld in: tupe1, tupe2 en tupe3. Om de druk in de kamer te meten zal er een boring in de munitie moeten aangebracht worden. De boring wordt nadien afgedicht met een speciale folie die hittebestendig is. De munitie moet zodanig in de kamer geplaatst worden dat het gaatje overeenkomt met de sensor. De kraagdruk kan gemeten worden op twee verschillende manieren. De eerste methode is door gebruik te maken van het aambeeld: hier kan de druk gemeten worden via een koperen cilinder. Deze methode gaan wij niet gebruiken. De koperen cilinder zal vervangen worden door een spie die zorgt voor de afdichting. De tweede methode is door gebruik te maken van een druksensor, zoals bij de kamerdruk. De druk in de loop wordt ook gemeten met een druksensor. Alle druksensoren worden aangedraaid met een koppel van 10 Nm. De kamerdruk en de mondingsdruk zijn voor de nieuwe meetopstelling van belang. De andere druksmetingen zullen worden afgedicht met een sensor dummy.



Figuur 19: Mogelijke plaatsen voor een druksmetingen in het vuurwapen.[4]

### 5.1 Opbouw van de sensoren

De sensoren die gebruikt worden voor ballistische doeleinden zijn speciaal ontwikkeld door de fabrikant. Aangezien de drukken kunnen oplopen tot enkele honderden MPa heeft dit tot gevolg dat er een grote belasting op het oppervlak van de sensor komt te staan. De kans bestaat dat de sensor na enkele metingen beschadigd wordt, wat foute meetresultaten kan opleveren of zelfs kan leiden tot het volledig stuk gaan van de sensor. De speciaal ontwikkelde sensoren moeten tevens bestand zijn tegen hoge temperaturen afkomstig van de deflagratie. Om een nauwkeurige en optimale meting te garanderen moeten de sensoren langs de voorzijde afgedicht worden met een o-ring. Wanneer er een druk op de o-ring komt te staan zal de o-ring vervormen. Deze plastische vervorming zorgt voor de afdichting.

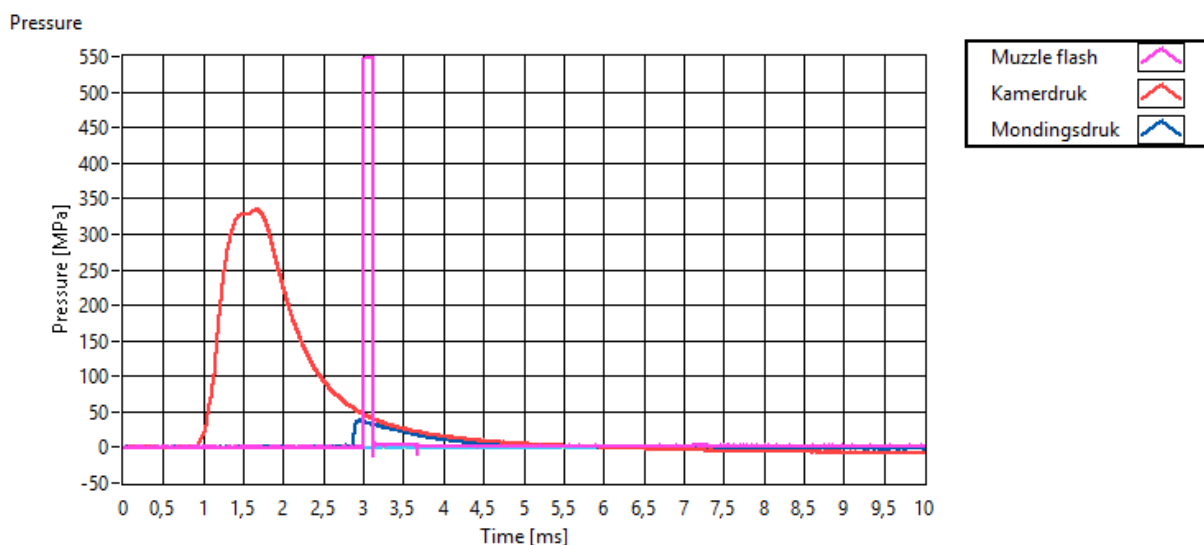


Figuur 20: Doorsnede van een afdichting met een o-ring.

## 5.2 Meetresultaten van de inwendige ballistiek

Men vertrekt vanuit de inwendige ballistiek. Hierbij zijn kamer- en mondingsdruk belangrijk voor de verder ontwikkeling van de drukmeetopstelling rondom de loopmond (intermediaire ballistiek). Daarnaast is de LVDT ook aangesloten op het laatste kanaal. Wanneer de slagpin aanslaat op het slaghoedje zal de druk in de kamer in een paar milliseconden toenemen tot 330MPa. Van zodra het projectiel zich in staat van beweging bevindt, zal het volume in de kamer toenemen waardoor de druk daalt. Als het projectiel zich nog net in de loop bevindt, wordt de mondingsdruk gemeten. De druk in de loop is gedaald tot 40 MPa en op hetzelfde tijdstip is de druk in de kamer afgenomen tot 50 MPa.

Wanneer het projectiel de loop verlaat zal de lichtintensiteit sterk toenemen. De muzzel flash zal dit detecteren en een triggerpuls uitsturen doordat er achter de het projectiel hete gassen bevinden die in aanraking komen met de atmosfeer. Door gebrek aan zuurstof in de loop zal een deel van het kruit pas volledig verbrand worden wanneer het in contact komt met de atmosfeer waar er wel voldoende zuurstof aanwezig is. Dit resulteert in een kleine deflagratie. Op dat moment stopt de inwendige ballistiek en start de intermediaire ballistiek. Van dit fenomeen heeft men nog geen drukmetingen.

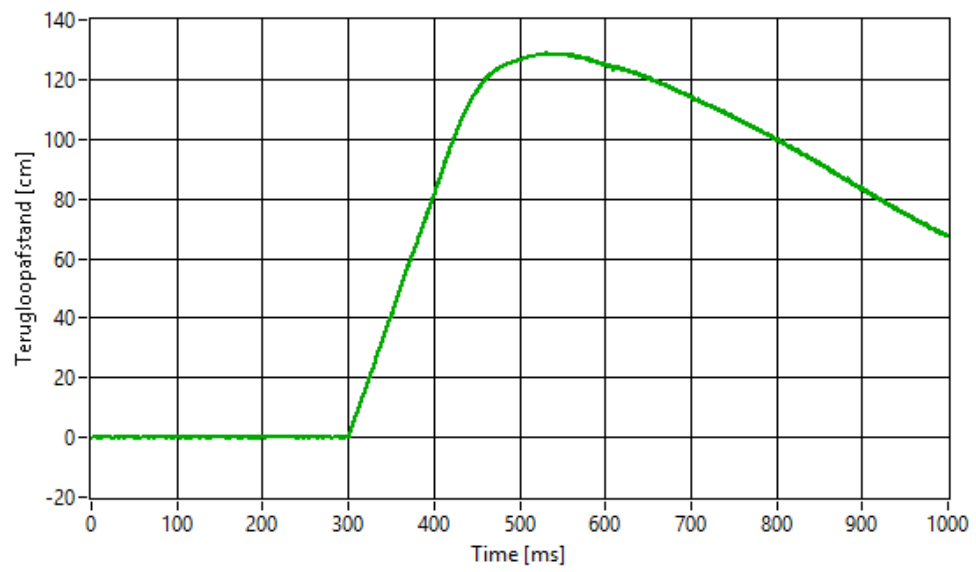


Figuur 21: De gemeten drukken bij de inwendige ballistiek.

Vanaf het moment waarop het projectiel de loop verlaat, start de terugloopbeweging. De teruglooptijd zal bepaald worden aan de hand van de LVDT. De LVDT is aangesloten op het laatste kanaal, kanaal 7. Dit kanaal is ingesteld op een sample frequentie van 10 000 Hz waardoor de teruglooptijd wordt weergegeven op een andere tijdschaal als de drukmeting in de kamer en loop. Om de terugloopbeweging duidelijk weer te geven is een andere tijdschaal nodig aangezien dit fenomeen plaatsvindt op enkele milliseconden. Bijgevolg zou men onmogelijk het hele signaal kunnen waarnemen indien dezelfde tijdschaal zou toepast worden.



LVDT



Figuur 22: De terugloopbeweging bij meting van de inwendige ballistiek.



## 6 Drukmetingen intermediaire ballistiek

De fenomenen die bij dit gedeelte van de ballistiek een grote rol spelen zijn de herontvlaming van het niet-verbrande propulsief kruit (de hete gassen), de schokken en het geluid dat ontstaan wanneer het projectiel de loop heeft verlaten. Al deze fenomenen hebben een invloed op de vorm en de grootte van de drukken wanneer het projectiel de loop verlaat en net dit maakt de druksmetingen tijdens de intermediaire ballistiek zo moeilijk.

Deze paragraaf bespreekt kort wat er gebeurt bij de intermediaire ballistiek. De gasstroom aan de loopmond is een fenomeen dat ontstaat in verschillende fases. De eerste fase bestaat uit de precursorstromen. Deze stromen ontstaan doordat het versnelde projectiel de lucht ervoor in de loop samendrukt en vooruit stuwt. Dit resulteert in schokgolven die zich verplaatsen doorheen de loop. Aan het uiteinde van de loopmond komt de precursorschok tot stand en wanneer deze schokgolf de loopmond verlaat treedt er een expansie op in de vrije ruimte. Afhankelijk van de lengte en de snelheid van het projectiel kunnen er twee precursorschokgolven waargenomen worden. Onmiddellijk na de precursorschokgolven volgt een klein deel van de propulsieve gassen die het projectiel vooraf gaan door lekkage. Nadien volgt het overgrote deel van de propulsieve gassen die zich achter het projectiel bevinden. Deze gassen kunnen bij uittreden van de loopmond niet vrij expanderen in de ruimte omdat de precursorschokgolven hier nog aanwezig zijn. Dit zorgt voor een opstapeling van gassen rond de loopmond en zo wordt er hier een gasbol gecreëerd. Door de verwijding van de schokgolven aan de loopmond kunnen de verbrandingsgassen vrij expanderen. Vervolgens gaan de onverbrande kruitresten herontvlammen en ontstaat er een bijkomend drukfront. Deze herontvlaming veroorzaakt ook een bijkomende vlam bovenop het gloeiende gas. Deze fenomenen hebben ook een invloed op de stabiliteit van het projectiel. Het projectiel gaat van een geleid milieu (loop) naar een niet-geleid milieu en zal door deze fenomenen een bijkomende impuls ondergaan wat de stabiliteit van het projectiel verstoort.[7]

### 6.1 Meetopstelling met het dispositief

Om de drukken in de intermediaire ballistiek te kunnen meten zal er een dispositief ontwikkeld moeten worden waarop druksensoren kunnen worden bevestigd. Het dispositief bestaat uit twee schijven met dezelfde uitwendige diameter. De binnendiameter van één schijf (boring) is quasi hetzelfde als de buitendiameter van de loop (cilinder). Door de schijf over de loop te schuiven ontstaat er een losse passing. De bedoeling is om klemming te bekomen tussen de schijf en loop. Men weet dat de loop voorzien is van schroefdraad. Door gebruik te maken van een contraoer kan men een klemming realiseren tussen de schijf en loop.

Op de andere schijf moeten de sensoren worden bevestigd. Men weet dat de buitendiameters (cilinder) van beide schijven gelijk moeten zijn. De binnendiameter van deze schijf (boring) moet iets groter zijn dan de binnendiameter van de loop (kaliber).

De zijkanten van de beide schijven worden voorzien van drie boringen die telkens 45° van elkaar staan. De boringen worden nadien voorzien van inwendige schroefdraad. In drie L-ijzers worden vanaf de linkerkant over dezelfde afstand boringen aangebracht. Deze drie L-ijzers worden via schroeven verbonden met de schijf die zich op de loop bevindt. Door nu de L-ijzers langs de rechter kant te voorzien van boringen kan de schijf waarop de sensoren bevestigd worden eveneens verbonden worden met behulp van schroeven. De uitlijning tussen de zijkanten en het middelpunt van de schijf kan zeer vlot verlopen omdat beide schijven dezelfde buitendiameter hebben. Zo wordt er één geheel ontwikkeld dat robuust is en redelijk eenvoudig kan worden gedemonteerd of gemonteerd. Het dispositief kan verder geoptimaliseerd worden door de drie L-ijzers te voorzien van meerdere boringen. Zo ontstaat er een variabele afstand tussen de loopmond en de schijf met de druksensoren.

### 6.1.1 Ontwerpen van de schijf waar de sensoren worden bevestigd

Een aantal van de afmetingen waaraan de schijf moet voldoen kent men. Zo zijn er de buiten- en binnendiameter en de drie boringen aan de zijkant. Men weet dat de maximale druk die rond de loopmond ontstaat kleiner zal zijn dan 50MPa en waarschijnlijk een stuk kleiner omdat het volume waarop de drukkrachten inwerken ettelijke malen groter is.

Druksensoren kunnen op twee manieren geplaatst worden, ofwel met een uitsparing ofwel worden ze gewoon ingebouwd. Welke methode wanneer wordt toegepast is afhankelijk van de specifieke toepassing. Voor metingen waar de drukopbouw en temperatuur hoog is, zoals bij de inwendige ballistiek zal er gekozen worden om te werken met een uitsparing. Hierbij wordt het diafragma van de sensor beter beschermd tegen de hoge temperaturen afkomstig van de deflagratie, wat de levensduur verlengt en de kans op meetfouten vermindert. Nadelig aan dit principe is dat door de uitsparing een dood volume ontstaat, die “pijposcillaties” met zich meebrengt.



Figuur 23: Met uitsparing (Recessed mount) [13]

Wanneer een druksensor ingebouwd wordt, is het diafragma verzonken in de kamer of in dit geval de schijf. Wanneer dit principe gebruikt wordt bij het meten van de inwendige ballistiek zal de levensduur van de sensor aanzienlijk dalen. Bij de intermediaire ballistiek zijn de drukken en temperatuur een stuk lager waardoor hier wel gewerkt kan worden met een ingebouwde sensor. Doordat er geen ruimte is tussen het diafragma en de meting zullen hier geen “pijposcillaties” optreden wat de kans op meetfouten vermindert.



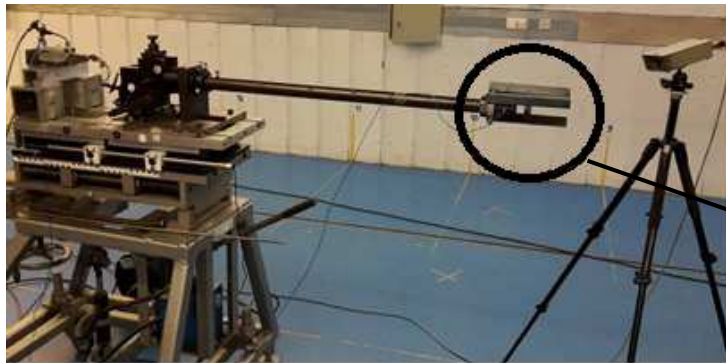
Figuur 24: Zonder uitsparing (Flush mount) [13]

De drukkrachten die inwerken op de schijf moeten nu bepaald worden. Drie dezelfde sensoren (PCB piezotronics model M109C12) zijn hier toegepast. Deze worden om de 120° van elkaar geplaatst zodat de drie meetpunten gelijkmatig verdeeld zijn over de schijf. Om nu de sensoren te bevestigen op de schijven moeten er boringen voorzien worden met inwendige schroefdraad. De behuizing van de sensoren moet zeer nauwkeurig zijn. Wanneer het diafragma maar een klein stukje voorbij de behuizing komt zal de kans op beschadiging van de sensor toenemen. Er worden een aantal schijven ontworpen waarbij de afstand tussen het middelpunt van de schijf en sensor wijzigt. De eerste meting zal gebeuren waarbij de onderlinge afstand tussen het middelpunt van de schijf en sensor het grootste is. De drukken die hier inwerken zouden kleiner moeten zijn dan wanneer de sensoren dichter bij het middelpunt van de schijf staan. Zo is er meer controle opdat de sensoren niet beschadigd geraken.

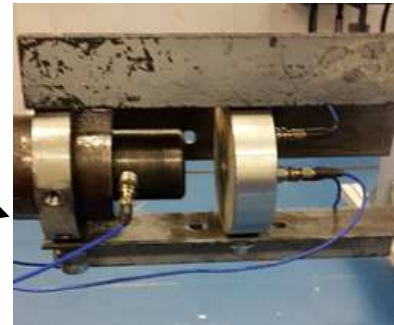


Figuur 25: Sensorhouders voor M109C12.

### 6.1.2 De opstelling



Figuur 27: Meetopstelling met dispositief.



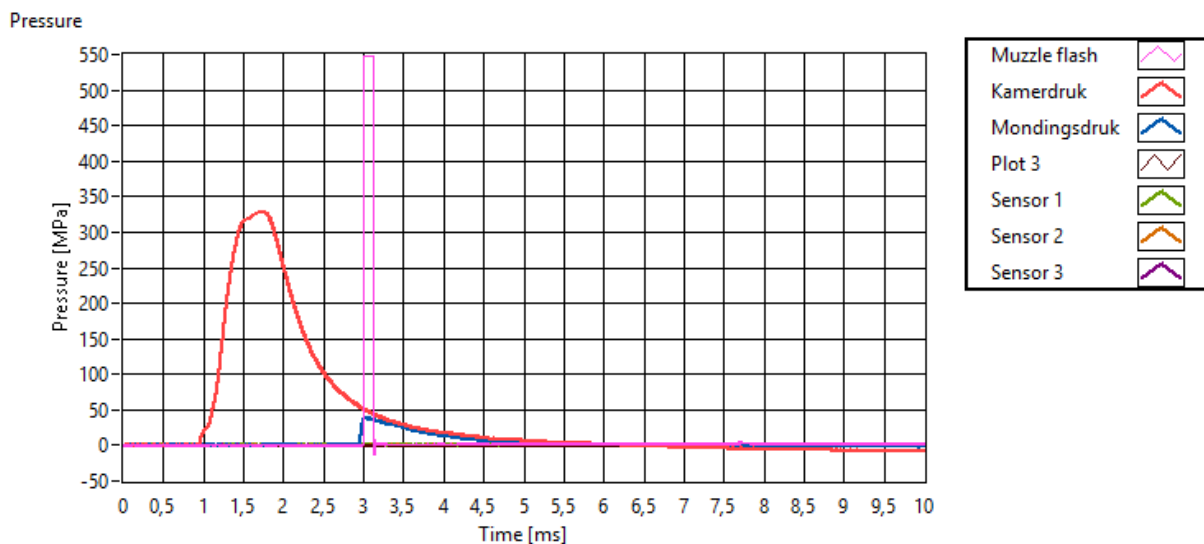
Figuur 26: Dispositief.

Het dispositief is gemonteerd op de loop van de .50. De wijze waarop de sensoren op de schijf bevestigd zijn is ideaal. Het diafragma van de sensoren is verzonken in de schijf alleen. Dit zal worden blootgesteld aan de temperaturen en drukken. De aansluitingen van de sensor en de bekabeling ervan bevinden zich achter de schijf, wat een goede bescherming biedt.

De kanalen waarop meetopnemers zijn aangesloten worden in bijlage B weergegeven. In totaal beschikt de PXI over acht kanalen. Bij deze meting is enkel kanaal drie niet aangesloten. De meetopnemers meten: de lichtintensiteit, de kamerdruk, de mondingsdruk, de druk op de schijf en de terugloopte.

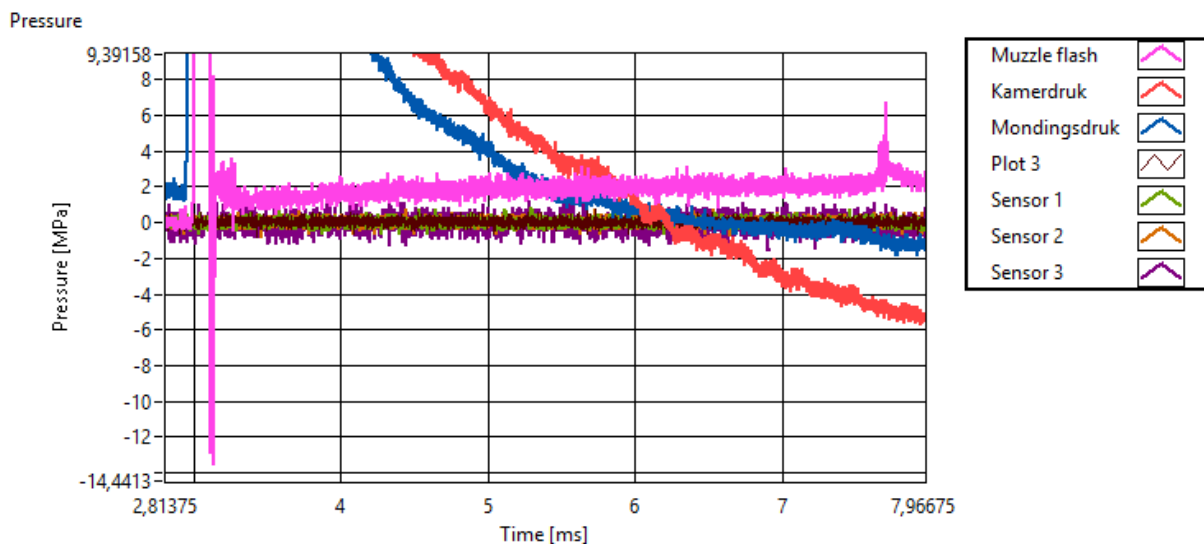
De parameterinstellingen voor de ladingsversterkers zijn voor de kamerdruk en de mondingsdruk hetzelfde gebleven als bij voorgaande meting. Deze instelling zijn terug te vinden zie bijlage C.

De afstand tussen de loopmond en schijf is bij deze meting 21mm. De gebruikte schijf heeft een onderlinge afstand van 19,7 mm (vanaf het middelpunt van de sensoren tot het middelpunt van de schijf).



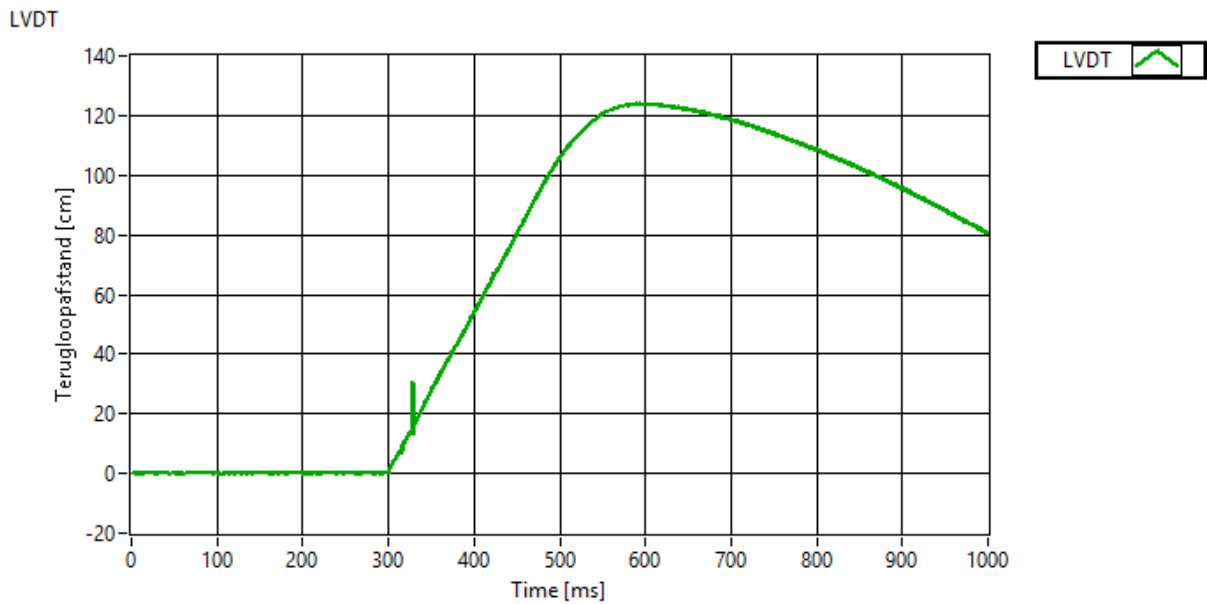
Figuur 28: De gemeten drukken bij meetopstelling met dispositief.

De kamerdruk en mondingsdruk zijn duidelijk zichtbaar. De drukken die ontstaan bij het intermediaire gedeelte van de ballistiek worden op het eerste zicht niet waargenomen. De drukken zijn misschien zo klein dat ze op figuur 28 niet duidelijk zichtbaar zijn. Daarom zal men het gedeelte waar de intermediaire ballistiek normaal plaatsvindt vergroten.



Figuur 29: De gemeten drukken bij meetopstelling met dispositief weergegeven vanaf de tussen ballistiek.

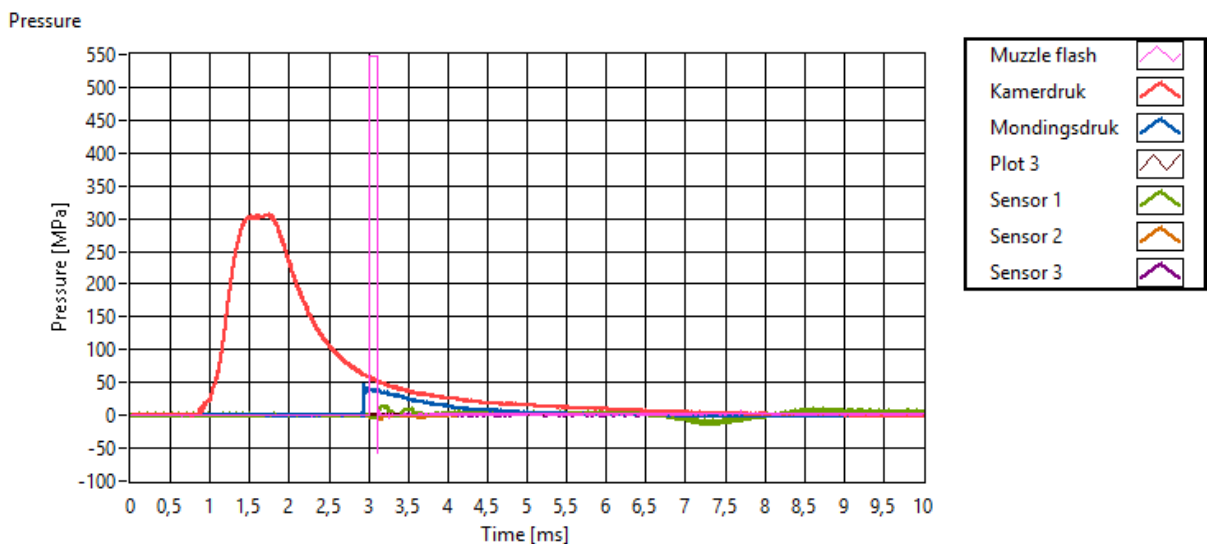
De sensoren die bevestigd zijn op de schijf meten duidelijk geen drukverandering. Dit kan te wijten zijn aan een aantal mogelijke oorzaken: de sensoren zijn stuk of de gevoeligheid van de sensoren is niet voldoende voor deze afstand. Uit figuur 30 blijkt dat de terugloopbeweging door een schijf te plaatsen achter de loop wel vermindert. Bij figuur 22 bereikt de LVDT zijn maximale verplaatsing op 500 ms, bij figuur 30 is dit pas na 600 ms. Ook hier is de tijdschaal van de LVDT t.o.v. de gemeten drukken aangepast.



Figuur 30: De terugloopbeweging bij meetopstelling met dispositief.

Bij voorgaande meting heeft men gekozen voor de schijf waarvan de onderlinge afstand tussen het middelpunt van de schijf en de sensor 19,7 mm bedraagt. Nu gaat men een nieuwe schijf gebruiken waarvan de onderlinge afstand 14,7mm bedraagt, dit is tevens de kleinste tussenafstand. Kleiner kunnen we niet gaan want dan zou dit de kans vergroten dat het projectiel de sensoren beschadigt.

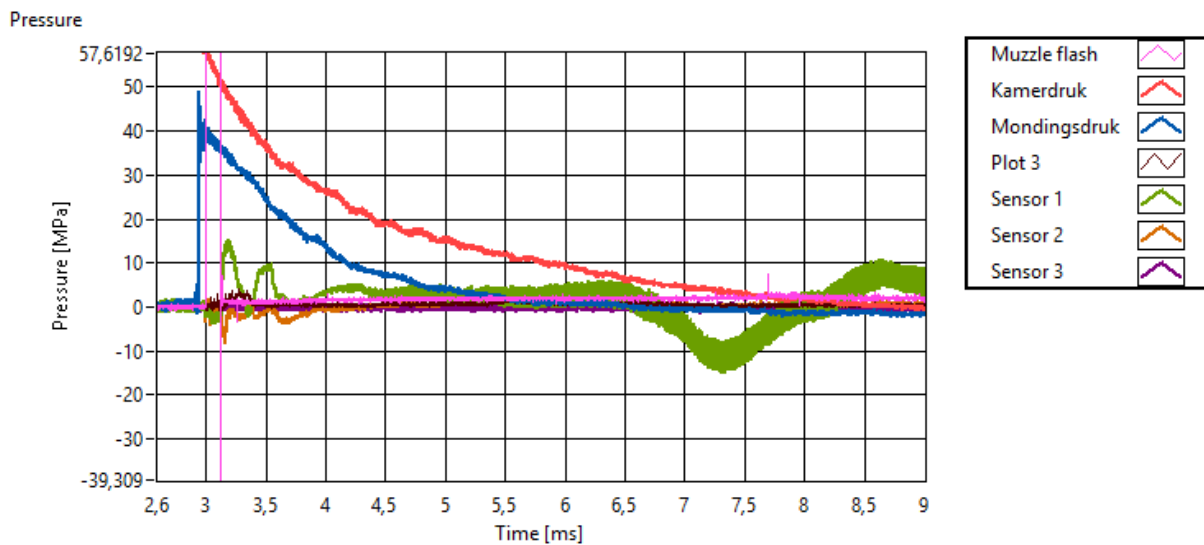
De afstand tussen de loopmond en de nieuwe schijf zal ook verkleind worden met de hoop ditmaal wel een drukverandering waar te nemen. De nieuwe onderlinge afstand bedraagt 20 mm. Op onderstaande figuur geeft sensor 1 een drukverandering weer. Het is deze verandering die van belang is voor het onderzoek en we bijgevolg nader bekijken.



Figuur 31: De gemeten drukken bij meetopstelling met dispositief waarbij de afstand is veranderd (20mm).

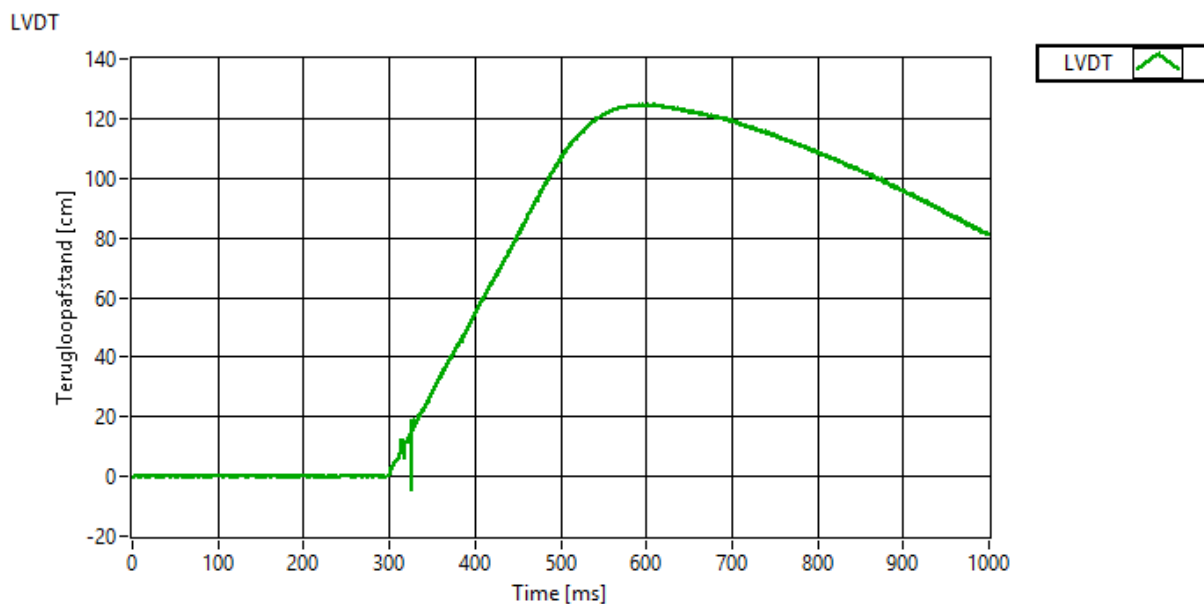
De muzzle flash detecteert een versterking van de lichtintensiteit net op het moment dat het projectiel de loop verlaat. Na enkele milliseconden detecteert sensor 1 een drukwijziging. De druk zal toenemen tot 15 MPa en weer afnemen tot de atmosferische druk. Nadien wordt er opnieuw een drukstijging waargenomen. Tevens meten de andere twee sensoren geen drukvariatie.

Aan de hand van deze meetresultaten kan er besloten worden dat de gevoeligheid van de gebruikte sensoren te klein is. De sensor kan tevens een maximale druk aan van 690 000 kPa, er kan beter gekozen worden voor een kleiner meetbereik. De drukken die ontstaan in dit gedeelte van de ballistische cyclus zijn ettelijke malen kleiner.



Figuur 32: De gemeten drukken in de intermediaire ballistiek bij meetopstelling met dispositief waarbij de afstand is veranderd (20mm).

De onderlinge afstand tussen loopmond en schijf is met 1mm verkleind dit heeft quasi geen invloed op de teruglooplengte.



Figuur 33: De terugloopbeweging bij meetopstelling met dispositief waarbij de afstand is veranderd (20mm).

## 6.2 Meetopstelling met de kistler sensoren

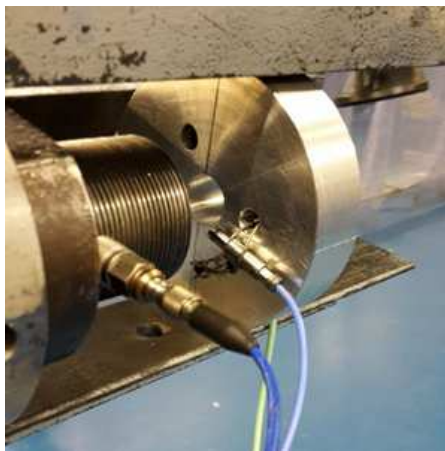
Uit voorgaande meetopstelling kon men besluiten dat de gebruikte sensoren niet voldeden. Zowel het meetbereik als de gevoeligheid waren te groot. Om de meetopstelling te optimaliseren zal er gebruik gemaakt worden van andere sensoren. Onze keuze zal zich baseren op het meetbereik en de gevoeligheid van de sensor. De nieuw gekozen sensor is van het merk Kistler model 6167A. Het meetbereik van deze sensor is een stuk kleiner dan de eerder gebruikte sensoren. Deze sensor heeft een meetbereik tot 200 bar of 20 000 kPa.



### 6.2.1 De opstelling

Bij deze meetopstelling zullen door de meetopnemers volgende fenomenen gemeten worden: de licht intensiteit, de kamer- en mondingsdruk, de druk voor en achter de schijf. Op welke kanalen de opnemers zijn aangesloten vindt u in bijlage B.

De schijven die ontworpen waren voor de voorgaande sensoren worden nu gerecupereerd. Bij deze meetopstelling zullen de sensoren aan de voorzijde en achterzijde van de schijf geplaatst worden. Dit omdat de druk achter de schijf ook van belang is. De boringen waarop de vorige sensoren werden bevestigd, worden afgedicht met een bout. Om nu de twee nieuwe sensoren te bevestigen op de schijf heeft men gekozen voor een snelle oplossing. Er wordt in de nabijheid van een oude boring een nieuw gat geboord. Door langs deze twee boringen ijzerdraad te steken en nadien aan te draaien kan er een klemming ontstaan tussen de sensor en schijf. Het nadeel van deze opstelling is dat er geen afscherming voorzien is aan de sensor die zich aan de voorkant van de schijf bevindt.

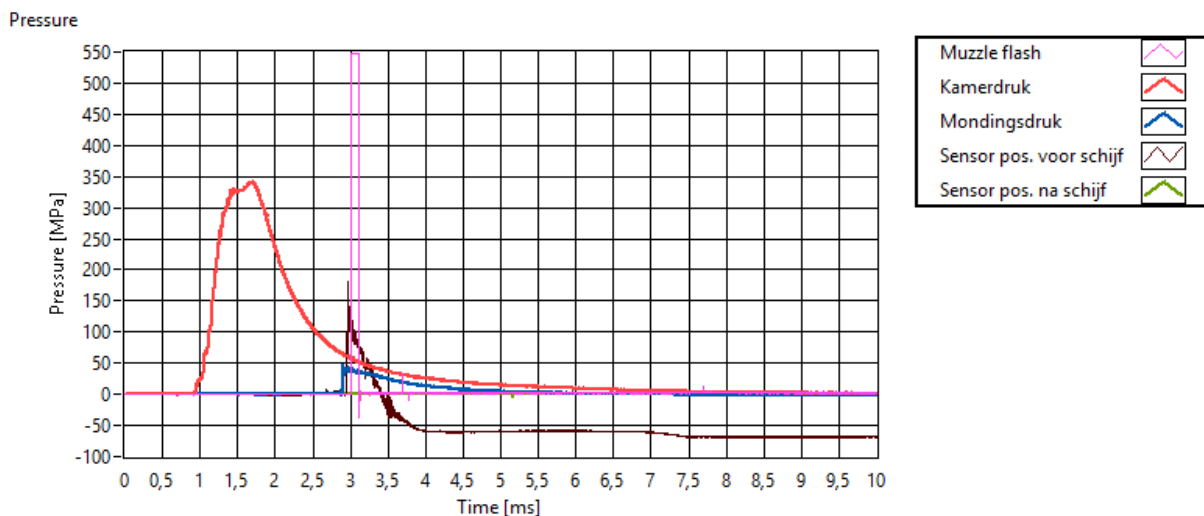


Figuur 35: Sensorpositie voor de schijf

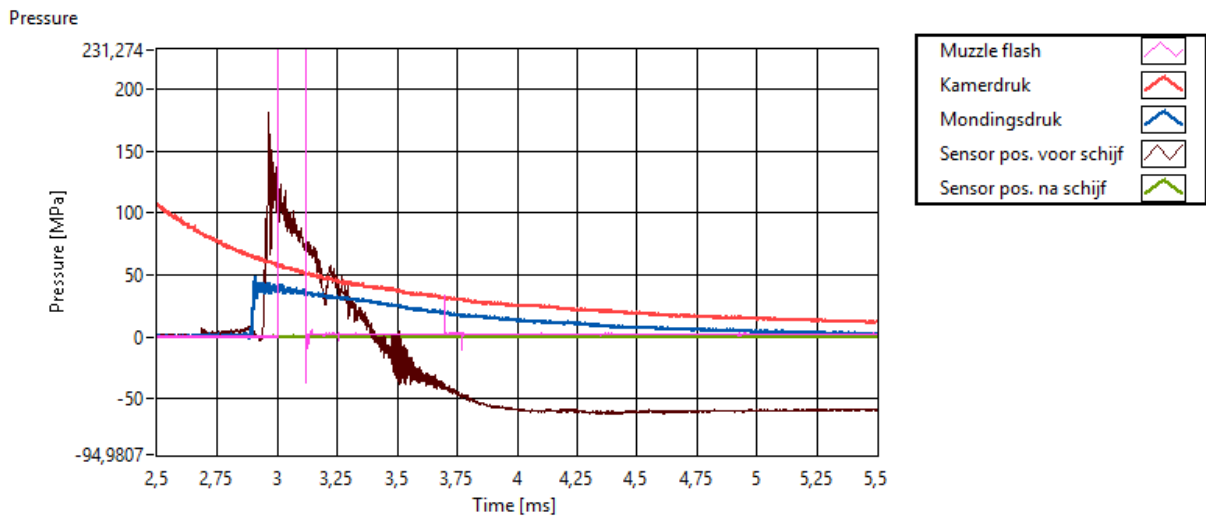


Figuur 34: Sensorpositie achter de schijf

Het gebied dat van belang is voor dit onderzoek is net na de muzzle flash. Met de nieuwe sensoren wordt er voor de schijf een drukstijging gedetecteerd. De sensor achter de schijf meet geen drukvariaties.



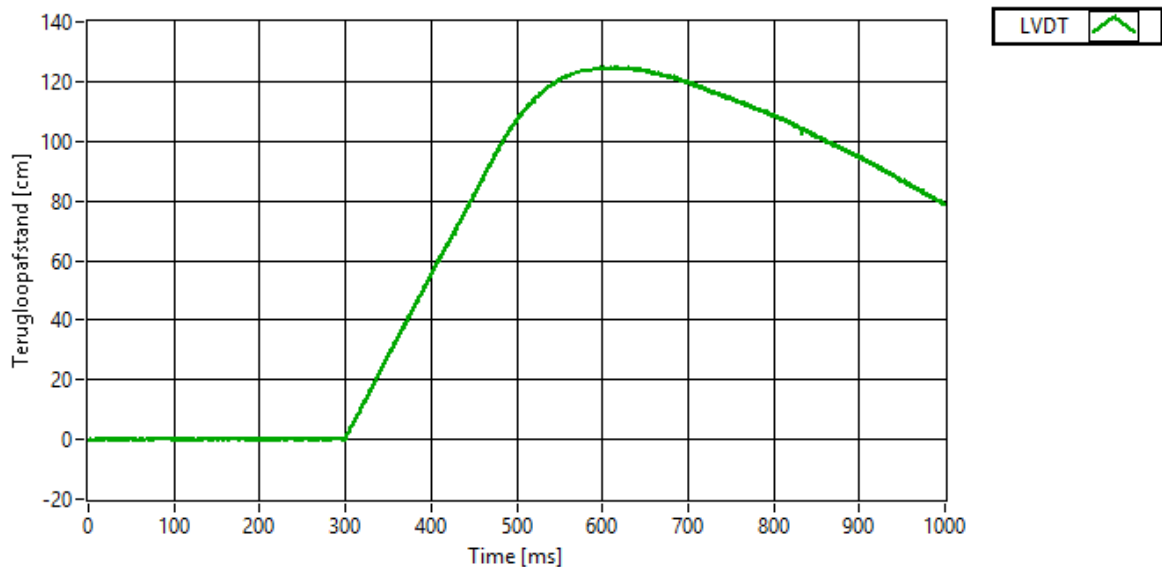
Figuur 36: De gemeten drukken bij de kistler sensoren.



Figuur 37: Ingezoomd op figuur 36.

Uit figuur 37 blijkt dat de druk voor de schijf (175MPa) groter is dan de mondingsdruk (50MPa). Dit kan uiteraard niet. Het signaal van sensor voor de schijf moet nog omgevormd worden naar dezelfde schaalverdeling als de inwendige ballistische metingen. Na een bepaalde tijd meet de sensor voor de schijf een onderdruk. In werkelijkheid is er geen onderdruk aanwezig maar aangezien de herontvlaming een temperatuur stijging met zich meebrengt, zal als het ware aan het membraam getrokken worden. De sensor die zich achter de schijf bevindt meet niets. We controleren of deze sensor correct is aangesloten en herhalen de meting. Na het herhalen van de meting kwam men tot de constatactie dat de bekabeling van de sensor voor de schijf beschadigd is. Dit is te wijten aan het feit dat de bekabeling niet afgeschermd is en bijgevolg blootgesteld is aan de hoge temperaturen waardoor er geen drukken gemeten konden worden. De sensor achter de schijf niets. De bekabeling bij deze sensor is nog intact. Men kan besluiten dat er bij deze meetopstelling afscherming voorzien moet worden en dat de sensor achter de schijf een grotere gevoeligheid moet hebben. Bij deze sensoren is de bekabeling vast verbonden met de sensor waardoor het gebruik van een andere kabel geen optie is. De terugstootkracht is eveneens hetzelfde gebleven als bij figuur 30.

#### LVDT



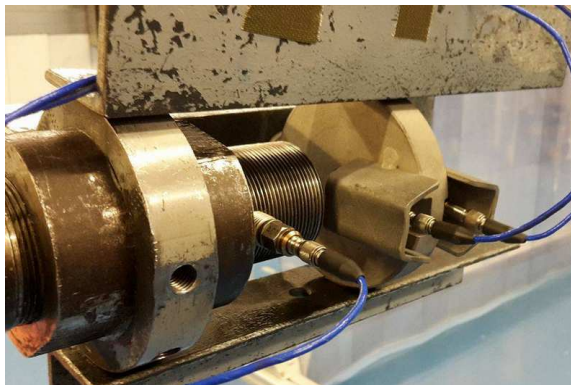
Figuur 38: De terugloopbeweging bij de kistler sensoren.

## 6.3 Meetopstelling met geoptimaliseerde sensorhouder

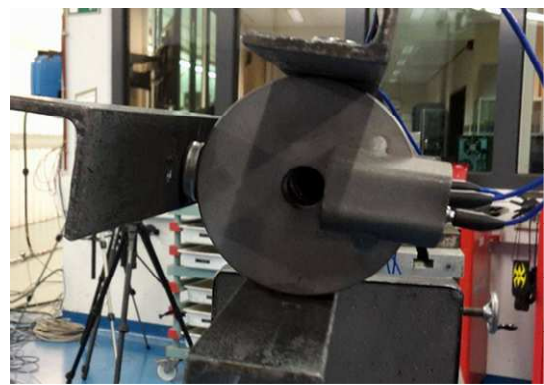
Doordat de sensor bij de vorige meting niet was afgeschermd is deze beschadigd. Opnieuw zal de meetopstelling geoptimaliseerd worden. Bij deze meetopstelling is er opnieuw een schijf ontworpen met dezelfde buitendiameter als de schijf die zich op de loop bevindt en de binnendiameter is iets groter dan het kaliber (binnendiameter van de loop). Deze schijf is wel voorzien van een afscherming aan beide kanten. Bij de vorige sensoren was de bekabeling rechtstreeks verbonden met de sensor. Beter zou zijn dat de kabel apart kan aangesloten worden, opdat de kabel snel en gemakkelijk vervangen kan worden indien er beschadiging zou optreden. De gevoeligheid van de sensor achter de schijf moest op basis van vorige meetresultaten vergroot worden en bijgevolg hebben wij gekozen voor de sensor van het merk PCB model 102B, deze heeft een gevoeligheid van 146mV/MPa. De sensor die zich voor de schijf bevindt is eveneens van het merk PCB model 113B03, deze heeft een grotere gevoeligheid (54,66pC/MPa) dan de sensoren van de voorgaande metingen.

### 6.3.1 Ontwerp sensorhouder

De sensorhouder bestaat uit drie delen: een schijf, twee stalen blokjes met een boring en twee beschermkapjes. De binnendiameter van de schijf zal met behulp van de L-ijzers makkelijk kunnen uitgelijnd worden met de zielas. De sensoren moeten zo dicht mogelijk langs de binnendiameter geplaatst worden omdat hier de drukken het grootst zijn. Om dit mogelijk te maken worden twee stalen blokjes voorzien van een binnenschroefdraad waarop de sensoren bevestigd kunnen worden. De diameter van beide sensoren is verschillend. De sensoren worden weer geplaatst zonder uitsparing, waardoor de afmetingen van de inwendige schroefdraad goed gerespecteerd worden. Deze afmetingen zijn terug te vinden in bijlage D. De blokjes worden nadien op de schijf gelast. De bescherming van de sensoren wordt gerealiseerd door twee geplooide stalen plaatjes die eveneens worden vastgelast op de schijf. Nadien wordt de sensorhouder gezandstraald.

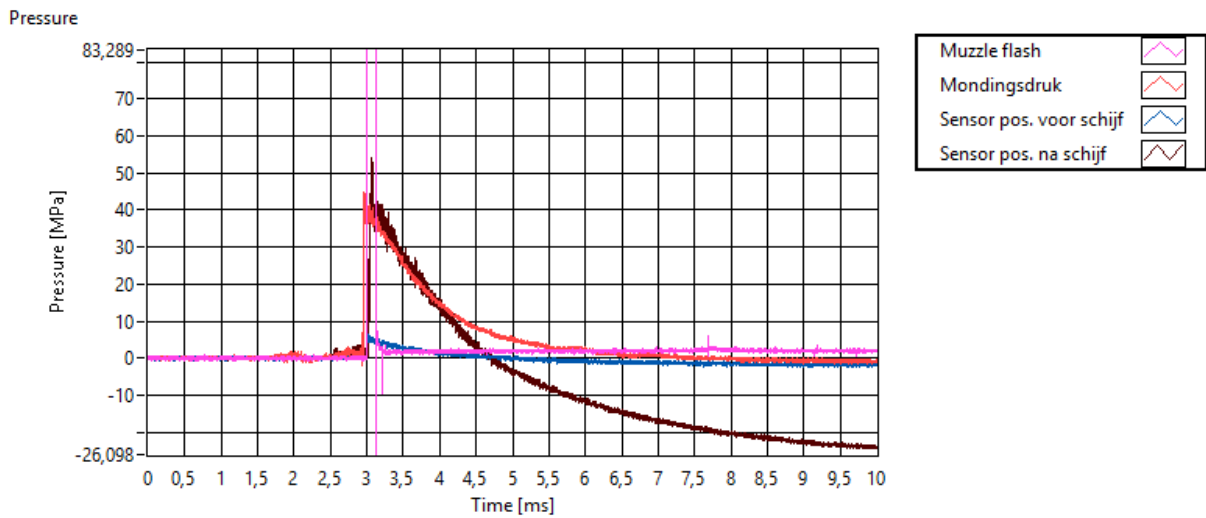


Figuur 40: Vooraanzicht schijf



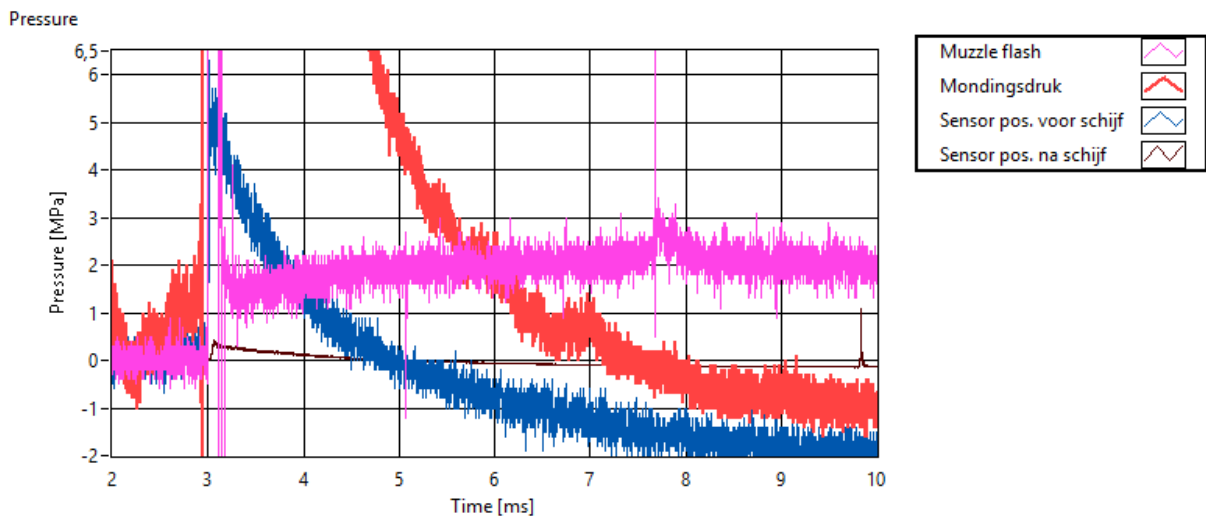
Figuur 39: Achteraanzicht schijf

Bij deze meting, waarbij de sensorhouder geoptimaliseerd is, wordt enkel de mondingsdruk en de druk voor en achter de schijf gemeten. In bijlage B worden de gebruikte kanalen weergegeven. Wat voor dit onderzoek essentieel is, zijn de fenomenen die zich afspelen na de mondingsdruk. Beide sensoren tonen aan dat er een drukstijging ontstaat. Als men opnieuw het gedeelte dat van belang is voor het onderzoek uitvergroten zullen de nuttige signalen duidelijker zichtbaar zijn. Merk op dat de sensor na de schijf een grotere druk meet dan de mondingsdruk. De gevoeligheid van “sensor na” wordt uitgedrukt in 146mV/MPa. Bij spanningsversterkers moet dit signaal softwarematig omgevormd worden zodat het signaal op dezelfde schaal wordt weergegeven. Bij ladingsversterkers kan de schaal ingesteld worden via het bedieningspaneel.



Figuur 41: De gemeten drukken bij de geoptimaliseerde sensorhouder.

Nu zijn alle signalen weergegeven op dezelfde schaal. Zoals eerder besproken zal vanaf het moment dat het projectiel de loop verlaat, de druk sterk afnemen door de volumevergroting. Dit is duidelijk merkbaar in figuur 41. In de loopmond is er nog een druk aanwezig van 47 MPa en wanneer het projectiel de loop verlaat, zal de druk dalen tot 6 MPa. De druk achter de sensor zal nog slechts een drukstijging waarnemen van 0.5 MPa. Men kan besluiten dat deze meetopstelling de gewenste gegevens meet. Bij de volgende metingen zal er gespeeld worden met de onderlinge afstand tussen loopmond en de sensorhouder.

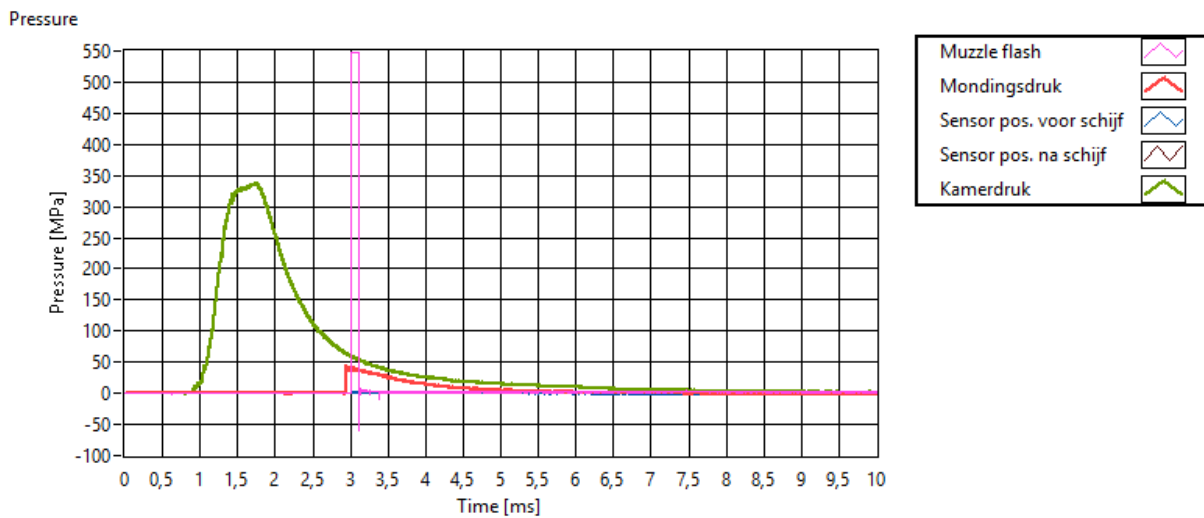


Figuur 42: Ingezoomd op figuur 41.

## 6.4 Meetopstelling met een onderlinge afstand van 47 mm tussen loopmond en sensorhouder

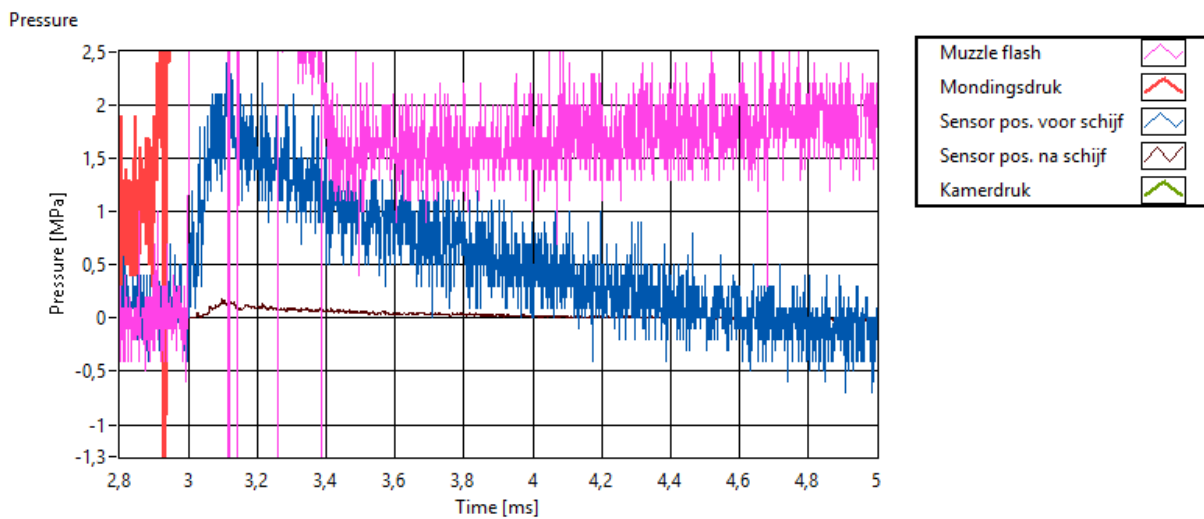
Enkel de onderlinge afstand tussen de loop en schijf verandert. De afstand tussen de loop en schijf bedraagt nu 3,72 kaliber (47,3mm). Om een volledig beeld te krijgen wordt bij deze meting de kamerdruk opnieuw gemeten. De gebruikte kanalen zijn terug te vinden in bijlage B. De parameterinstellingen van de ladingsversterkers voor de sensoren die de kamerdruk en mondingsdruk meten, blijven hetzelfde (zie bijlage C). Voor de parameterinstellingen voor de sensorpositie voor de schijf zie bijlage C. Deze instellingen moeten gebeuren zodat alle signalen op dezelfde schaal worden weergegeven.

Doordat alle signalen op dezelfde schaal worden weergegeven zijn kleine drukstijgingen in eerste instantie niet merkbaar. Ook hier zal het gebied na de muzzle flash verder bestudeerd worden.



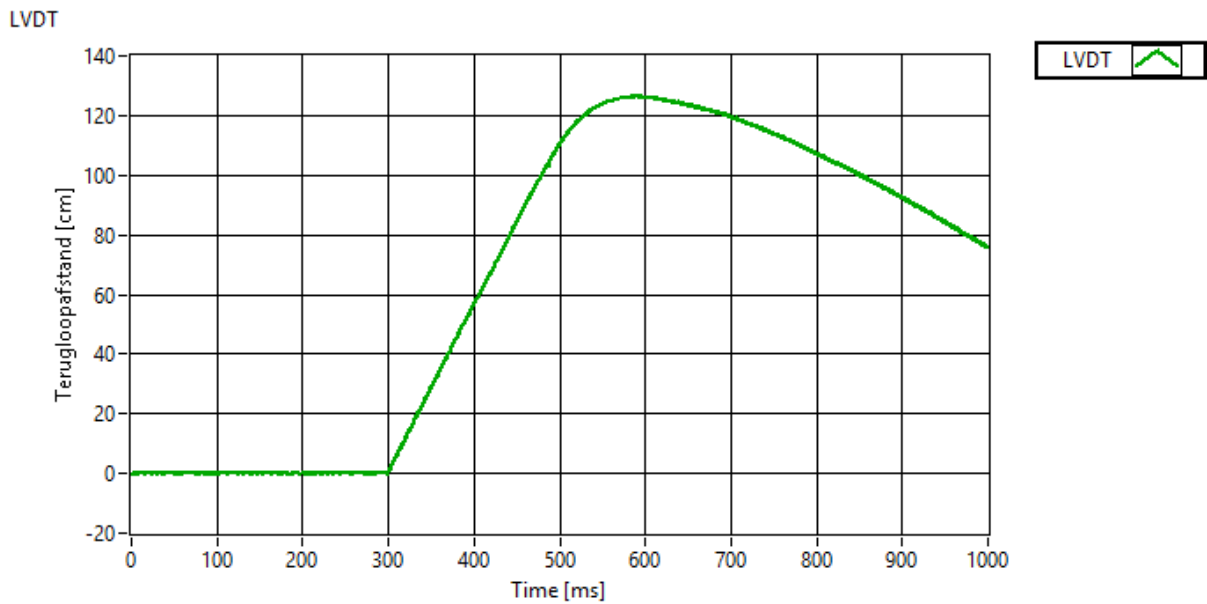
Figuur 43: De gemeten drukken op een onderlinge afstand van 47mm tussen loopmond en sensorhouder

De sensorhouder en dus ook de sensoren bevinden zich op een grotere afstand van de loopmond. De drukken zullen hier bijgevolg ook kleiner zijn dan bij de vorige meting. De druk voor de schijf is gedaald tot 2.1 MPa. De sensor na de schijf zal een druk waarnemen van 0.25 MPa. Als men de onderlinge afstand t.o.v. vorige meting vergelijkt met de afstand die nu aanwezig is merkt men dat de afstand 25.8 mm vergroot is. Dit is iets meer dan een verdubbeling van de afstand.



Figuur 44: Ingezoomd op figuur 43.

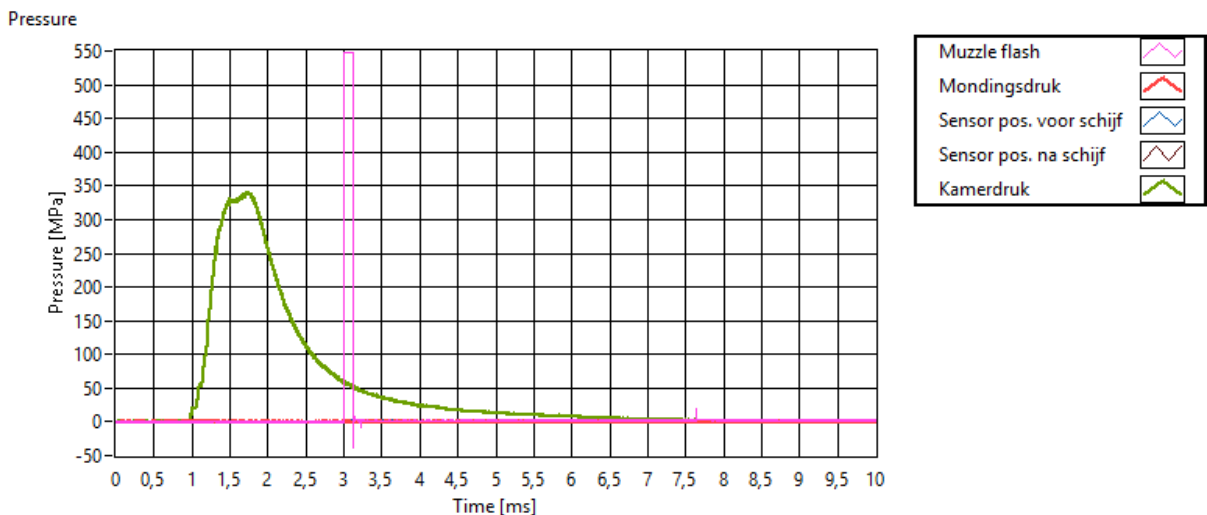
Het vergroten van de afstand tussen loopmond en schijf heeft een kleine invloed op de terugstootkracht en de LVDT bereikt iets sneller zijn maximale terugloopafstand.



Figuur 45: De terugloopbeweging bij een onderlinge afstand van 47mm tussen loopmond en sensorhouder.

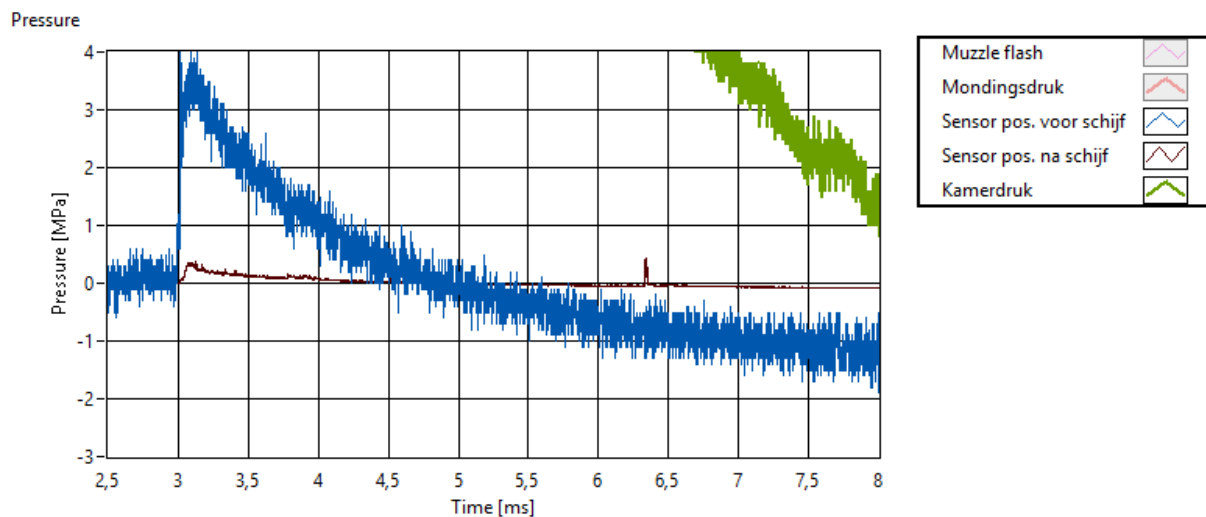
## 6.5 Meetopstelling met een onderlinge afstand van 30 mm tussen loopmond en sensorhouder

Ook bij deze meetopstelling wordt enkel de afstand tussen loop en schijf veranderd. Deze bedraagt 30,6 mm of 2.4 kaliber. Alle andere parameters zijn hetzelfde als bij de meting waar de onderlinge afstand vastgesteld is op 47 mm. De parameterinstellingen van de kamerdruk zijn weergegeven in bijlage C. De mondingdruk kan bij deze opstelling niet gemeten worden omdat de contraoeren de voorziene boring van de sensor afdichten. De instellingen voor de sensorpositie voor de schijf zijn terug te vinden in bijlage C. De gebruikte kanalen zijn terug te vinden in bijlage A.



Figuur 46: De gemeten drukken op een onderlinge afstand van 30mm tussen loopmond en sensorhouder.

De muzzle flash is in figuur 47 onzichtbaar gemaakt omdat de druk na de schijf anders niet duidelijk zichtbaar is. Op deze figuur wordt nog eens duidelijk dat de onderdruk te wijten is aan de hoge temperatuur. De sensor voor de schijf creëert een onderdruk terwijl de sensor die zich achter de schijf bevindt, en dus beter beschermd is tegen de hoge temperaturen, naar nul gaat.



Figuur 47: Ingezoomd op figuur 46.

Bijgevolg kan besloten worden dat de sensoren van het model 103B en 113B03 bruikbaar zijn voor de verdere optimalisatie van de drukmeetopstelling. Nu heeft men enkel de drukken gemeten in één richting terwijl de drukgolven in werkelijkheid bewegen in verscheidene uiteenlopende richtingen. De verdere optimalisatie zal bestaan uit het opmeten van de drukken in verschillende richtingen.

De terugstootkracht is evenredig met de afstand tussen schijf en loopmond, door wanneer de onderlinge afstand groter wordt, zal de terugstootkracht bijgevolg ook groter worden. Voor de verdere metingen zal de onderlinge afstand zo klein mogelijk gehouden worden.

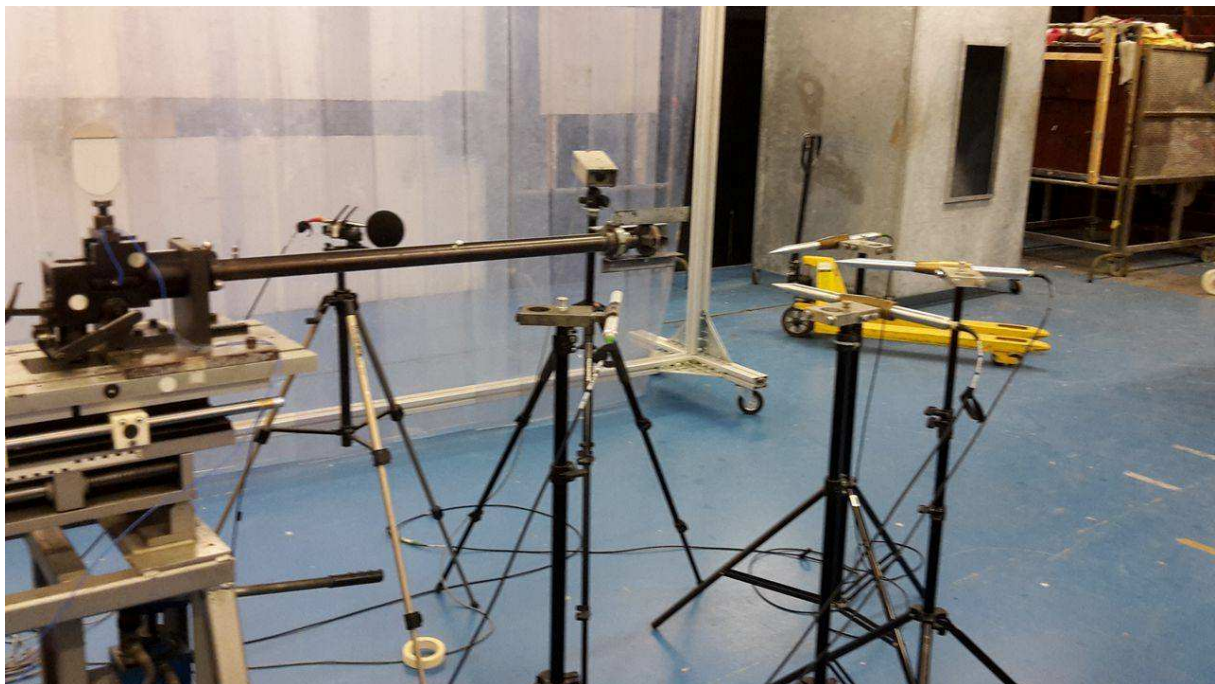
## 6.7 Meetopstelling met de blast pencils

Om een betere drukmeting te bekomen zal ook in andere richtingen de druk gemeten moeten worden. Met behulp van blast-sensoren kan dit gerealiseerd worden. De meetopnemers zullen de volgende drukken meten: de licht intensiteit, de kamerdruk, de druk op 0° op 45° op 90° en op 135° tenslotte de teruglooptijd.

### 6.7.1 De opstelling

De blast-pencils worden bevestigd in een houder die zo gemaakt is dat hij de stroming van de drukgolven niet zal beïnvloeden. Deze houder zal bevestigd worden op een driepikkel waarvan de hoogte verstelbaar is. Vier blast-sensoren met verschillende gevoeligheden zullen de drukgolven meten rond de omgeving van de loopmond. Deze staan onder een bepaalde hoek t.o.v de loopmond. De gekozen hoeken zijn: 0°, 45°, 90° en 135°. Zo zal er dus een drukmeting ontstaan waarbij de drukken worden gemeten in verschillende richtingen. Een microfoon is in staat om drukgolven te meten en deze zal rond de omgeving van de loopmond geplaatst worden.

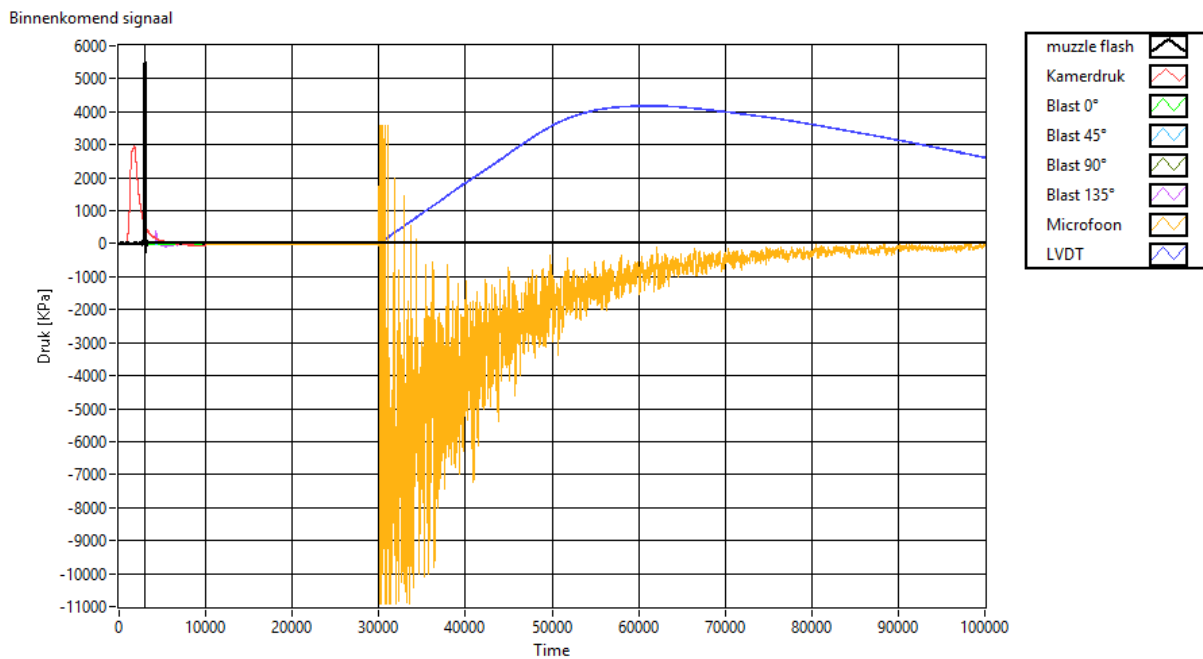
De ingestelde hoogte van de sensoren t.o.v. de grond is 120 cm. Enkel de hoogte van de blast-sensor die zich op 0° bevindt is ingesteld op een hoogte van 118 cm zodanig dat het projectiel de sensor in geen geval kan beschadigen. De afstand tussen de loopmond, de blast-sensoren en microfoon is dezelfde, namelijk 60 cm. De signalen van de blast-sensoren komen binnen op de spanningsversterker PCB model 482 C series 1MHz. De signalen omvormen naar de juiste schaal gebeurt aan de hand van software.



Figuur 48: Meetopstelling met de blast-pencils.

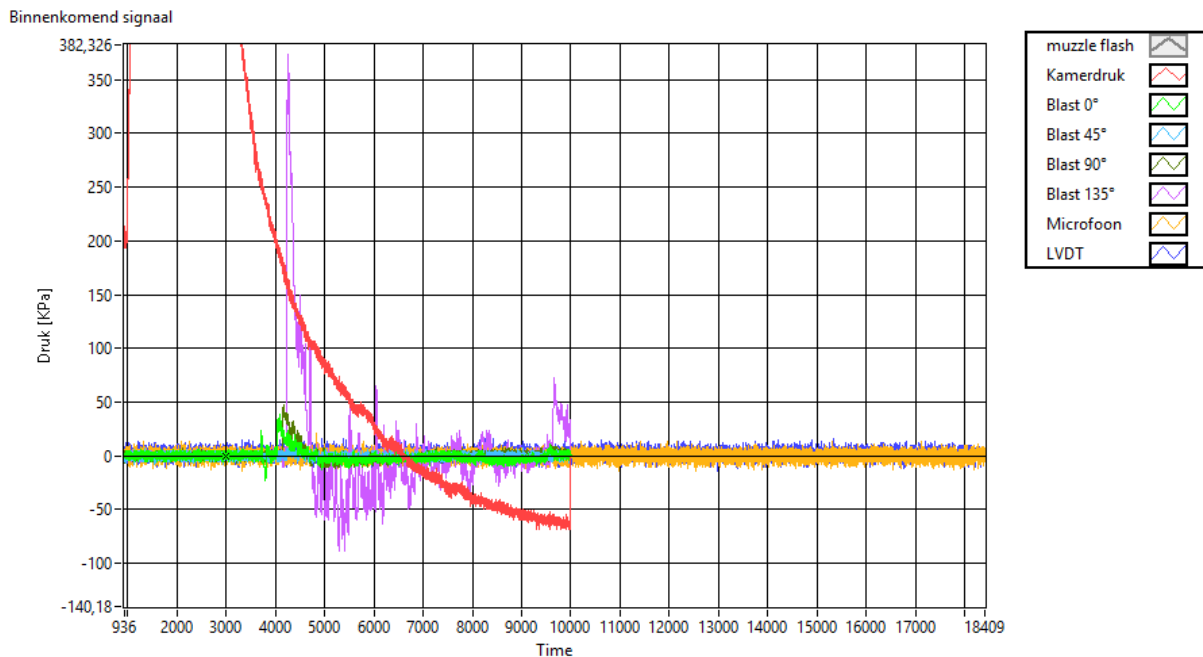
De microfoon en de LVDT zijn ingesteld op een sample frequentie van 10 000 Hz, terwijl de andere meetopnemers een sample frequentie hebben van  $1 * 10^6$  Hz. De tijdbasis is in figuur 49 niet correct maar dit gegeven is minder van belang. Bij deze meetopstelling is het gedrag in amplitude van de verschillende blast sensoren belangrijk. Om deze visueel zichtbaar te maken moet er ingezoomd worden op figuur 49.





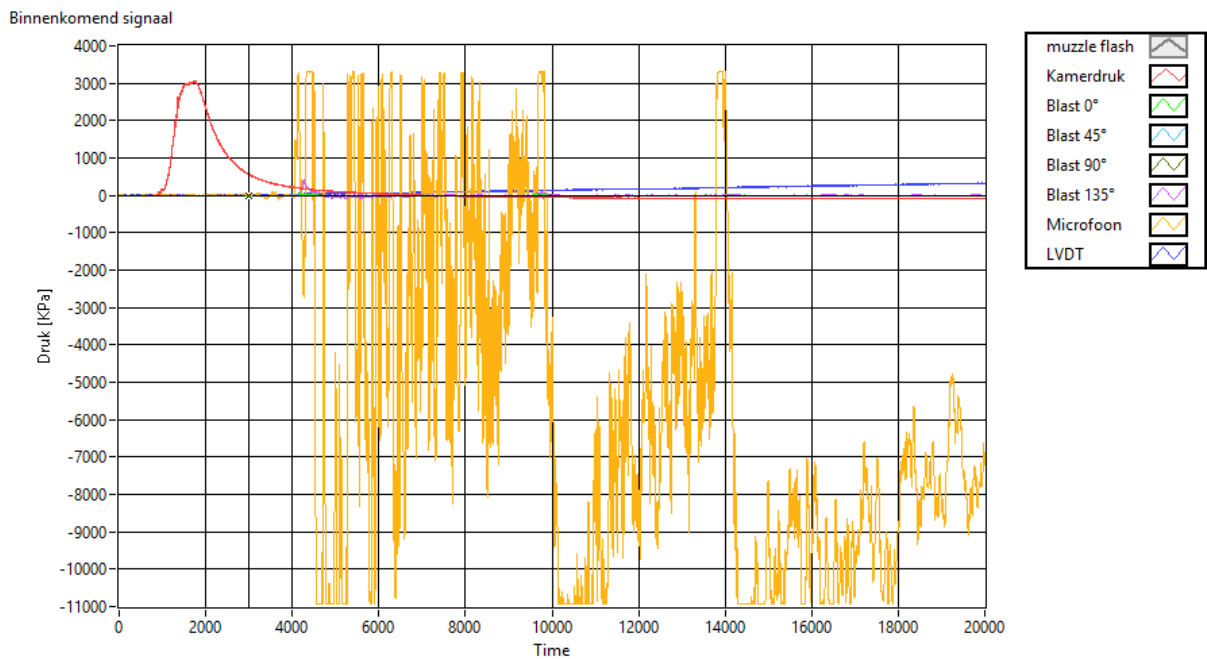
Figuur 49: De gemeten drukken en teruglooptengte bij de meetopstelling met blast pencils.

De muzzle flash is onzichtbaar gemaakt zodat de signalen van de blast-sensoren beter zichtbaar zijn. De blast-sensor op 45° meet geen enkele drukgolf, de blast sensoren op 0°, 90° en 135° meten wel een drukgolf. Ook hier weer zijn de sensoren softwarematig nog niet op de juiste schaal gezet, dit is in deze fase van het onderzoek nog niet belangrijk.



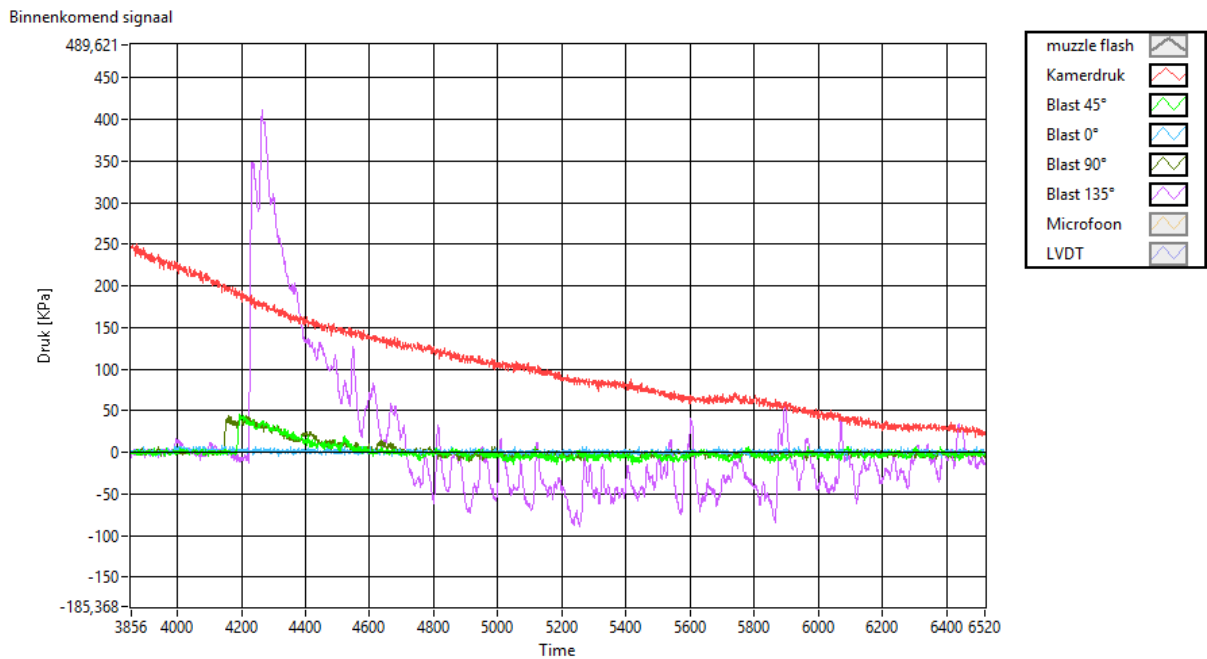
Figuur 50: Ingezoomd op figuur 49.

Om te weten te komen dat de blast-pencil die opgesteld was op 45° een te kleine gevoeligheid heeft en daardoor niets meet, worden twee blast-sensoren gewisseld van plaats. Het zijn de blast-sensor 137A22 SN9922 (45°) en de blast-sensor 137A21 SN1011 (0°) die van plaats wisselen. De LVDT en microfoon zijn nu ingesteld op dezelfde samplefrequentie als de blast-sensoren, ze hebben dezelfde tijdsbasis. Merk op dat de signalen van de LVDT en microfoon maar voor een deel worden weergegeven. De microfoon gaat in overload en de pieken worden afgevlakt. Om dit te vermijden zal bij de volgende opstelling de microfoon op een grotere afstand van de loopmond geplaatst worden.



Figuur 51: De gemeten drücken bij de meetopstelling met blast pencils waarvan er twee pencils omgewisseld zijn.

Opnieuw zijn er een aantal signalen weggelaten om zo de signalen van de blast sensoren beter zichtbaar te maken. De blast-sensor 137A21 SN1011 die zich nu op positie 0° bevindt meet opnieuw niets. Hieruit kan men besluiten dat deze sensor niet de correcte gevoeligheid heeft, de gevoeligheid is namelijk te klein om deze drukgolven te kunnen meten.



Figuur 52: Ingezoomd op figuur 51

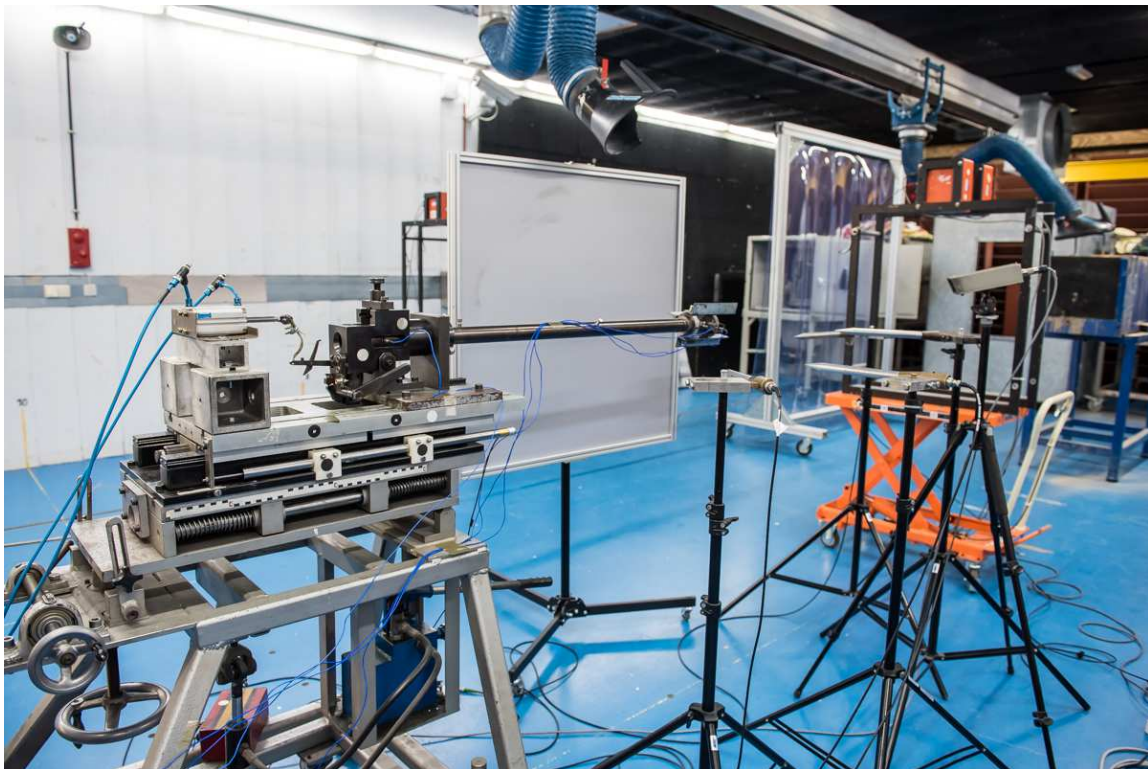
## 7 De uiteindelijke meetopstelling voor het meten van de intermediaire ballistiek

Bij de voorgaande meetopstellingen zijn de drukken gemeten kort bij de loopmond en op verschillende afstanden maar in één en dezelfde richting. Nadien zijn we met behulp van blast-pencils de drukken gaan meten in verschillende richtingen. Als men deze twee meetopstellingen combineert krijgt men een mooi totaal beeld van de drukken en fenomenen die zich bevinden in de intermediaire ballistiek.

### 7.1 De meetopstelling

De meetopnemers zullen bij de uiteindelijke meetopstelling de druk in de kamer, in de monding, rondom de loopmond en rond de omgeving van de loopmond meten. Aangezien er maar acht kanalen beschikbaar zijn wordt de muzzle flash aangesloten op een apart trigger kanaal en de LVDT wordt achterwegen gelaten. De gebruikte kanalen zijn terug te vinden in de bijlage B. Bij deze opstelling werkt men met hetzelfde type blast-pencils. De gevoeligheid van deze pencils is tevens groter dan diegenen die gebruikt zijn bij de voorgaande metingen, wat maar meer nauwkeurige meetresultaten oplevert. Uiteindelijk wordt de overdruk in de intermediaire ballistiek bij deze meetopstelling gemeten op zes verschillende plaatsten. Deze kunnen naar gelang de vraag variëren van afstand tot de loopmond. Bij deze meetopstelling worden de fenomenen die zich voortdoen rond de loopmond het best gemeten.

De onderzoekers zullen aan de hand van een simulatie- en rekenprogramma een voorspellingsmodel opstellen dat de verschillende drukken berekent. Via het programma kan de druk op elke plaats in het accessoire berekend worden. Dit vereist veel rekentijd en kan soms dagen duren. Om te controleren of de berekeningen die het programma uitvoert wel degelijk juist zijn, zullen de onderzoekers deze meetopstelling gebruiken. De drukken die gemeten worden met de meetopstelling worden vergeleken met de drukken die het programma heeft berekend. Met de beperking dat we maar op enkele plaatsen kunnen meten. Als de drukken hetzelfde zijn, kunnen de onderzoekers zich verlaten op hun verdere berekeningen.



Figuur 53: De uiteindelijke meetopstelling voor het meten van de intermediaire ballistiek.

## 7.2 Meetopstelling voor een video-opname van de uitstroomgassen

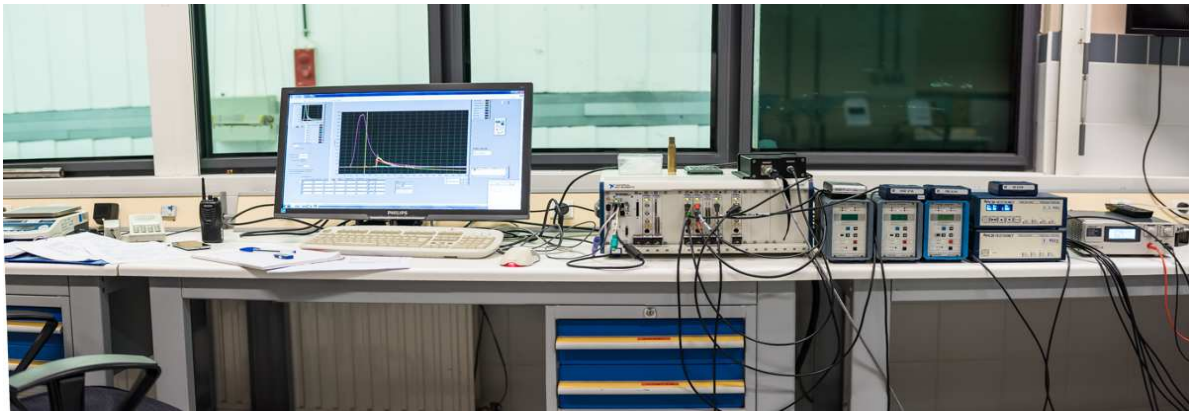
Bij deze meetopstelling worden de uitstromingen van de gassen in beeld gebracht door een hogesnelheidscamera. De (doorlaat)spiegel staat onder een hoek van  $45^\circ$  tegenover de camera, deze gaat het gecollimeerde licht afkomstig van de lichtbron weerkaatsen op dezelfde as als de lens van de camera. Het weerkaatste licht vindt vervolgens zijn weg door de doorlaatspiegel naar de lens van de camera. De uitstromingen worden geprojecteerd op het witte scherm dat zich achter het mondaccessoire bevindt. Het in beeld brengen van de uitstromingen nabij het mondaccessoire is voor deze masterproef het belangrijkste. Om de camera zo in te stellen dat alleen dit gebied in beeld wordt gebracht moet de focus van de camera ingesteld worden. Dit gebeurt door een brandend theelichtje op het accessoire te plaatsen. Wanneer de warmtedampen van het brandend lichtje zichtbaar worden op het beeldscherm is de focus juist ingesteld. Figuur 54 geeft de opstelling weer van de camera.



Figuur 54: Cameraopstelling.

## 7.3 Opstelling in de operatorkamer

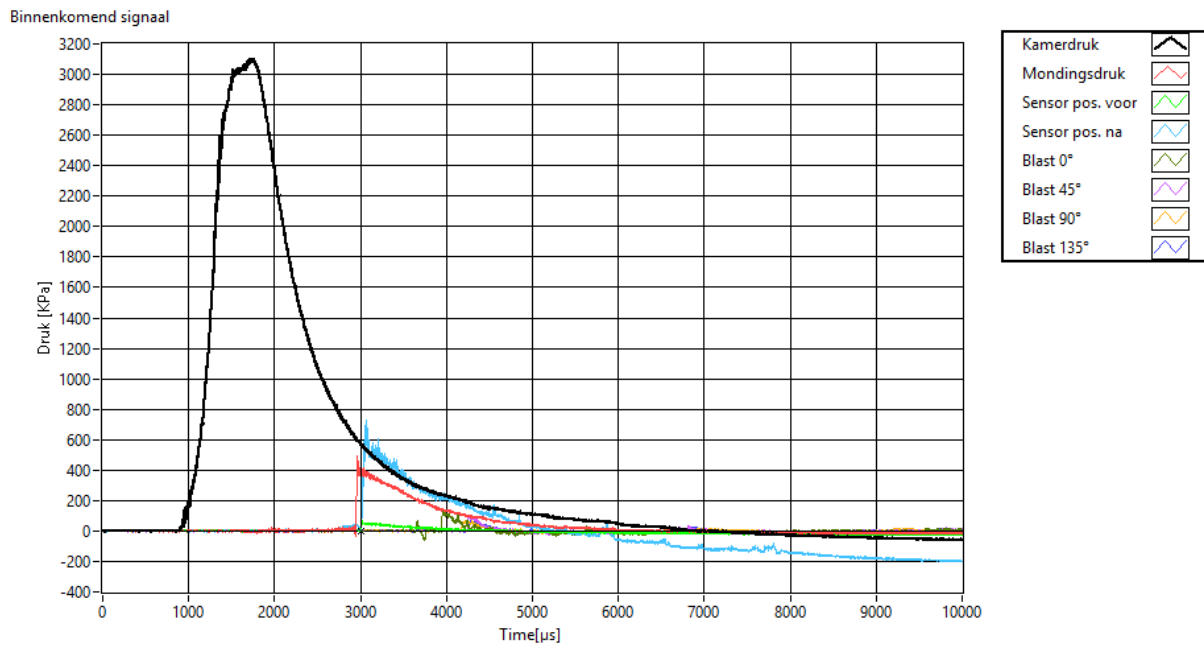
De opstelling van de operatorkamer wordt weergegeven in figuur 55. Voor de signaalconditionering worden drie ladingsversterkers gebruikt teneinde de kamer-, mondingsdruk en de druk te meten voor de schijf. De parameterinstellingen zijn terug te vinden in bijlage C. De conditionering van de sensor achter de schijf en de blast-sensoren wordt mogelijk gemaakt door de spanningsversterkers. Op figuur 55 staan twee spanningsversterkers met een bandbreedte van 0.2MHz en één 1MHz. De frequenties die boven deze waardes liggen worden niet versterkt. De blast-sensoren zijn aangesloten op het PCB model 482 C 1MHz, de sensor achter de schijf is aangesloten op 0.2MHz.



Figuur 55: Opstelling in de operatorkamer.

## 7.4 Meetresultaten en signaalverwerking

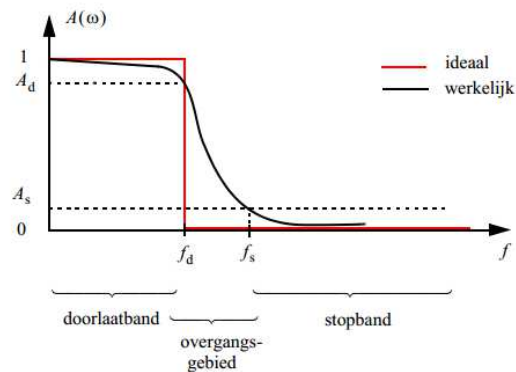
De metingen worden tien keer herhaald om representatief te zijn. Figuur 56 geeft de ongefilterde signalen weer die binnenkomen in het softwareprogramma LabVIEW. De signalen zijn tevens niet op de juiste schaal weergegeven. Alle sensoren genereren signalen die bruikbaar zijn voor de analyse. Met behulp van deze meetopstelling zal door de onderzoekers de mondingsrem ontwikkeld worden.



Figuur 56: De gemeten drukken bij de intermediaire ballistiek.

### 7.3.1 Filterkeuze

Een filter wordt gebruikt om ongewenste frequenties in een signaal te verzwakken of volledig te verwijderen. Een filter kan slechts werken in een bepaald frequentiebereik aangezien een filter informatie uit een signaal verwijdert. De filters worden onderverdeeld op basis van het frequentiebereik dat doorgelaten of gedempt wordt. De signalen van de bekomen meetresultaten bezitten nog hoogfrequente componenten (ruis) die ongewenst zijn voor de verdere analyse van het signaal. In dit geval moeten de laagfrequente signalen ongedempt doorlaten en de hoge frequente signalen onderdrukt worden. Dit noemt men een laagdoorlaatfilter. Het amplitudeverloop ziet er als volgt uit:



Figuur 57: Laagdoorlaatfilter. [15]

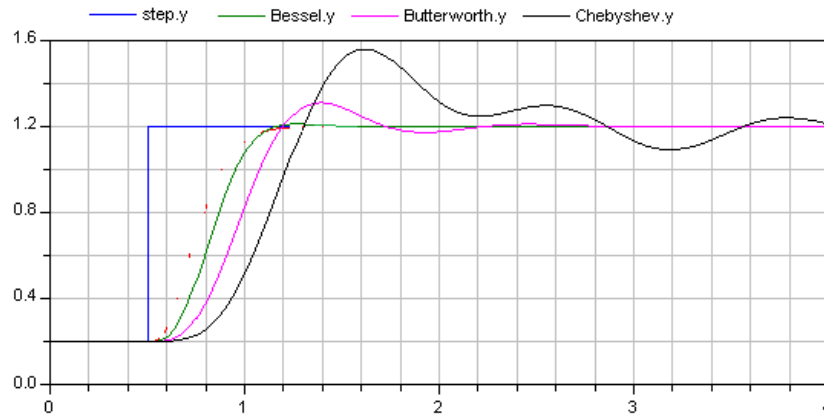
Deze filter wordt gekenmerkt door twee eigenschappen, met name de afsnijfrequentie en de helling. De afsnijfrequentie of kantelfrequentie geeft de frequentie weer wanneer de overgang gebeurt tussen het doorgelaten en afgezwakte deel van het spectrum. De meting van de afsnijfrequentie gebeurt op het ogenblik dat het doorgelaten deel en het afgezwakte deel 3 dB verschillen. De helling wordt uitgedrukt in decibel per octaaf en zal de steilheid bepalen tussen het doorgelaten en het afgezwakte deel van het spectrum.

Er bestaan verschillende filtertypes die voor deze toepassing gebruikt kunnen worden. Dit zijn allemaal laagdoorlaat filters.

- Bessel
- Butterworth
- Chebyshev
- Elliptic
- Inverse Chebyshev

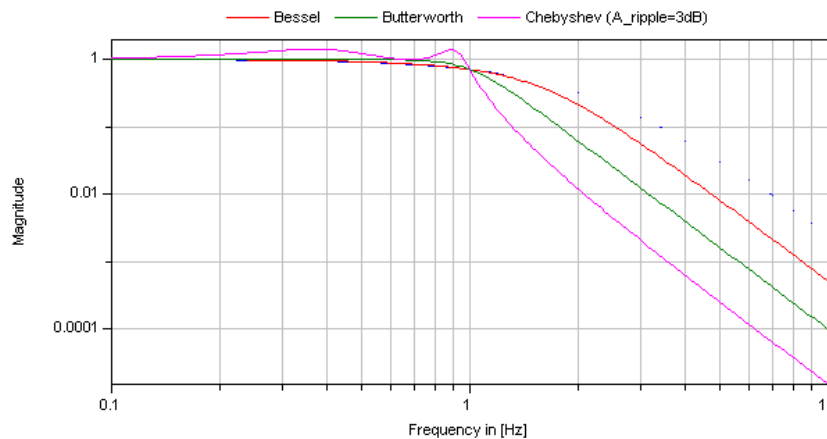
De eerste drie filters hebben enkel een polen response. De laatste twee hebben een polen en nulpunten response. Deze laatste zijn flexibeler en hebben een steiler verloop bij de afsnijfrequentie maar zijn heel wat moeilijker in gebruik bij actieve filters. Men kan deze dus al zeker schrappen. Om nu een juiste keuze te maken tussen de drie overgebleven filters gaat men een drietal eigenschappen bekijken die belangrijk zijn bij het filteren. Deze zijn het frequentieverloop, het fasegedrag en het impulsgedrag. Het voornaamste verschil tussen de drie filters is de doorlaatkarakteristiek en de flankensteilheid. Men gaat de stapresponse en amplituderresponse van deze filters met elkaar vergelijken.

## Stapresponse



Figuur 58: Stapresponse van Bessel, Butterworth en Chebyshev.

## Doorlaatband



Figuur 59: Doorlaatband van Bessel, Butterworth en Chebyshev.

De Butterworth filter levert in de doorlaatband een zeer vlakke amplituderesponse op en een hellingsgraad van  $-20$  dB/dec of  $6$  dB/octaaf. De faseresponse is minder lineair dan bij de Bessel filter.

Een puls aanleggen aan de ingang van de filter zal resulteren in enerzijds een overshoot aan de uitgang en anderzijds een tijdsvertraging tussen in- en uitgang. Wanneer men geïnteresseerd is in de correcte amplitude van frequenties in het lineair gedeelte van de doorlaatband zal men bij voorkeur deze filter toepassen. Is men meer geïnteresseerd in de tijdsinformatie van de signalen bijvoorbeeld wanneer het passeert wordt de voorkeur gegeven aan een filter met lineaire fase

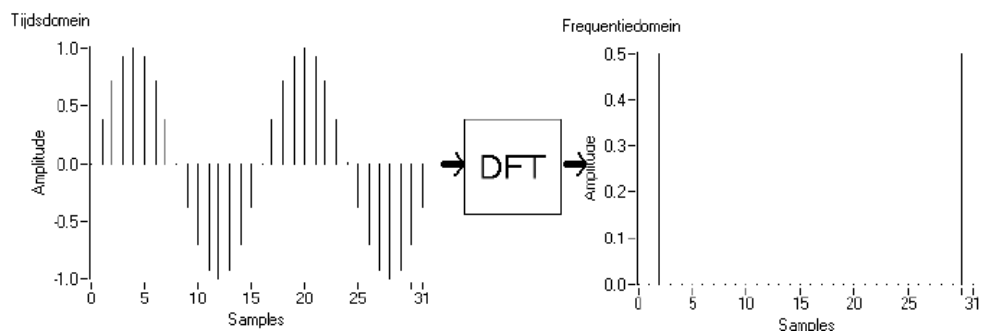
De Chebyshev filter zal toegepast worden waar er gewerkt moet worden met een steile hellingsgraad. Deze helling zal bij het  $-3$  dB punt meer zijn dan  $-20$  dB/dec. Hoe steiler de frequentieresponse hoe beter de filtering gebeurt. Wanneer de ongewenste dicht bij elkaar liggende frequenties enorm gedempt moeten worden zal dit soort filter gebruikt worden.

De Bessel filter heeft een lineaire faseresponse. De faseverschuiving stijgt lineair met de frequentie, waardoor de tijdsvertraging binnen de doorlaatband minimaal is. Een puls aanleggen aan de ingang van de filter zal aan de uitgang resulteren in praktisch geen overshoot. Deze filters zullen pulsen en soortgelijke golfvormen filteren zonder de vorm van de golf te vervormen.

De beste keuze van filtering bij metingen in de tussenballistiek zou zijn een Bessel filter zijn omdat de signalen daar korte stijgtijden vertonen. In het labo wordt de voorkeur gegeven aan een Butterworth filter omdat deze ook gebruikt wordt bij andere metingen in de inwendige ballistiek. Hardwarematig waren er geen Bessel filters beschikbaar. Met een frequentieanalyse (FFT Fast Fourier-transformatie) kan de afsnijfrequentie makkelijk bepaald worden om zo de juiste instellingen te bekomen voor de Butterworth filter. Zowel de filtering en als de frequentieanalyse zal aan de hand van software gebeuren.

### 7.3.2 Frequentie-analyse

Deze methode wordt toegepast om de overbodige signalen weg te filteren. Onder overbodige signalen verstaat men (bv.) de trillingen afkomstig van het kristal van de sensor, de behuizing van de sensor, de luchtspleet en de elektrische ruis. De Fourier-transformatie is een wiskundig algoritme dat discrete signalen afkomstig van de analoog-digitaal-omzetter kan opsplitsen. Door een golfvormig signaal op te splitsen in al zijn grondfrequenties, komt men meer te weten over de eigenschappen van dat signaal. Wanneer een signaal voorgesteld wordt in het tijdsdomein, geeft de voorstelling de grootte van de amplitude en vorm weer. Dikwijls is men meer geïnteresseerd in de frequentie-inhoud van het signaal. Door te werken in het frequentiedomein zal de frequentie-inhoud duidelijk worden. Dit is eigenlijk wat een Fourier-transformatie doet, met name het omzetten van gegevens in het tijdsdomein naar een frequentiedomein. De snelste methode om dit te realiseren is via de FFT (Fast Fourier-transformatie).



Figuur 60: Frequentie analyse.[4]

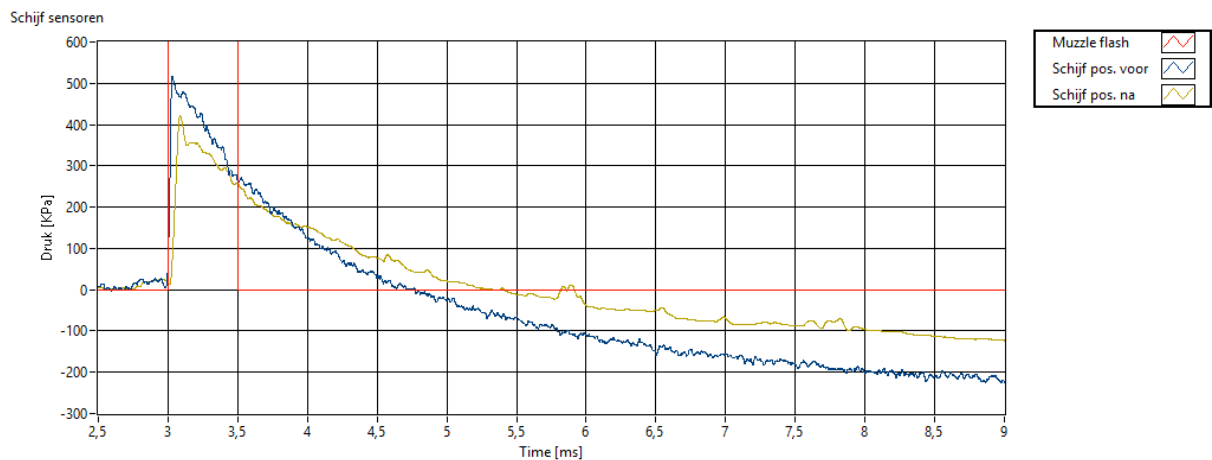
In de bijlage A zijn alle frequentiespectrums voor ieder signaal terug te vinden. Het eerste signaal is de kamerdruk, waarbij men constateert dat bij het vermogenspectrum van het niet-gefilterde signaal vanaf 22 000 Hz veel ruis optreedt. Dit heeft tot gevolg dat er vanaf deze frequentie gefilterd zal worden. Als nu het vermogenspectrum van het niet-gefilterde signaal en het gefilterde signaal met elkaar worden vergeleken, merkt men dat vanaf 22 000 Hz de helling van het gefilterde signaal steiler wordt. De amplitude zal veel meer verzwakt worden. Het gefilterde signaal behoudt zijn oorspronkelijke vorm, maar alle parasitaire signalen zijn weggefilterd. Dit signaal is voor deze toepassing het meest bruikbare signaal. Aan de hand van deze werkwijze zal de afsnijfrequentie bepaald worden voor de andere signalen. Dit geeft volgende parameterinstellingen.

Kanaal 0	Kamerdruk	22 000 Hz
Kanaal 1	Mondingsdruk	30 000 Hz
Kanaal 2	Sensor pos. voor	22 000 Hz
Kanaal 3	Sensor pos. na	12 000 Hz
Kanaal 4	Blast 0°	25 000 Hz
Kanaal 5	Blast 45°	18 000 Hz
Kanaal 6	Blast 90°	22 000 Hz
Kanaal 7	Blast 135°	18 000 Hz

Tabel 2: Parameterinstellingen Butterworth filter.



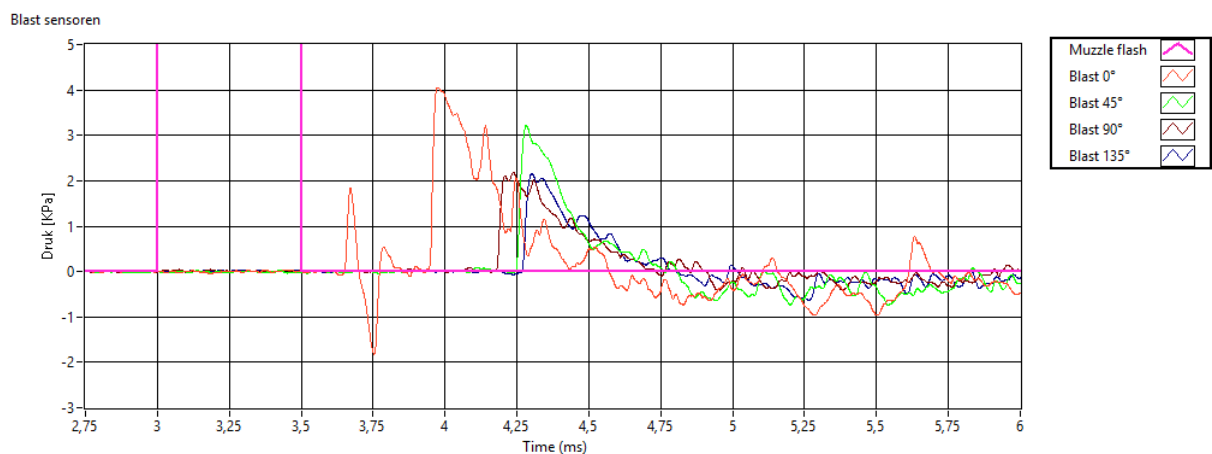
Wanneer al de parameters uit tabel 2 zijn ingesteld, kan er worden overgegaan naar de signaalanalyse van de verschillende signalen. De kamer- en mondingsdruk worden hier niet meer besproken omdat deze signalen niet beïnvloedbaar zijn bij het intermediaire gedeelte van de ballistiek en dus geen invloed hebben op het verdere ontwerp van een mondingsrem. Figuur 61 geeft de signalen weer van de sensoren voor en na de schijf.



Figuur 61: De gemeten drukken voor en achter de schijf.

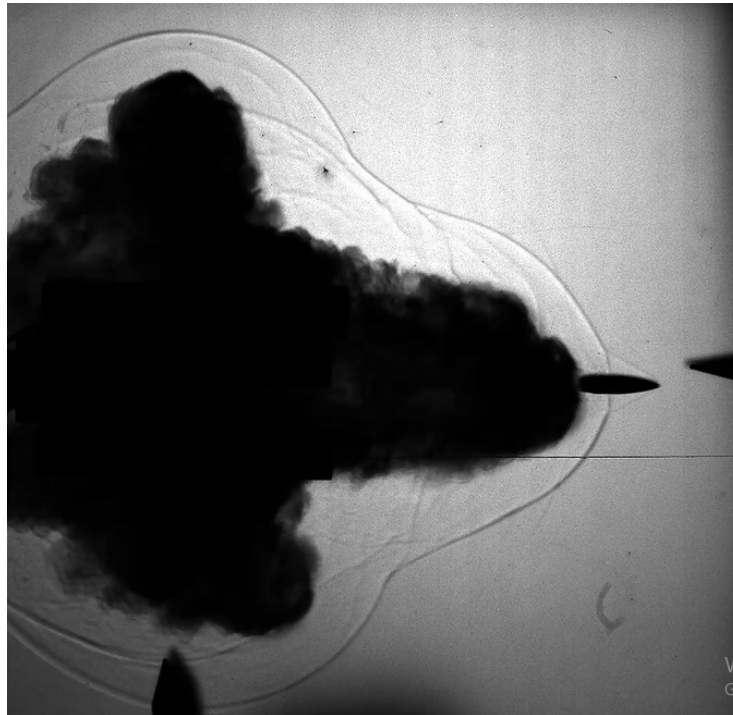
De muzzle flash detecteert de lichtintensiteit waaruit kan worden afgeleid dat het projectiel de loop verlaat op 3 ms. Over het tijdsinterval 0 ms en 2.75 ms zullen de druksensoren de omgevingsdruk meten. Nadien zal de druksensor een kleine drukstijging waarnemen ten gevolge van de precursor waves. Het projectiel verplaatst zich aan een hoge snelheid waardoor de luchtlagen voor het projectiel samengedrukt worden en er een overdruk gecreëerd wordt. Dit zijn de zogenaamde precursor waves die net voor de primaire golven bewegen. Een fractie later zullen de primaire drukgolven arriveren en de sensor voor de schijf zal een drukstijging waarnemen, de maximale druk bedraagt 517,5 kPa. Enkele duizendsten van een seconde later zal de luchtstroom arriveren en de sensor achter de schijf een drukstijging waarnemen waarvan de maximale waarde is vastgesteld op 422 kPa. Na enkele milliseconden kennen beide sensoren een verval terug tot de omgevingsdruk en daalt zelfs tot een gedeeltelijk vacuüm.

Door de hoge temperaturen zal er als het ware aan het kristalelement van de sensor getrokken worden (vervorming van het diafragma) waardoor de sensoren dit weergeven als een onderdruk, terwijl deze druk in werkelijk niet aanwezig is. Figuur 62 geeft de signalen weer die de blast-sensoren meten.



Figuur 62: De gemeten drukken bij de blast-pencils.

De blast-sensor op  $0^\circ$  is de eerste sensor die een drukgolf detecteert. Op 3.6 milliseconden zal de machkegel de blast-sensor op  $0^\circ$  passeren. Dit wordt waargenomen door een sinusvormige puls van ongeveer één periode. Nadat de machkegel gepasseerd is zal de blast sensor  $0^\circ$  een drukpiek waarnemen van 4.04 kPa. De eerst volgende drukgolf die passeert langs een blast-sensor is op  $90^\circ$ , de maximale drukpiek die deze sensor meet is 2.1 KPa. Daarna zal blast-sensor  $45^\circ$  een drukpiek meten van 3.22 kPa. De drukgolven zullen het laatst passeren langs blast-sensor  $135^\circ$  en dit met een drukpiek van 2.15 kPa. Figuur 63 geeft de uitstroming van de gassen weer. Hier is de machkegel duidelijk zichtbaar, dit komt doordat het projectiel beweegt in een luchtlaag. Deze luchtlaag verandert in een cirkel rondom het projectiel en verplaatst zich met de snelheid van het geluid. Het projectiel heeft een hogere snelheid dan de geluidssnelheid waardoor de cirkels een kegel vormen, de machkegel.



Figuur 63: Machkegel.

## 8 LabVIEW

### 8.1 Inleiding

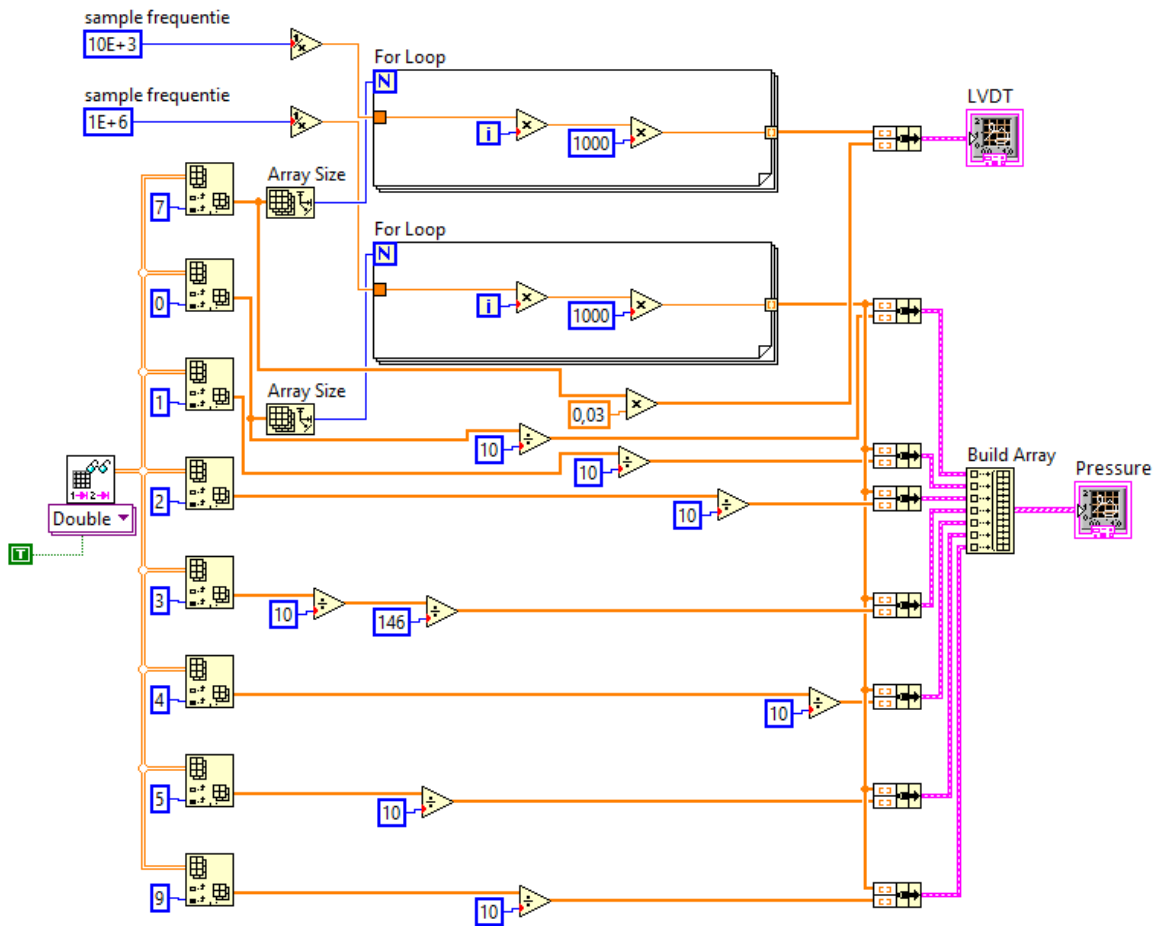
LabVIEW is een softwareprogramma waar het schrijven of de programmataal voornamelijk grafisch gebeurt en in virtuele instrumenten (VI's) onderverdeeld wordt. Het programma richt zich op de uitlezing en de aansturing van elektronische toestellen. Anderzijds is LabVIEW een ideale programmeeromgeving voor simulaties, complexe berekeningen en signaalanalyse.

### 8.2 Verschillende VI's

Drie afzonderlijke programma's zijn geschreven in LabVIEW: een programma voor de signaalverwerking van de verschillende meetopstelling, een programma voor de frequentieanalyse en een programma voor de uiteindelijke meetopstelling.

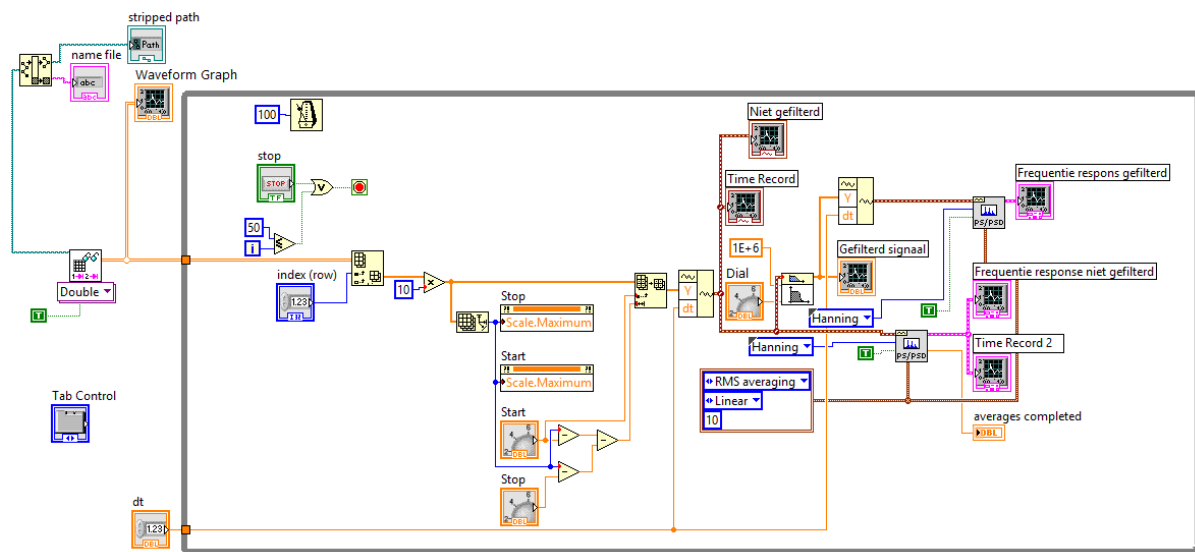
#### 8.2.1 Signaalverwerking voor de verschillende meetopstellingen

Dit programma is geschreven om de gemeten signalen snel weer te geven. Bij dit programma worden de signalen niet gefilterd en of gekalibreerd.



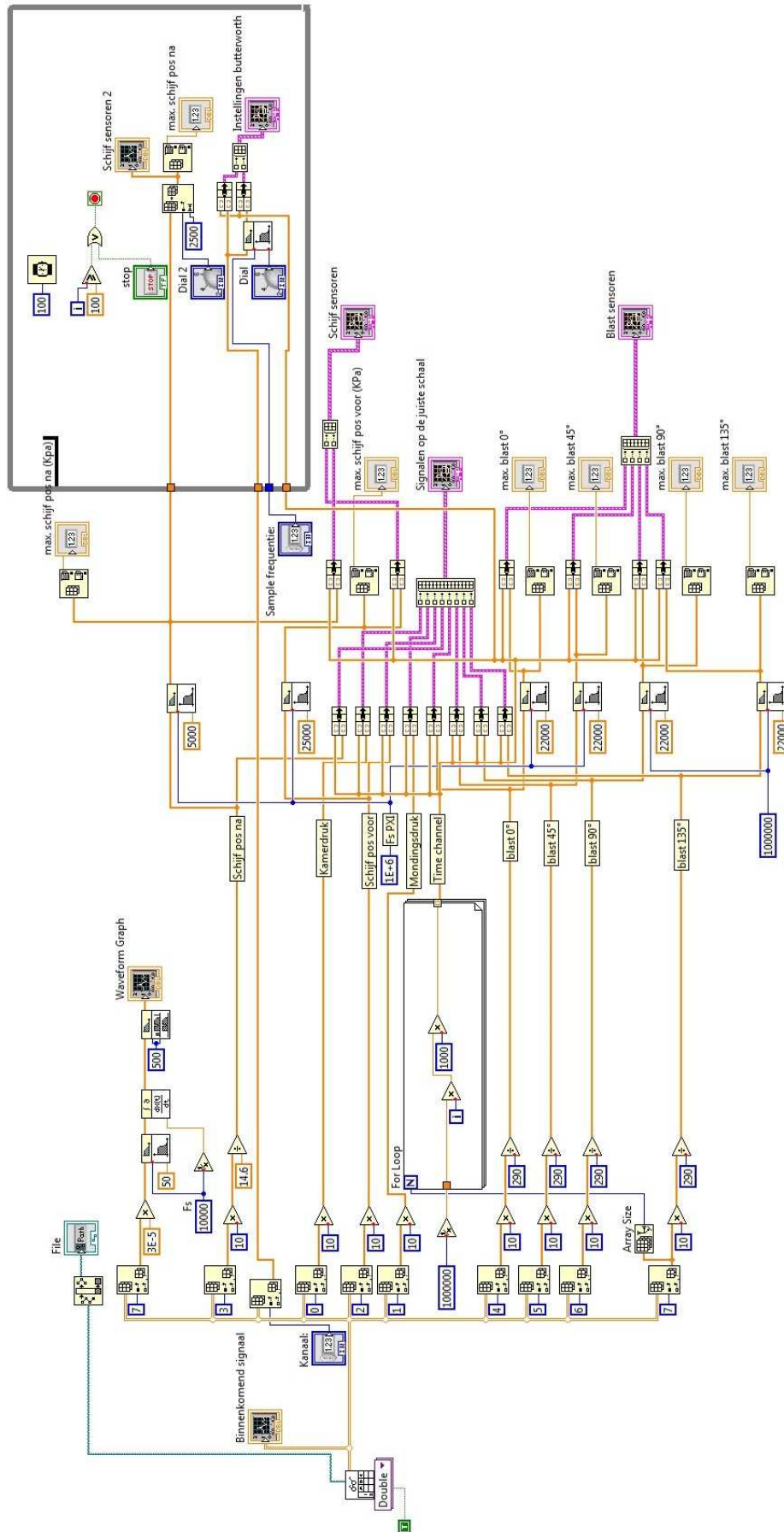
Figuur 64: Voorlopig LabVIEW programma

## 8.2.2 Fast Fourier-transformatie



Figuur 65: LabVIEW programma FFT

## 8.2.3 Signaalconditionering en verwerking voor de uiteindelijke meetopstelling



Figuur 66: LabVIEW programma

## Besluit

Doordat de verschillende fenomenen en stromingen die ingrijpen in en rondom de loop zo complex zijn, is de optimalisatie van zowel de drukmeetopstelling als een ontwikkeling van mondingsrem en loopaccessoire geen eenvoudige zaak. Tijdens de optimalisatie van de meetopstelling moet er rekening gehouden worden met de snelheid van het projectiel, de stromingseigenschappen van de gassen uit de loop en aan de loopmond en tenslotte met de verbranding van de propulsieve lading. Al deze factoren zullen het drukprofiel beïnvloeden.

De optimalisatie van de meetopstelling bestaat voornamelijk uit de selectie van sensoren, het plaatsen van sensoren met behulp van dispositieven en bijhorende schijven en het plaatsen van blast-pencils in de buurt van de loopmond. Om de uitstroming van de gassen in beeld te brengen worden hogesnelheidscamera's gebruikt zodat de gevisualiseerde fenomenen gelinkt kunnen worden aan de meetresultaten die bekomen werden met de sensoren. De visualisatie en post-processing (filtering) van de signalen gebeurt automatisch met een zelf geprogrammeerde VI.

De meetopstelling laat nu toe om negen signalen, waarvan acht druksignalen, te meten. Deze zijn de twee drukken in het wapen, de kamer-en mondingsdruk, de twee druksignalen voor en na de schijf en de vier pencil drukmetingen op respectievelijk  $0^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $135^\circ$  van de schootsas. Alle signalen van de sensoren worden met de juiste gevoeligheden en versterkingen verwerkt. Door de sensorhouder (schijf) te verschuiven in het dispositief en de onderlinge afstand tussen de loopmond en blast-pencils te wijzigen zijn er verschillende combinaties mogelijk.

Toch zijn er een aantal aanpassingen mogelijk die kunnen zorgen voor een betere optimalisatie van de drukmeetopstelling. Voor de uitbating van deze signalen zijn de amplitude en de stijgtijd van de signalen belangrijk. De Bessel filter vertoont hiervoor betere karakteristieken dan een Butterworth filter. Door het gebruik van sensoren met een grotere gevoeligheid kunnen de drukfenomenen nauwkeuriger gemeten worden. Zowel de bekabeling als het diafragma van de sensoren kunnen nog beter beschermd worden. Het diafragma kan beschermd worden door een vetlaag aan te brengen. Het vet zal de sensor beschermen tegen de temperaturen en de vlam van de verbrandingsgassen. Een vernieuwing van het dispositief zou de uitlijning van de schijven vergemakkelijken.

De onderzoekers van het departement wapensystemen en ballistiek kunnen deze meetopstelling en het ontwikkelde programma gebruiken om hun simulaties te valideren. Het rekenwerk dat het programma nodig heeft om het geheel te simuleren valt niet te onderschatten, de gemiddelde rekentijd bedraagt 2 á 3 dagen. De onderzoekers gaan met behulp van een rekenprogramma de stromingen, drukken en temperaturen in en rondom het accessoire berekenen. Met behulp van de ontwikkelde meettechnieken kunnen zij hun resultaten valideren. Ze kunnen nu aan de slag om een mondaccessoire te optimaliseren en/of te ontwikkelen.

## Bibliografie

- [1] Baeten, J. (2006). *Meetsystemen [cursus]*. Diepenbeek: Katholieke Hogeschool Limbrug - Departement IWT.
- [2] Baeten, J. (2006). *Systeemtheorie [cursus]*. Diepenbeek: Katholieke Hogeschool Limburg - Departement IWT.
- [3] Caclucci, D. E., & Jacobson, S. S. (2007). *Ballistics theory and design of guns and ammunition*. Taylor & francis group.
- [4] Doucet, A. (2000). *Het bepalen van het snelheidsprofiel van een projectiel in een vuurwapen*. Leuven: GroepT.
- [5] Dyckmans, G. (sd). *Grondbeginselen van de ballistiek*. België: Koninklijke Militaire School - Departement wapensystemen & ballistiek.
- [6] High Pressure instrumentation. Opgeroepen op oktober 10, 2015, van BALLISTIC INSTRUMENTATION & MEASUREMENT SYSTEMS - TEST EQUIPMENT - PROTECTION MATERIAL TESTING - Piezoelectric High Pressure Transducers - GP Series [online]: [http://www.hpi-gmbh.com/redesign/products\\_17b.htm](http://www.hpi-gmbh.com/redesign/products_17b.htm)
- [7] Kegels, J. (2012). *De invloed van loopaccessoires op de kinematica van machinegeweren*. Brussel: Koninklijke Militaire School - Departement Ballistiek.
- [8] kistler. (2015, oktober 22). *Charge amplifier*. Opgehaald van [http://www.intertechnology.com/Kistler/pdfs/ACC\\_5011B\\_Charge\\_Amplifier.pdf](http://www.intertechnology.com/Kistler/pdfs/ACC_5011B_Charge_Amplifier.pdf)
- [9] Lamoré. (2007). *5.3.1(2). Signalen - Wiskundige beschrijving en analyse [online]* . Opgeroepen op november 20, 2015, van <http://www.audiologieboek.nl/hfm/hfd5/5-3-1.htm#5315>
- [10] Ordtech. (2015, december 9). Opgehaald van Ordtech UH-1H Helicopter with 0.50" (12.7 x 99 mm) machine gun M2 [online] : [http://www.ordtech-industries.com/2products/gunships/UH1H\\_050.html](http://www.ordtech-industries.com/2products/gunships/UH1H_050.html)
- [11] Ottevaere , S., & Vandeveldde, G. (2013). *Ballistiek schieten [online]* . Opgeroepen op oktober 8, 2015, van <http://www.derbyschutters.be/images%20derby/Ballistiek.pdf>
- [12] PCB piezotronics. (sd). Opgeroepen op oktober 30, 2015, van Dynamic pressure sensor for high frequency measurements [online] : [http://www.pcb.com/Linked\\_Documents/Pressure/TM\\_PRS\\_113B\\_102B\\_Lowres.pdf](http://www.pcb.com/Linked_Documents/Pressure/TM_PRS_113B_102B_Lowres.pdf)
- [13] PCB Piezotronics. (2015, oktober 10). Opgehaald van Introduction to Piezoelectric Pressure Sensors [online] : [https://www.pcb.com/techsupport/tech\\_pres.aspx](https://www.pcb.com/techsupport/tech_pres.aspx)
- [14] piezotronics, P. (30, oktober 2015). *PCB Products [online]*. Opgehaald van <https://www.pcb.com/products.aspx?s=482C>
- [15] Pintelon, R. (2012, maart 13). Opgeroepen op november 5, 2015, van Netwerken en Filters [online] : <file:///C:/Users/Jonas/Downloads/synthese.pdf>
- [16] Saxion. (2015, oktober 4). Opgehaald van piëzo in product design [online] : [http://www.saxion.nl/wps/wcm/connect/532efa3e-8037-4fc9-84ea-6056d6566026/IMPT\\_Pi%C3%ABzo\\_v0.1.pdf?MOD=AJPERES](http://www.saxion.nl/wps/wcm/connect/532efa3e-8037-4fc9-84ea-6056d6566026/IMPT_Pi%C3%ABzo_v0.1.pdf?MOD=AJPERES)
- [17] Van Dam, A. (1998, maart 2). Opgeroepen op december 7, 2015, van De Fast Fourier Transformatie [online] : <http://www.eye-home.net/study/cs/fourier1998/fourier1998.pdf>

- [18] Van Houtven, P. (9, januari 2016). *Actieve filters [online]*. Opgehaald van <https://www.coursehero.com/file/13040677/09-Actieve-fiilters/>
- [19] Walter, P. L. (2004, december). Opgeroepen op november 15, 2015, van Air-Blast and the Science of Dynamic Pressure Measurements [online] : <http://www.sandv.com/downloads/0412walt.pdf>
- [20] Wouters, S., & Wieërs, E. (2012). *Fysica voor industrieel ingenieurs,schakelprogramma*. Italy: Pearson.

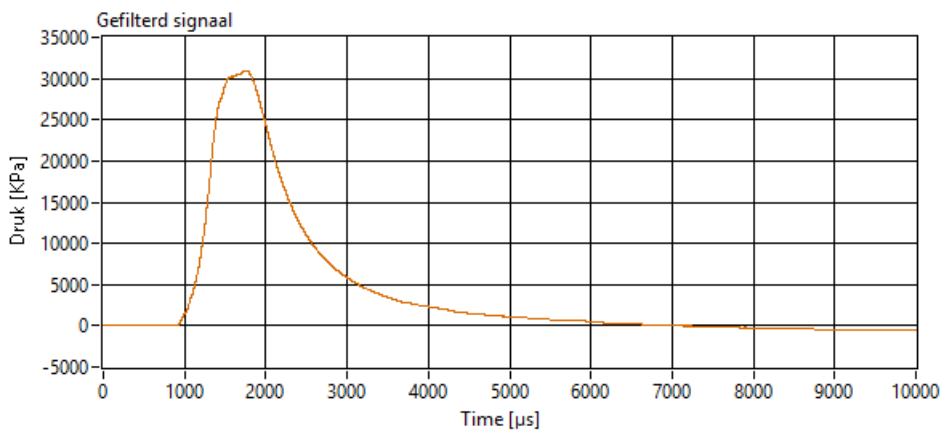
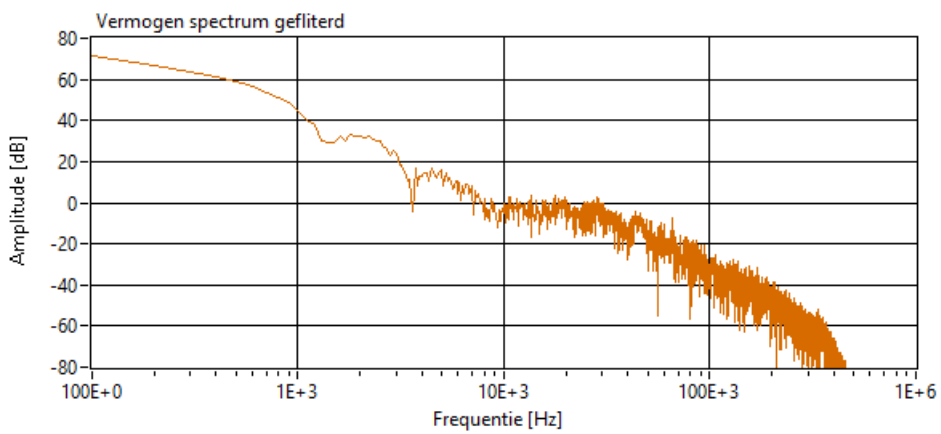
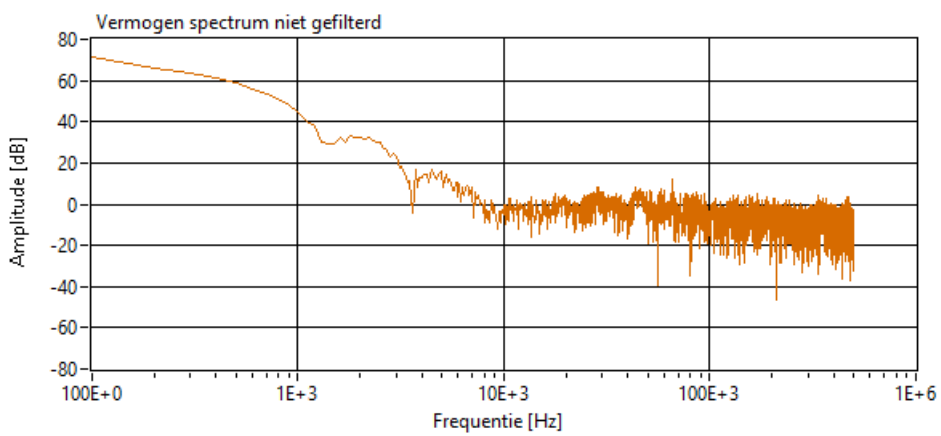
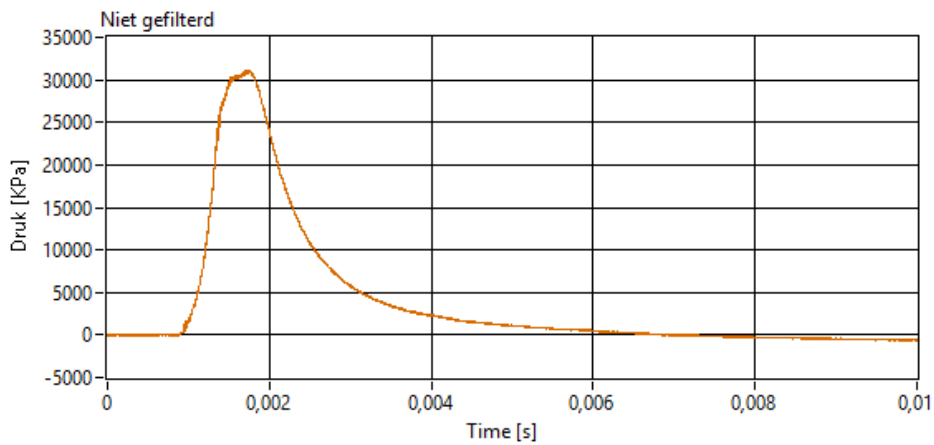


## Bijlagen

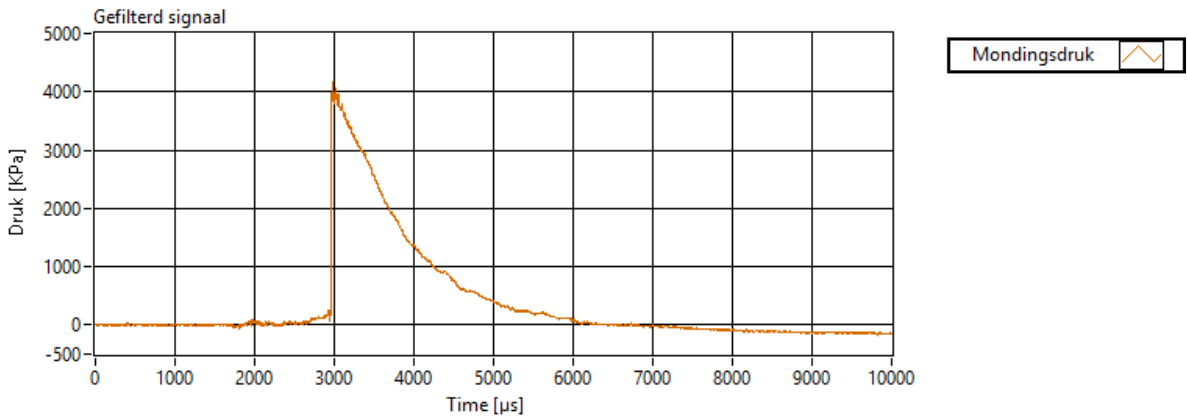
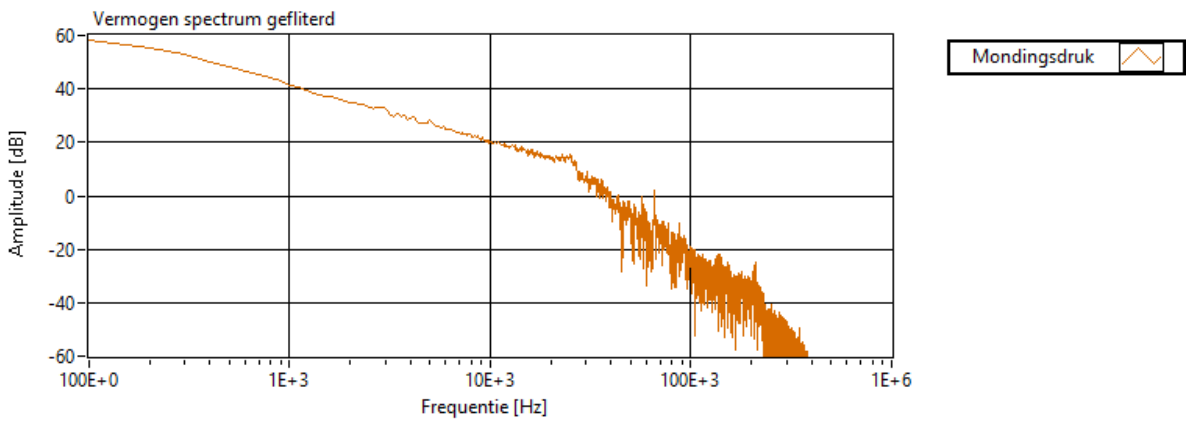
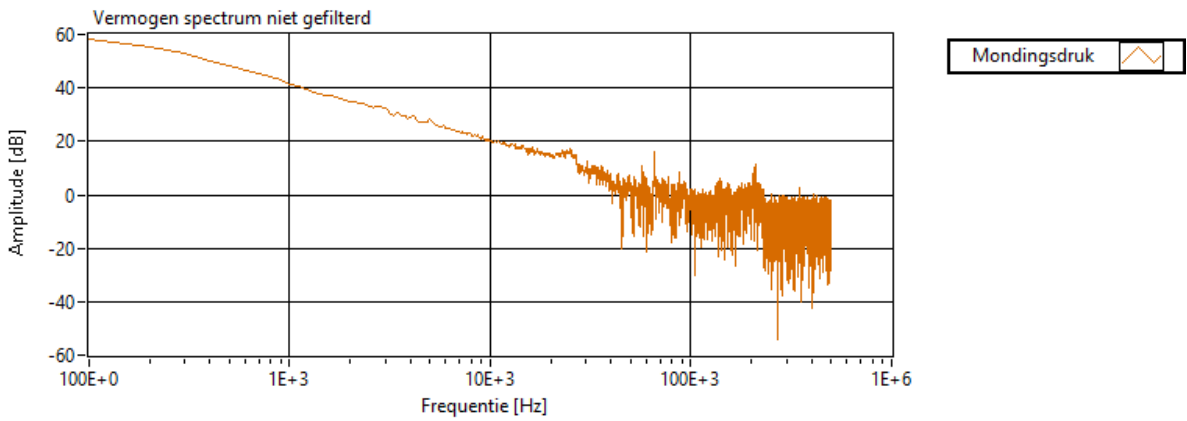
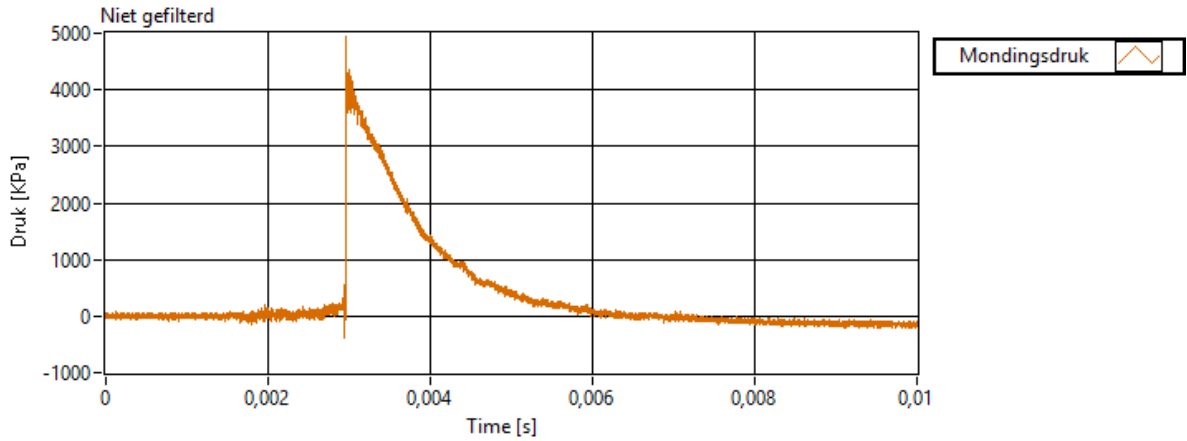
Bijlage A: Frequentieanalyse .....	63
Bijlage B: De gebruikte kanalen op de PXI.....	71
Bijlage C: Gebruikte sensoren .....	73
Bijlage D: Tekeningen ontworpen schijven .....	79

# Bijlage A: Frequentieanalyse

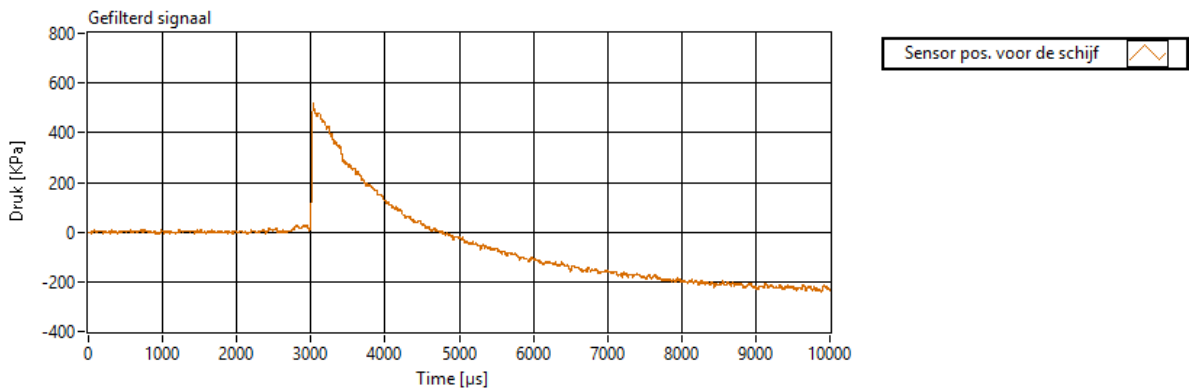
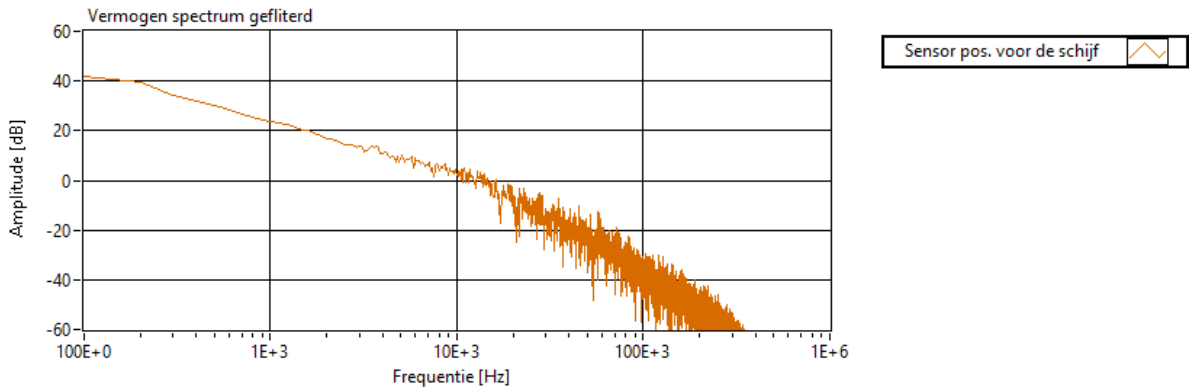
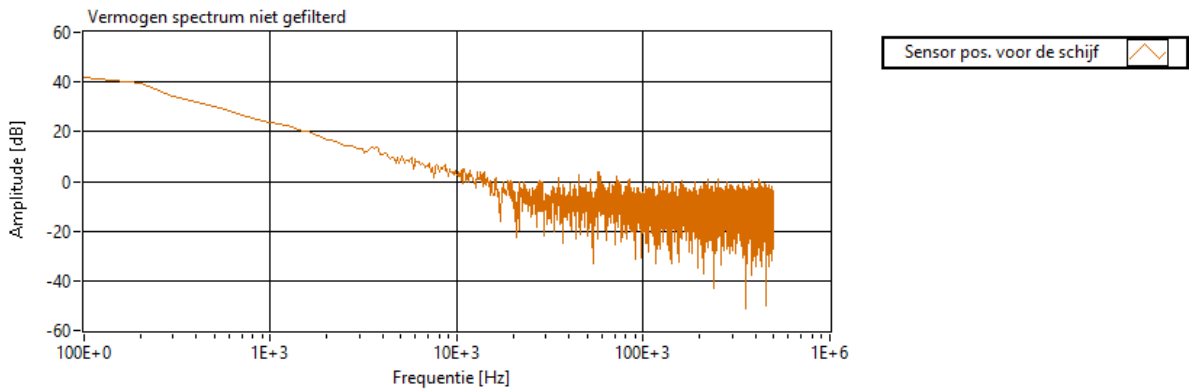
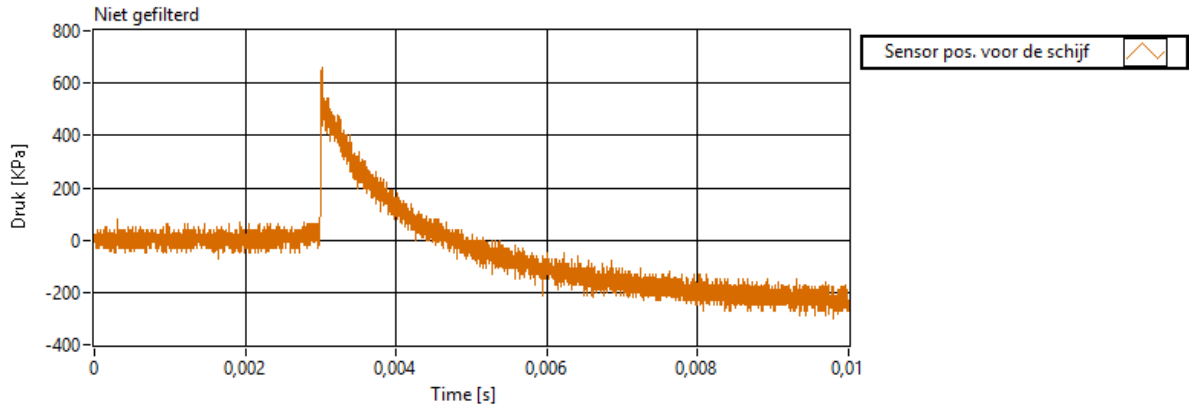
Toegepast op de kamerdruk



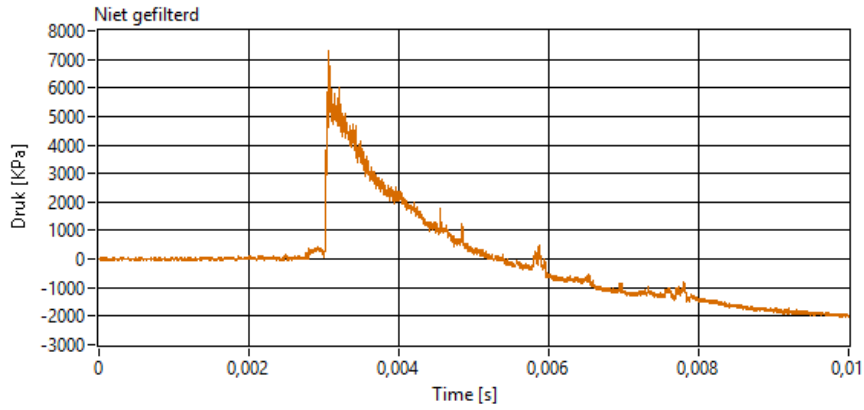
Toegepast op de mondingsdruk



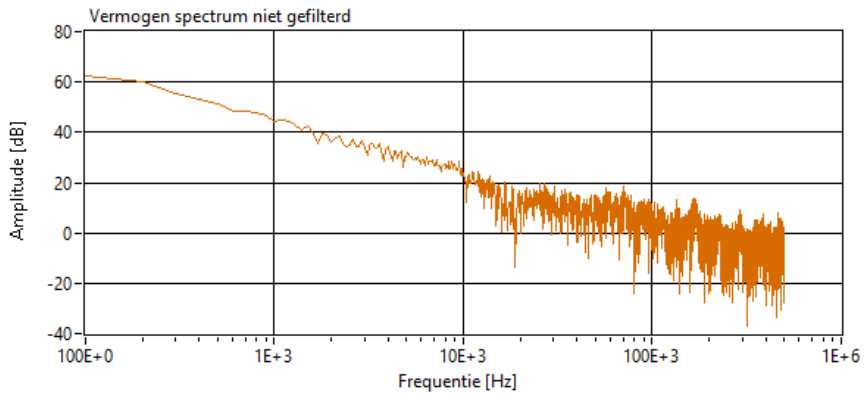
*Toegepast op de sensorpositie voor de schijf*



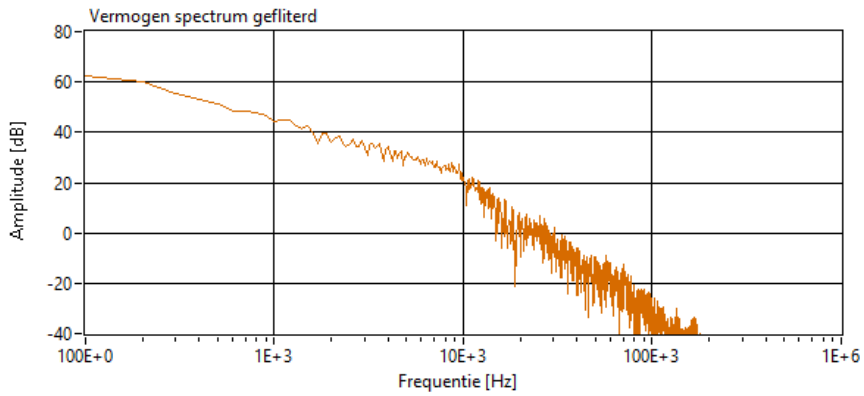
*Toegepast op de sensorpositie na de schijf*



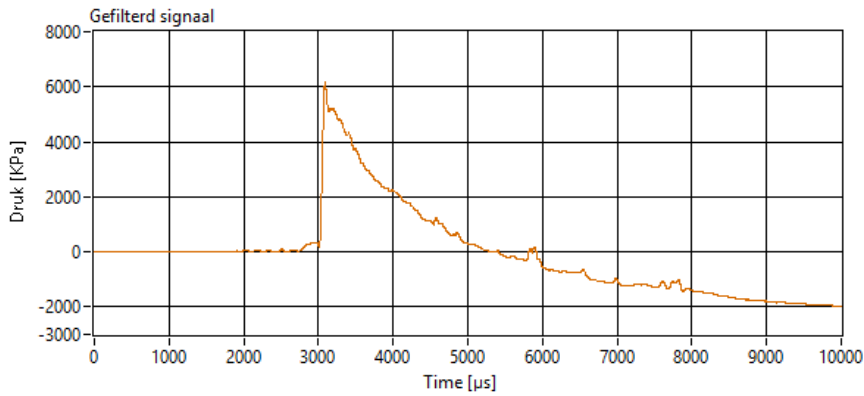
Sensor pos. na de schijf



Sensor pos. na de schijf

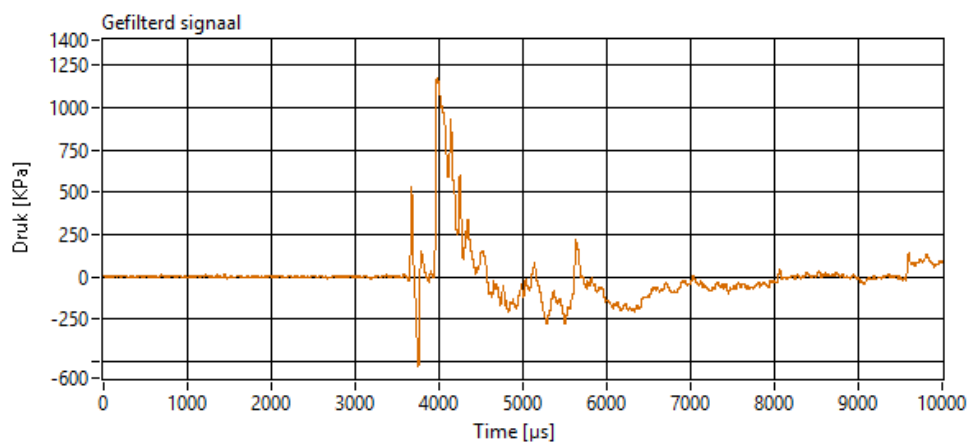
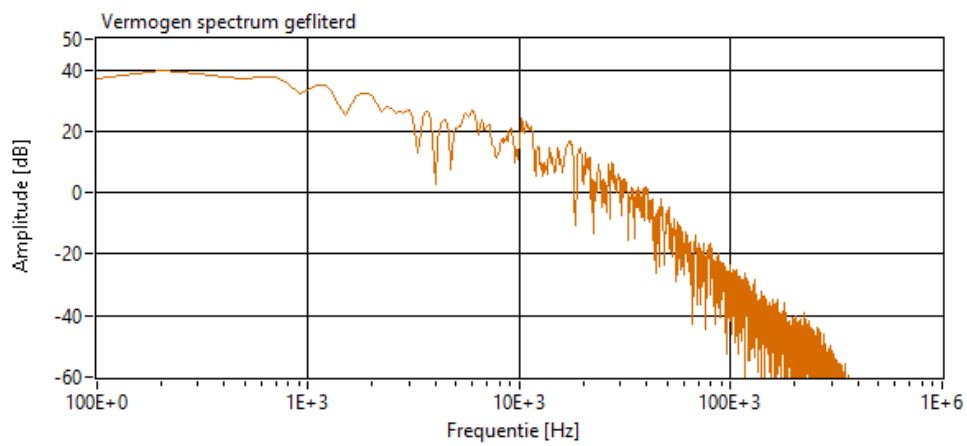
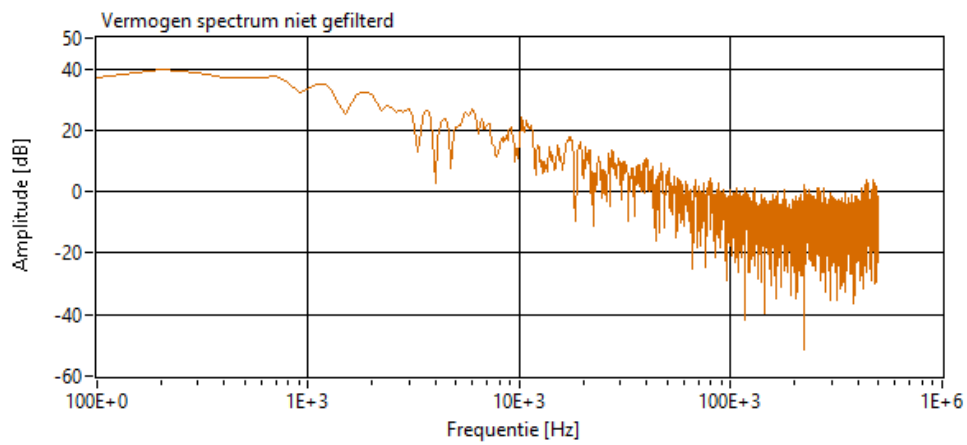
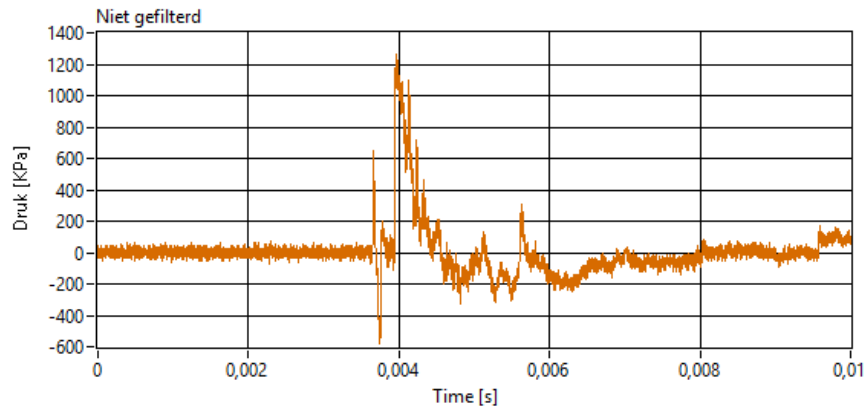


Sensor pos. na de schijf

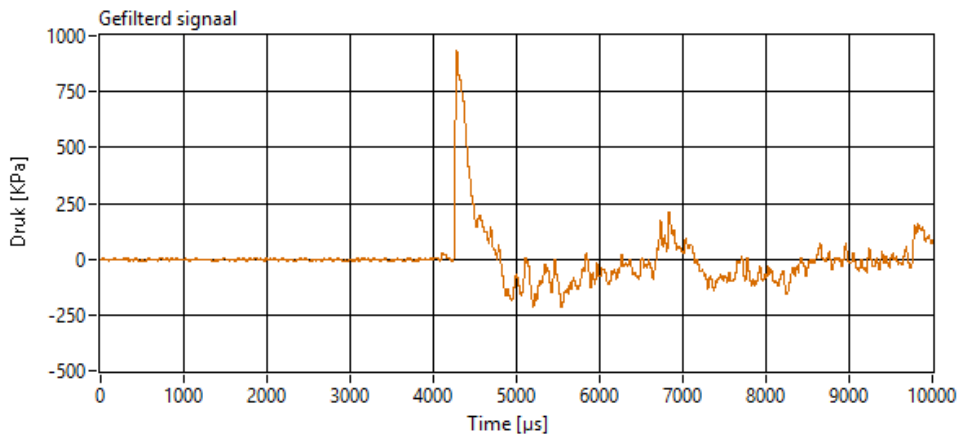
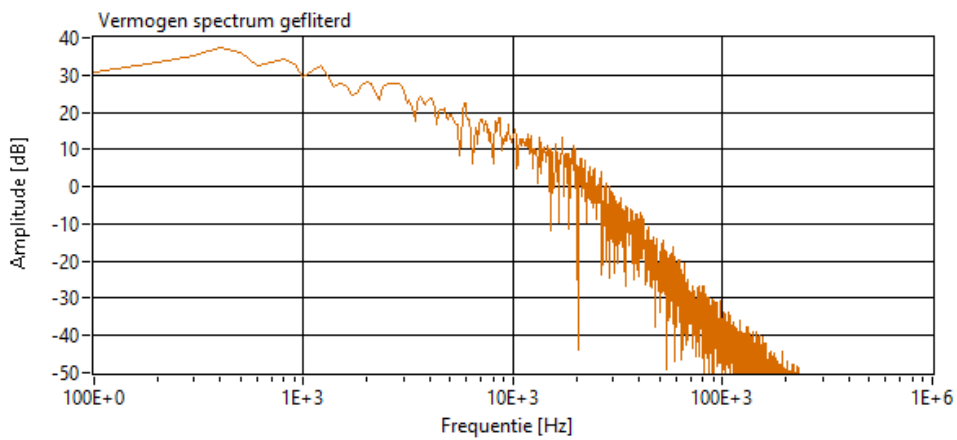
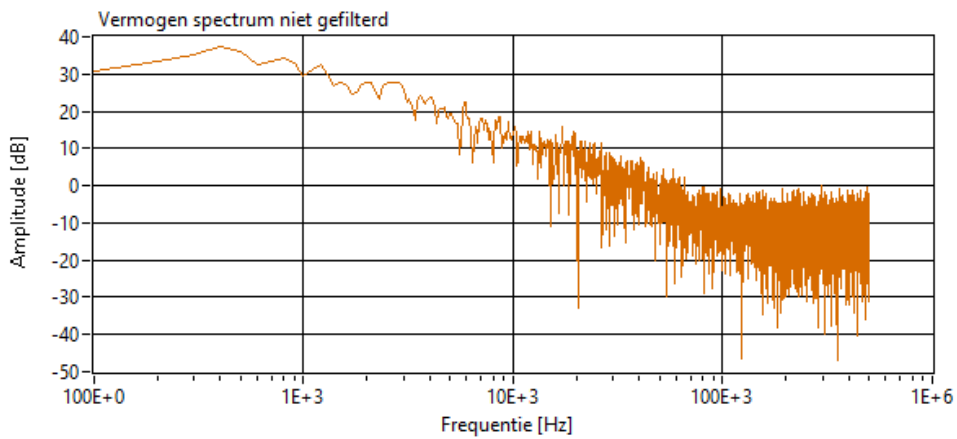
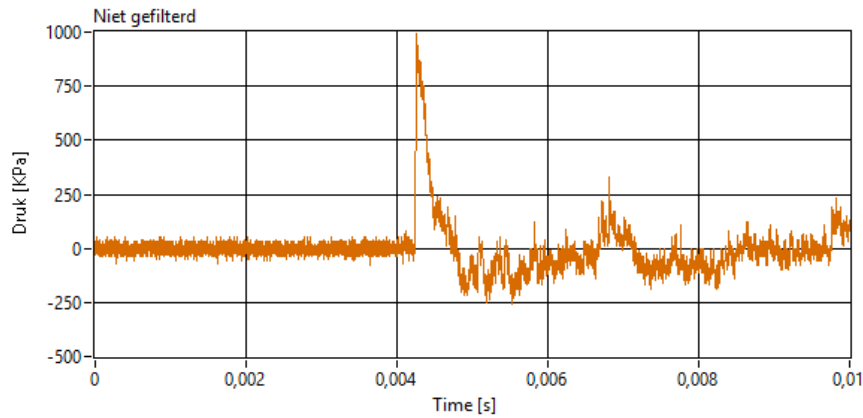


Sensor pos. na de schijf

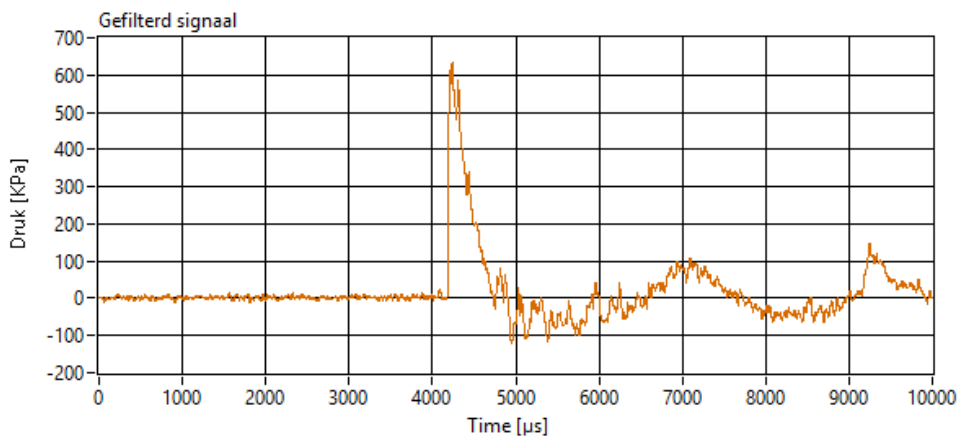
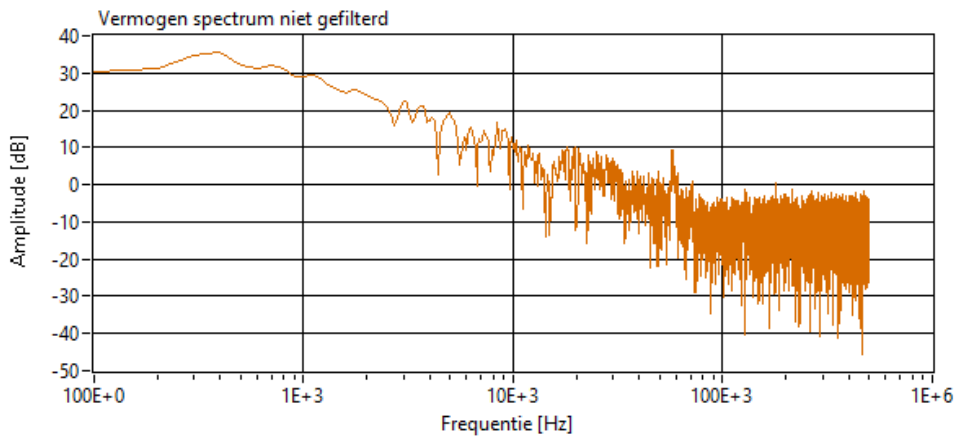
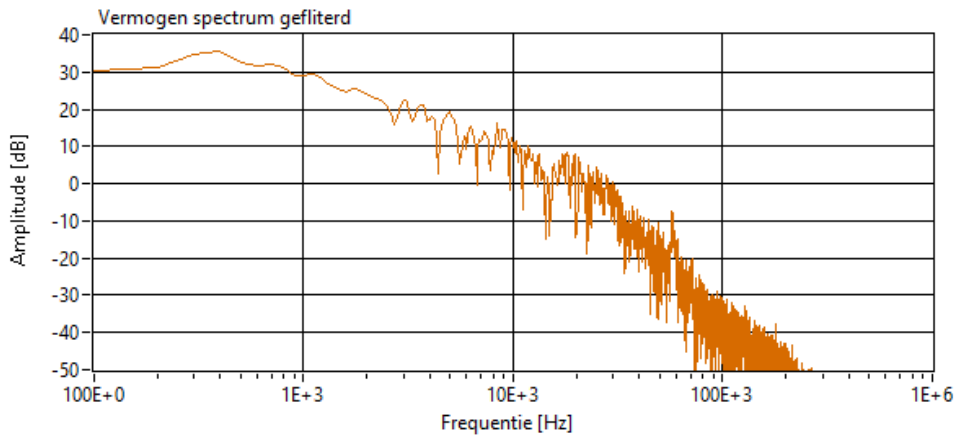
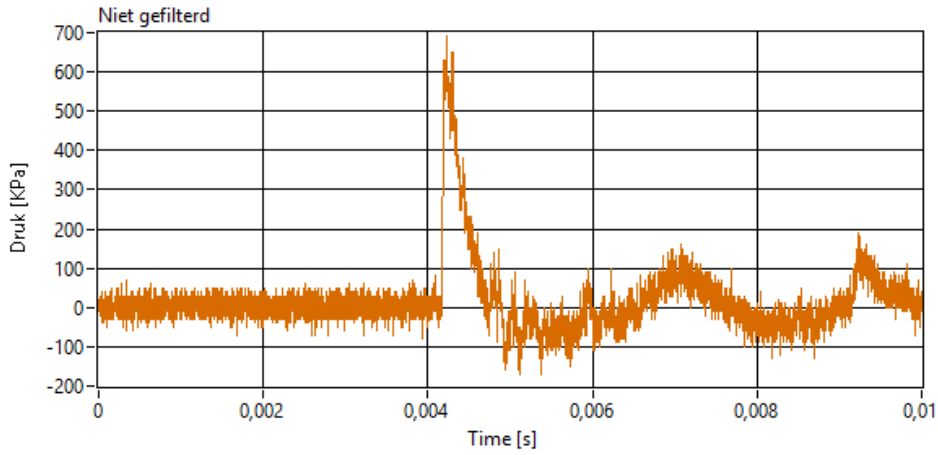
Toegepast op blast-pencil 0°



Toegepast op blast-pencil 45°

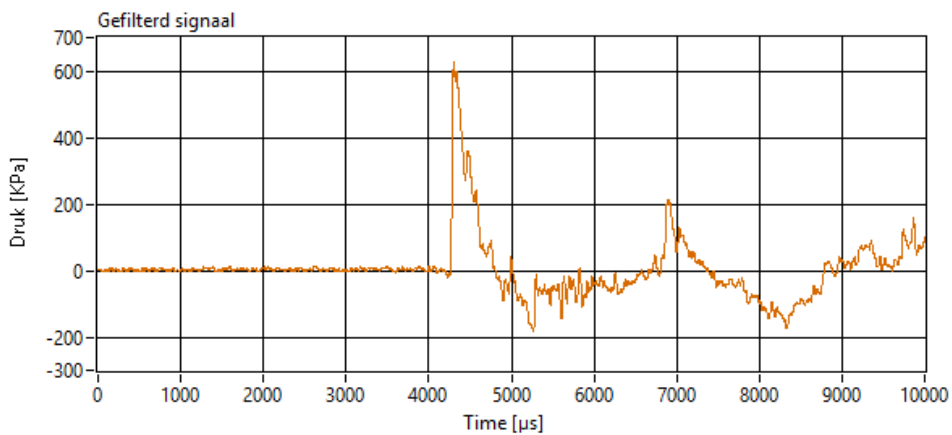
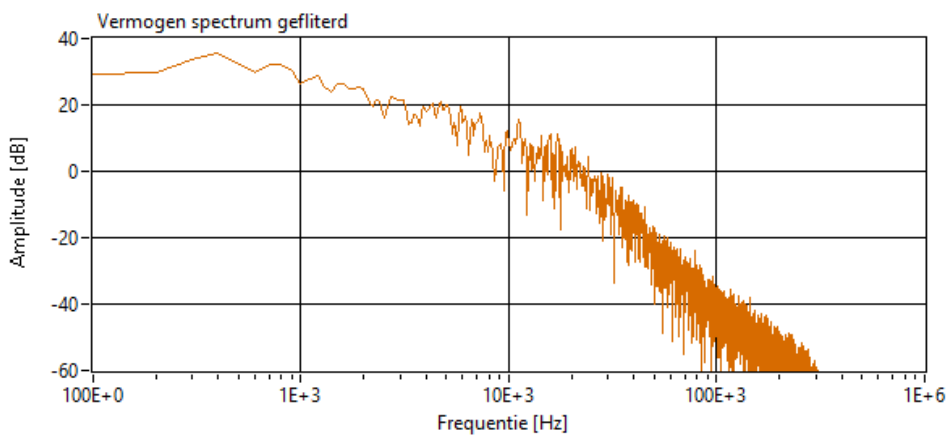
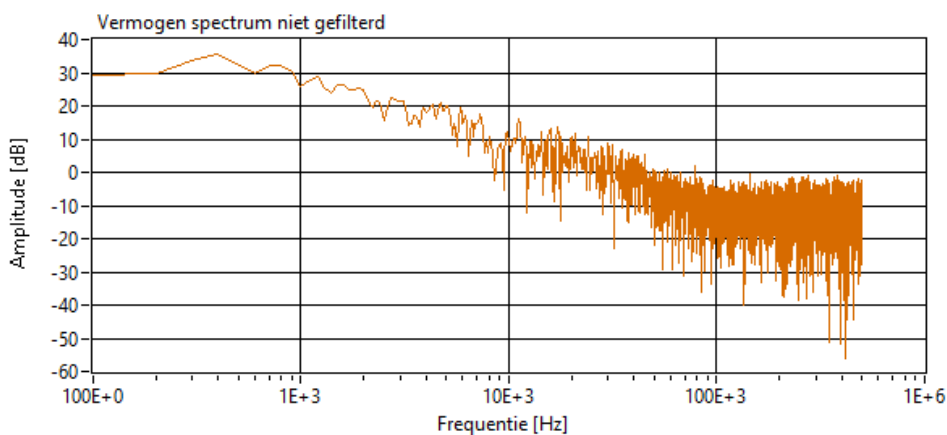
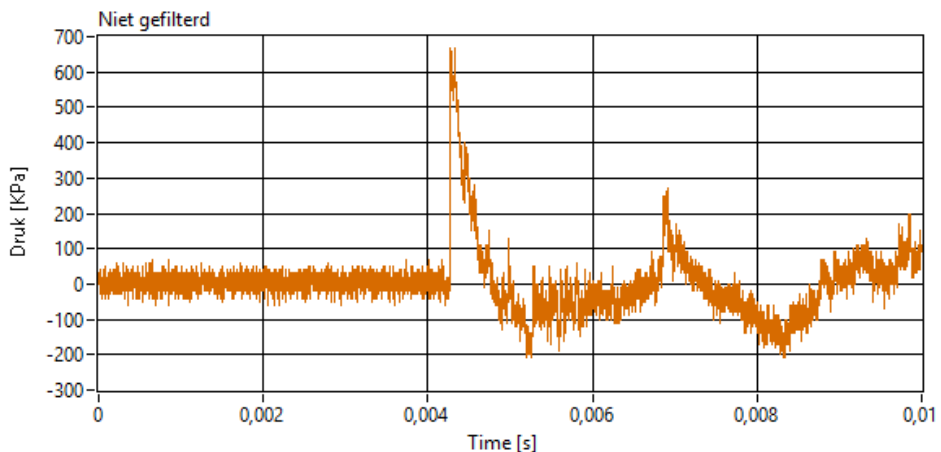


Toegepast op blast-pencil 90°





Toegepast op blast-pencil 135°



## Bijlage B: De gebruikte kanalen op de PXI

*Drukmeting inwendige ballistiek.*

	Soort meting	Type
Kanaal 0	Muzzle flash	Derello MBS 403
Kanaal 1	Kamerdruk	GP6 SN6548
Kanaal 2	Mondingsdruk	M165A01 SN1801
Kanaal 7	LVDT	

*Meetopstellingen met het dispositief.*

	Soort meting	Type
Kanaal 0	Muzzle flash	Derello MBS 403
Kanaal 1	Kamerdruk (rood)	GP6 SN6548
Kanaal 2	Mondingsdruk	M165A01 SN1801
Kanaal 4	Sensor 1	7804
Kanaal 5	Sensor 2	7805
Kanaal 6	Sensor 3	7758
Kanaal 7	LVDT	

*Meetopstelling met Kistler sensoren.*

	Soort meting	Type
Kanaal 0	Muzzle flash	Derello MBS 403
Kanaal 1	Kamerdruk	GP6 SN6548
Kanaal 2	Mondingsdruk	M165A01 SN1801
Kanaal 3	Voor de schijf	SN 156 5846
Kanaal 4	Achter de schijf	SN 154 1592
Kanaal 7	LVDT	

*Meetopstelling met geoptimaliseerde sensorhouder.*

	Soort meting	Type
Kanaal 0	Muzzle flash	Derello MBS 403
Kanaal 1	Loop3	M165A01 SN1801
Kanaal 2	Voorste sensor	113B03 SN 25187
Kanaal 3	Achterste sensor	102B SN32238
Kanaal 7	LVDT	

*Meetopstelling met een onderlinge afstand van 47mm tussen de loopmond en sensorhouder.*

	Soort meting	Type
Kanaal 0	Muzzle flash	Derello MBS 403
Kanaal 1	Mondingsdruk	M165A01 SN1801
Kanaal 2	Voorste sensor	113B03 SN 25187
Kanaal 3	Achterste sensor	102B SN32238
Kanaal 4	Kamerdruk	GP6 SN6548
Kanaal 7	LVDT	

*Meetopstelling met een onderlinge afstand van 30mm tussen de loopmond en sensorhouder.*

	Soort meting	Type
Kanaal 0	Muzzle flash	Derello MBS 403
Kanaal 2	Voorste sensor	113B03 SN 25187
Kanaal 3	Achterste sensor	102B SN32238
Kanaal 4	Kamerdruk	GP6 SN6548
Kanaal 7	LVDT	

*Meetopstelling met blast-pencils.*

	Soort meting	Type
Kanaal 0	Muzzle flash	Derello MBS 403
Kanaal 1	Kamerdruk	GP6 SN6548
Kanaal 2	Blast sensor op 0°	137A22 SN9922
Kanaal 3	Blast sensor op 45°	137A21 SN1011
Kanaal 4	Blast sensor op 90°	137A22 SN9054
Kanaal 5	Blast sensor op 135° (-45°)	137A23 SN9856
Kanaal 6	Microfoon	
Kanaal 7	LVDT	

*De uiteindelijke meetopstelling voor het meten van de intermediaire ballistiek.*

	Soort meting	Type
Kanaal 0	Kamerdruk	GP6 SN6548
Kanaal 1	Mondingsdruk	M165A01 SN1801
Kanaal 2	Sensor pos. voor de schijf	113B03 SN25187
Kanaal 3	Sensor pos. na de schijf	102B SN32238
Kanaal 4	Blast sensor op 0°	137A24 SN6938
Kanaal 5	Blast sensor op 45°	137A24 SN7223
Kanaal 6	Blast sensor op 90°	137A24 SN7512
Kanaal 7	Blast sensor op 135° (-45°)	137A24 SN6939

## Bijlage C: Gebruikte sensoren

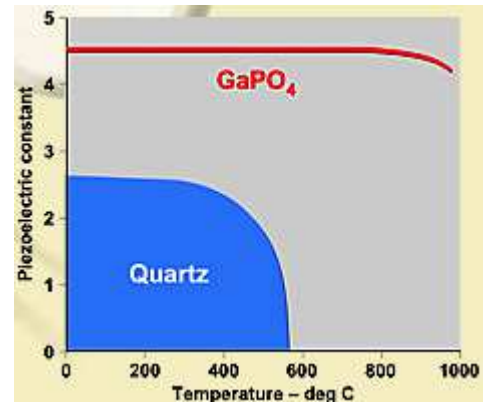
### HPI GP6 SN6548

Deze piëzo-elektrische sensor bezit GaPO<sub>4</sub> kristallen. Deze kristallen zijn beter bestand tegen hoge temperaturen dan de quartz kristallen wat duidelijk wordt weergegeven in de onderstaande grafiek.

De temperatuur die vrijkomt in de kamer heeft de grootste waarde vandaar dat dit type sensor gekozen wordt voor het meten van de kamerdruk. De sensor kan drukken meten tot 600 MPa. De gevoeligheid wordt afgelezen op de verpakking waarin de sensor zich bevindt en wordt uitgedrukt in pC/bar ook hier moet een ladingsversterker aanwezig zijn die de lading omvormt naar een bruikbare spanning. De druk in de kamer kan oplopen tot 400 MPa de gevoeligheid die bij deze druk hoort is 3,28 pC/bar of 32,8 pC/MPa.

De instellingen van de parameters op de ladingsversterker ziet er als volgt uit:

Transducer	T = 3,28
Scale	S = 1,00 * 10 <sup>3</sup>
Filter (low pass)	LP = OFF
Time constant (high pass filter)	TC = 10 s



	GP 2	GP 6	GP 8
Measuring range, MPa	200	600	800
Overload, MPa	240	640	840
Sensitivity (nom.), pC/MPa	55	30	25
Linearity, %	≤ ± 0.5	≤ ± 0.5	≤ ± 0.5
Operating temperature, °C	-50...200	-50...200	-50...200
Temp. Coefficient, %/°C	-0.01	-0.01	-0.01
Insulation resistance at 20°C, Ohm	≥ 10 <sup>13</sup>	≥ 10 <sup>13</sup>	≥ 10 <sup>13</sup>
Natural frequency, kHz	≥ 240	≥ 240	≥ 240
Rise time, μs	≤ 1	≤ 1	≤ 1
Acceleration sensitivity axial, MPa/g radial, MPa/g	0.0002 0.0005	< 0.0002 < 0.0005	0.0002 0.0005
Schock resistance axial, g radial, g	25000 10000	25000 10000	25000 10000
Mounting thread, mm	M10 x 1	M10 x 1	M10 x 1
Mounting torque, Nm	20	20	20
Weight, grams	12	12	12
Cable connector	Microdot 10-32UNF	Microdot 10-32UNF	Microdot 10-32UNF

### PCB model M165A01

Deze piëzo-elektrische sensor kan drukken aan tot 641 212 kPa. Aan het einde van het vuurwapen kan de druk oplopen tot 300 bar. Deze sensor is bestand tegen hoge temperaturen en voldoet aan de belangrijkste voorwaarden. De gevoeligheid van de sensor wordt uitgedrukt in pC/kPa. Hoe kleiner de

gevoeligheid hoe nauwkeuriger de meetresultaten zijn. Op de datasheet hieronder staat een algemene gevoeligheid voor dit sensor model. Maar gevoeligheid is bij elk type van deze sensor verschillend in dit geval is de gevoeligheid 22,60 pC/MPa. Dit is één van de parameters die worden ingesteld op de ladingsversterker.

De instellingen van de parameters op de ladingsversterker zien er als volgt uit:

Transducer	T = 2,26
Scale	S = 1,00 *10 <sup>3</sup>
Filter ( low pass)	LP = OFF
Time constant (high pass filter)	TC = 10 s



Model Number 165A01	CHARGE PRESSURE SENSOR		Revision: G ECN #: 41157
<b>Performance</b>	<b>ENGLISH</b>	<b>SI</b>	<b>OPTIONAL VERSIONS</b>
Sensitivity(± 15 %)	0.150 pC/psi	0.0218 pC/kPa	Optional versions have identical specifications and accessories as listed for the standard model except where noted below. More than one option may be used.
Measurement Range	87 kpsi	599,844 kPa	[1] H - Hermetic Seal
Maximum Pressure(static)	93 kpsi	641,212 kPa	[2] M - Metric Mount Supplied Accessory : Model 065A59 Baffle
Resolution	20 mpsi	0.14 kPa	P - Positive Output Polarity
Resonant Frequency	≥ 250 kHz	≥ 250 kHz	<b>NOTES:</b>
Rise Time(Reflected)	≤ 2 μ sec	≤ 2 μ sec	[1] Resolution dependent on range setting and cable length used in charge system.
Non-Linearity	≤ 2 % FS	≤ 2 % FS	[2] Zero-based, least-squares, straight line method.
<b>Environmental</b>			<b>SUPPLIED ACCESSORIES:</b>
Acceleration Sensitivity	≤ 0.02 psi/g	≤ 0.007 kPa/(m/s <sup>2</sup> )	Model 065A57 Seal ring 0.626" OD x 0.221" ID x 0.14" thk (3)
Temperature Range(Operating)	-100 to +400 °F	-73 to +204 °C	Model 065A60 Baffle (1)
Temperature Coefficient of Sensitivity	≤ 0.03 %/°F	≤ 0.018 %/°C	
Maximum Flash Temperature	3000 °F	1650 °C	
Maximum Shock	20,000 g pk	196,200 m/s <sup>2</sup> pk	
<b>Electrical</b>			
Capacitance	4 TO 6 pF	4 TO 6 pF	
Insulation Resistance(at room temp)	≥ 10 <sup>12</sup> Ohm	≥ 10 <sup>12</sup> Ohm	
<b>Physical</b>			
Sensing Element	Quartz	Quartz	
Sensing Geometry	Compression	Compression	
Housing Material	Stainless Steel	Stainless Steel	
Diaphragm	316L Stainless Steel	316L Stainless Steel	
Sealing	Epoxy	Epoxy	
Electrical Connector	10-32 Coaxial Jack	10-32 Coaxial Jack	
Weight	0.4 oz	11 gm	
All specifications are at room temperature unless otherwise specified. In the interest of constant product improvement, we reserve the right to change specifications without notice. ICP® is a registered trademark of PCB Group, Inc.			
Entered: AP		Engineer: RPF	Sales: RWM
Date: 3/27/2013	Date: 3/27/2013	Date: 3/27/2013	Date: 3/27/2013
			Approved: APB
			Spec Number: 5748
			Phone: 716-684-0001 Fax: 716-684-0987 E-Mail: info@pcb.com
3425 Walden Avenue, Depew, NY 14043			

### PCB model M109C12

Dit is een piëzo-elektrische sensor die een meetbereik heeft van 690 000 kPa. In totaal zijn er drie sensoren gebruikt van dit model. De sensoren zijn bevestigd op de schijf en, deze is op zijn beurt op een variabele afstand bevestigd achter het uiteinde van de loop. De gevoeligheid van dit model sensoren is opnieuw af te lezen uit de onderstaande datasheet waarbij, de gevoeligheid 0,010mV/kPa bedraagt. Merk op dat de gevoeligheid hier wordt uitgedrukt in mV/kPa. Om de opgewekte spanning afkomstig van de sensor om te vormen naar een evenredig bruikbare spanning zal er gebruik gemaakt worden van een conditioneringseenheid van het merk PCB piezotronics model 482 C series. Dit toestel zal de sensor voorzien van voeding. De storingsen in de kabel zullen kleiner zijn dan bij de landingsversterkers waardoor er hier met langere kabels gewerkt kan worden.



Model Number 109C12		ICP® PRESSURE SENSOR		Revision: E ECN # 27048	
<b>Performance</b>		<b>ENGLISH</b>	<b>SI</b>	<b>OPTIONAL VERSIONS</b>	
Measurement Range(for ± 7V output)		100 kpsi	690,000 kPa	Optional versions have identical specifications and accessories as listed for the standard model except where noted below. More than one option may be used.	
Sensitivity(± 15 %)		0.07 mV/psi	0.010 mV/kPa	H - Hermetic Seal	
Maximum Pressure		125 kpsi	862,000 kPa	Housing Material 17-4 Stainless Steel 17-4 Stainless Steel	
Resolution		2.0 psi	13.8 kPa	Maximum Shock 20,000 g pk 196,133	
Resonant Frequency		≥ 400 kHz	≥ 400 kHz	Sealing Welded Hermetic Welded Hermetic	
Rise Time		≤ 2.0 μ sec	≤ 2.0 μ sec	M - Metric Mount	
Non-Linearity		≤ 2.0 % FS	≤ 2.0 % FS	N - Negative Output Polarity	
<b>Environmental</b>				W - Water Resistant Cable	
Acceleration Sensitivity		≤ 0.02 psi/g	≤ 0.015 kPa/(m/s <sup>2</sup> )	<b>NOTES:</b>	
Temperature Range(Operating)		-100 to +275 °F	-73 to +135 °C	[1] Zero-based, least-squares, straight line method.	
Temperature Coefficient of Sensitivity		≤ 0.07 %/°F	≤ 0.126 %/°C	[2] Ceramic coated.	
Maximum Flash Temperature		3000 °F	1650 °C	[3] See PCB Declaration of Conformance PS023 for details.	
Maximum Vibration		2000 g pk	19,620 m/s <sup>2</sup> pk	<b>SUPPLIED ACCESSORIES:</b>	
Maximum Shock		50,000 g pk	490,330 m/s <sup>2</sup> pk	Model 065A06 Seal ring 0.318" OD x 0.250" ID x 0.010" thk 316L SS material (3)	
<b>Electrical</b>				Entered: <u>BLS</u> Engineer: <u>RE</u> Sales: <u>DRC</u> Approver: <u>RF</u> Spec Number:	
Output Polarity(Positive Pressure)		Positive	Positive	Date: <u>8-11-07</u> Date: <u>8-7-07</u> Date: <u>8-7-07</u> Date: <u>8-7-07</u> <b>21925</b>	
Discharge Time Constant(at room temp)		≥ 2000 sec	≥ 2000 sec	<b>PCB PIEZOTRONICS</b> Phone: 716-684-0001	
Excitation Voltage		20 to 30 VDC	20 to 30 VDC	Fax: 716-686-9129	
Constant Current Excitation		2 to 20 mA	2 to 20 mA	E-Mail: pressure@pcb.com	
Output Impedance		≤ 100 ohm	≤ 100 ohm	3425 Walden Avenue, Depew, NY 14043	
Output Bias Voltage		8 to 14 VDC	8 to 14 VDC		
<b>Physical</b>					
Sensing Geometry		Compression	Compression		
Sensing Element		Quartz	Quartz		
Housing Material		C-300	C-300		
Diaphragm		C-300	C-300		
Sealing		Epoxy	Epoxy		
Electrical Connector		10-32 Coaxial Jack	10-32 Coaxial Jack		
Weight		0.6 oz	17 gm		



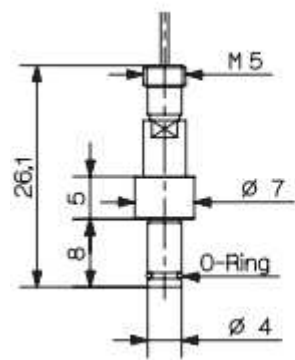
All specifications are at room temperature unless otherwise specified.  
 In the interest of constant product improvement, we reserve the right to change specifications without notice.  
 ICP® is a registered trademark of PCB Group, Inc.

Kistler model 6167A

Dit sensormodel werkt eveneens via het piëzo-elektrisch effect en heeft een bereik tot 200 bar. Deze worden voornamelijk gebruikt bij het spuitgieten maar kan perfect werken voor onze toepassing . De o-ring is hier ook aanwezig en zal eveneens voor de afdichting zorgen tussen de ringspleet van de sensor en de boring. De gevoeligheid wordt uitgedrukt in pC/bar waarbij, in dit geval de gevoeligheid 16,5 pC/ bar of 1,65 pC/MPa is. De enkel aardige kabel is rechtstreeks verbonden met de sensor. Twee sensoren van dit model zijn bevestigd op de schijf, waarvan de ene sensor zich voor de schijf bevindt en de andere sensor achter de schijf.

De instellingen van de parameters op de ladingsversterker zien er als volgt uit:

Transducer	T = 0,16
Scale	S = 1,00 * 10 <sup>3</sup>
Filter (low pass)	LP = OFF
Time constant (high pass filter)	TC = 10 s



Range	bar	0 ... 200
Overload	bar	500
Sensitivity	pC/bar	≈-16,5
Linearity, all ranges	% FSO	≤±1
Natural frequency	kHz	≈150
Operating temperature range		
Mold (sensor, cable, connector)	°C	0 ... 200*
Melt (at front of sensor)	°C	<450
Temperature coefficient of sensitivity	%/°C	±0,02
Insulation resistance		
at 20 °C	TΩ	>10
at 200 °C	TΩ	>1

## PCB model 102B en 113B03

Dit zijn hoogfrequente dynamische druksensoren die eveneens zijn opgebouwd met kristalen als sensor element. Hierdoor zijn de piëzo-elektrische sensoren uitermate geschikt voor het meten van snel veranderende drukken over grote frequenties en amplitude. De respons gebeurt op enkele microseconden. De behuizing van deze sensoren is hermetisch afgesloten. De hoge signaalruisverhouding en een hoge uitgangsspanning maakt het mogelijk dat er gewerkt kan worden met lange kabels zonder dat het signaal wordt vervormd.

## Model 102B

Deze piëzo-elektrische sensor kan drukken meten tot 34 500 kPa. De gevoeligheid wordt uitgedrukt in mV/MPa en is in dit geval 0.15mV/kPa. De sensoren moeten gevoed worden, dit gebeurt met een signaalconditioneringseenheid. Met behulp van de coaxkabel wordt de sensor verbonden met de conditioneereenheid. De sensor heeft een grotere gevoeligheid dan model 113B en bevindt zich daardoor achter de schijf.



Model Number	ICP® PRESSURE SENSOR		Revision: C ECN #: 34851
102B	ENGLISH	SI	OPTIONAL VERSIONS
Performance			Optional versions have identical specifications and accessories as listed for the standard model except where noted below. More than one option may be used.
Measurement Range(for ±5V output)	5 kpsi	34,500 kPa	[2]
Useful Overrange(for ±10V output)	10 kpsi	69,000 kPa	
Sensitivity(± 10 %)	1.0 mV/psi	0.15 mV/kPa	
Maximum Pressure(static)	15 kpsi	103,000 kPa	
Resolution	20 mpsi	0.14 kPa	[1]
Resonant Frequency	≥ 500 kHz	≥ 500 kHz	
Rise Time(Reflected)	≤ 1.0 µsec	≤ 1.0 µsec	
Low Frequency Response(-5 %)	0.001 Hz	0.001 Hz	
Non-Linearity	≤ 1.0 % FS	≤ 1.0 % FS	[3]
Environmental			
Acceleration Sensitivity	≤ 0.002 psig	≤ 0.0014 kPa/(m/s <sup>2</sup> )	
Temperature Range(Operating)	-100 to +275 °F	-73 to +135 °C	
Temperature Coefficient of Sensitivity	≤ 0.03 %/°F	≤ 0.054 %/°C	[1]
Maximum Flash Temperature	3000 °F	1650 °C	
Maximum Shock	20,000 g pk	186,000 m/s <sup>2</sup> pk	
Electrical			
Output Polarity(Positive Pressure)	Positive	Positive	
Discharge Time Constant(at room temp)	≥ 600 sec	≥ 600 sec	
Excitation Voltage	20 to 30 VDC	20 to 30 VDC	
Constant Current Excitation	2 to 20 mA	2 to 20 mA	
Output Impedance	≤ 100 ohm	≤ 100 ohm	
Output Bias Voltage	8 to 14 VDC	8 to 14 VDC	
Electrical Isolation	10 <sup>8</sup> ohm	10 <sup>8</sup> ohm	
Physical			
Sensing Geometry	Compression	Compression	
Sensing Element	Quartz	Quartz	
Housing Material	Stainless Steel	Stainless Steel	
Diaphragm	Invar	Welded Hermetic	
Sealing	Welded Hermetic	Welded Hermetic	
Electrical Connector	10-32 Coaxial Jack	10-32 Coaxial Jack	
Weight	0.44 oz	12.5 gm	
<b>NOTES:</b> [1] Typical. [2] For +10 volt output, minimum 24 VDC supply voltage required. Negative 10 volt output may be limited by output bias. [3] Zero-based, least-squares, straight line method. [4] See PCB Declaration of Conformance PS023 for details.			
<b>SUPPLIED ACCESSORIES:</b> Model 065A03 Seal ring 0.435" OD x 0.377" ID x 0.030" thk brass (3)			
Entered: <i>pmw</i>	Engineer: <i>mgk</i>	Sales: <i>slw/m</i>	Approved: <i>pb</i>
Date: <i>12/10/10</i>	Date: <i>12/10/10</i>	Date: <i>12/10/10</i>	Date: <i>12/10/10</i>
			Spec Number: 40708
		<b>PCB PIEZOTRONICS™</b> PRESSURE DIVISION 3425 Walden Avenue, Depew, NY 14043 Phone: 716-684-0001 Fax: 716-686-9129 E-Mail: pressure@pcb.com	

## Model 113B03

Dit model heeft een meetbereik tot 103 420 kPa. De gevoeligheid wordt uitgedrukt in pC/kPa en is voor dit type 54,66 pC/MPa. De ladingversterker zal de hoeveelheid lading die de sensoren uitzendt omvormen naar een bruikbare spanning. Deze sensor wordt geplaatst voor de schijf aangezien de gevoeligheid groter is dan het bovenstaand model.

De instellingen van de parameters op de ladingsversterker zien er als volgt uit:

Transducer	T = 5,47
Scale	S = 1,00 * 10 <sup>3</sup>
Filter (low pass)	LP = OFF
Time constant (high pass filter)	TC = 10 s




Model Number 113B03	CHARGE OUTPUT PRESSURE SENSOR		Revision: C ECN #: 40791
<b>Performance</b>	<b>ENGLISH</b>	<b>SI</b>	<b>OPTIONAL VERSIONS</b>
Sensitivity (± 1% )	0.39 pC/psi	0.056 pC/kPa	Optional versions have identical specifications and accessories as listed for the standard model except where noted below. More than one option may be used.
Measurement Range	15 kpsi	103,420 kPa	
Maximum Pressure	15 kpsi	103,420 kPa	
Resolution	10 mpsi	0.07 kPa	[2] E - Emralon coating [4]
Resonant Frequency	≥ 500 kHz	≥ 500 kHz	Coating Emralon Emralon
Rise Time(Reflected)	≤ 1.0 μ sec	≤ 1.0 μ sec	Electrical Isolation(Case) 10 <sup>8</sup> Ohm 10 <sup>8</sup> Ohm
Non-Linearity	≤ 1.0 % FS	≤ 1.0 % FS	Supplied Accessory - Model 065A08 Isolation ring 0.250"OD x 0.218" ID x 0.027" thick anodized aluminum (3) replaces Model 065A02
<b>Environmental</b>			Supplied Accessory - Model 065A22 Isolation Seal, .250" OD x .218" ID x .015", Teflon or Vespeal (1) replaces Model 065A02
Acceleration Sensitivity	≤ 0.002 psig	≤ 0.0014 kPa/(m/s <sup>2</sup> )	
Temperature Range(Operating)	-40 to +400 °F	-240 to +204 °C	H - Hermetic Seal [4]
Temperature Coefficient of Sensitivity	± 0.05 %/°F	± 0.054 %/°C	Sealing Welded Hermetic Welded Hermetic
Maximum Flash Temperature	3000 °F	1649 °C	
Maximum Shock	20,000 g pk	196,140 m/s <sup>2</sup> pk	J - Ground Isolated [4][5]
<b>Electrical</b>			P - Positive Output Polarity
Output Polarity(Positive Pressure)	Negative	Negative	S - Stainless Steel Diaphragm [4]
Capacitance	12 pF	12 pF	Diaphragm 316L Stainless Steel 316L Stainless Steel
Insulation Resistance(at room temp)	≥ 10 <sup>12</sup> Ohm	≥ 10 <sup>12</sup> Ohm	W - Water Resistant Cable [4]
<b>Physical</b>			
Sensing Element	Quartz	Quartz	
Sensing Geometry	Compression	Compression	
Housing Material	17-4 Stainless Steel	17-4 Stainless Steel	
Diaphragm	Invar	Invar	
Sealing	Welded Hermetic	Welded Hermetic	
Electrical Connector	10-32 Coaxial Jack	10-32 Coaxial Jack	
Weight	0.212 oz	6.0 gm	
All specifications are at room temperature unless otherwise specified. In the interest of constant product improvement, we reserve the right to change specifications without notice. ICP® is a registered trademark of PCB Group, Inc.			
<b>NOTES:</b>			
[1] Typical.			
[2] Resolution dependent on range setting and cable length used in charge system.			
[3] Zero-based, least-squares, straight line method.			
[4] For sensor mounted in thread adaptor, see adaptor installation drawing for supplied accessories.			
[5] Used with optional mounting adaptor.			
<b>SUPPLIED ACCESSORIES:</b>			
Model 060A03 Clamp nut, 5/16-24-2A thd, 1/4" hex, stainless steel (1)			
Model 060A05 Clamp nut MT x 0.75-5g thd (1)			
Model 065A02 Seal ring, sensor flush mount, 0.248" OD x 0.219" ID x 0.015" thick, brass (3)			
Model 065A05 Seal sleeve sensor recess mount 0.248" OD x 0.221" ID x 0.240" thick 17-4 (1)			
Entered: AP	Engineer: MJK	Sales: KWW	Approved: BAM
Date: 3/19/2013	Date: 3/19/2013	Date: 3/19/2013	Date: 3/19/2013
			Spec Number: 40725
		Phone: 716-664-0001 Fax: 716-664-0987 E-Mail: info@pcb.com	
3425 Walden Avenue, Depew, NY 14043			



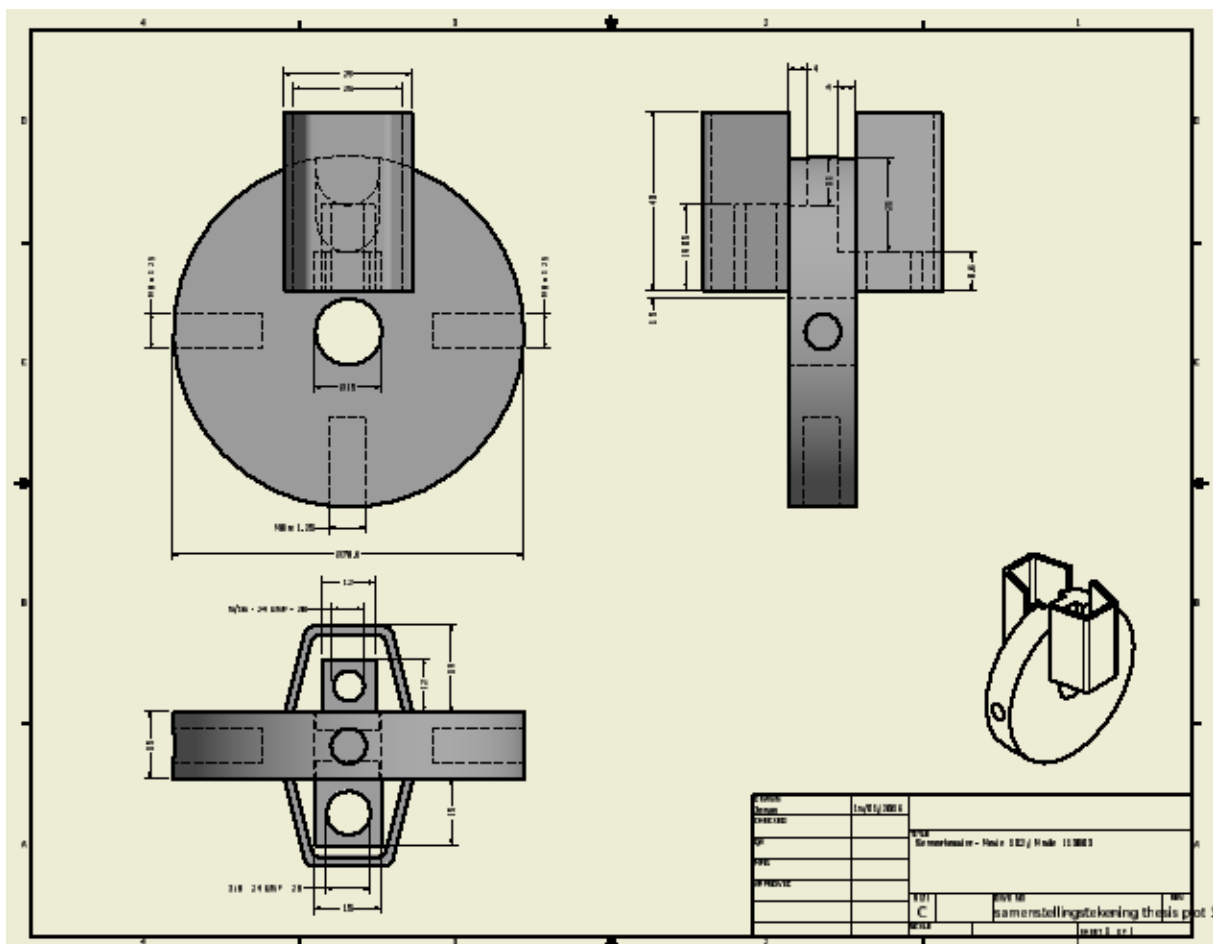
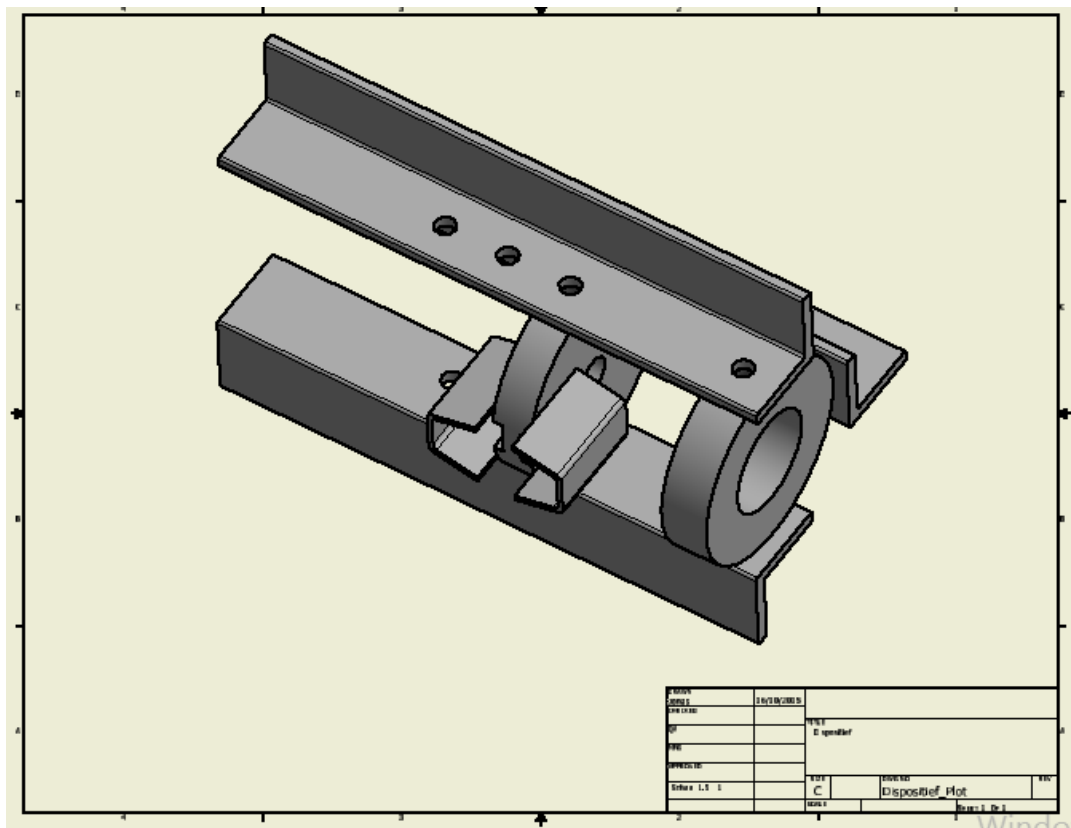
## Blast-pencils PCB 137A24

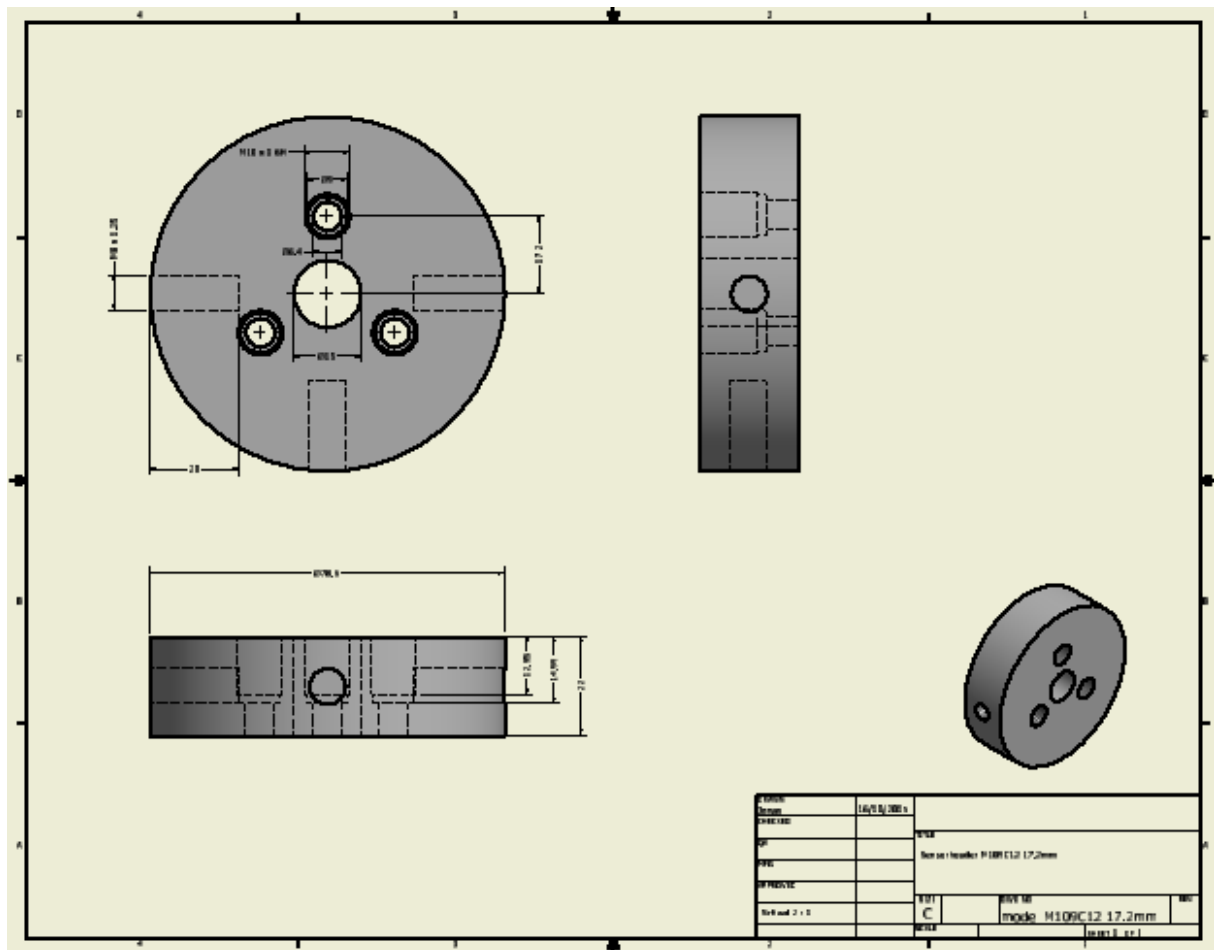
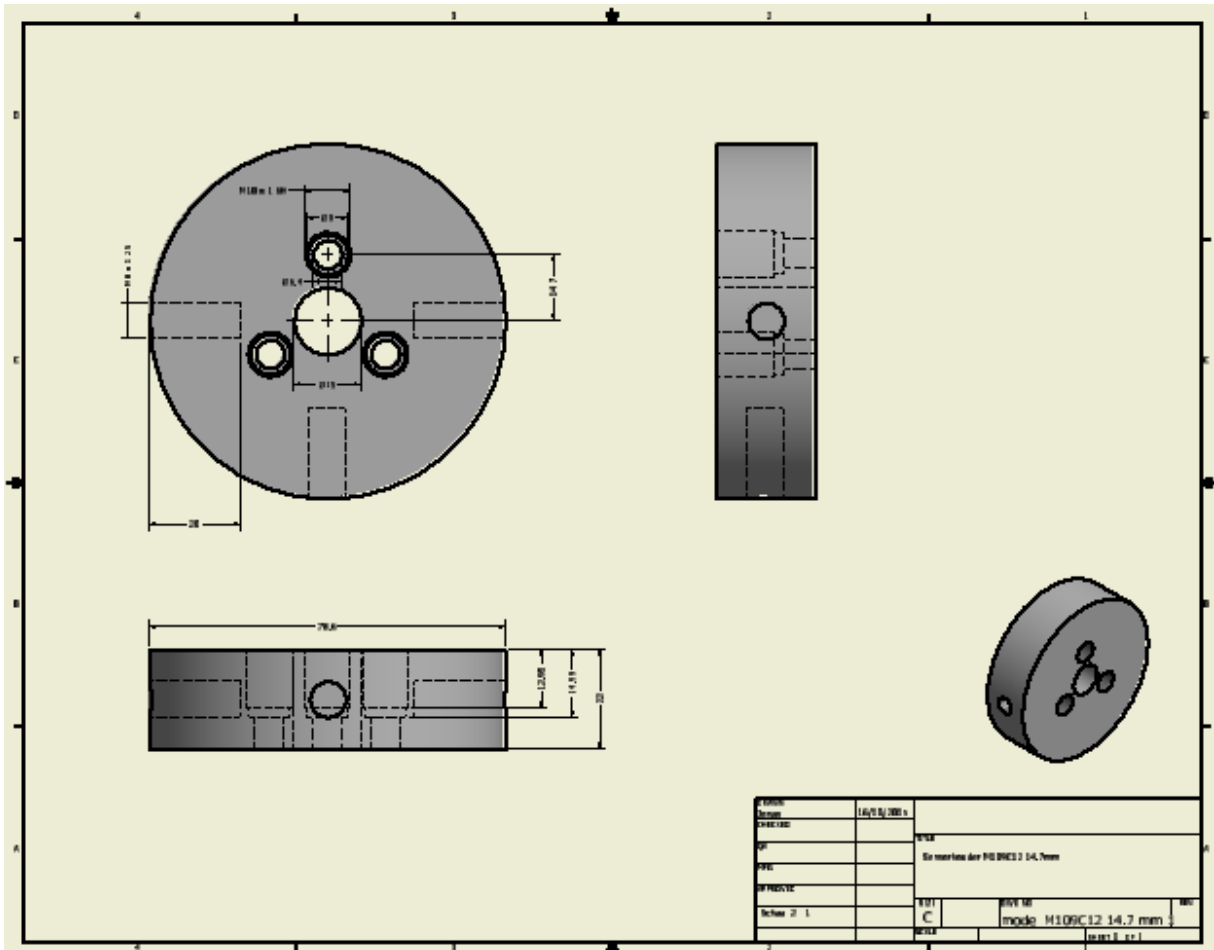
De drukgolven die ontstaan door de explosie worden gemeten met deze pencils. Deze werken met het piëzo-elektrisch effect. In totaal maakt men gebruik van vier dezelfde blast-pencils. Het uiteinde van de blast-sensor is voorzien van een BNC-connector. Het meetbereik van deze sensor bedraagt 1724 kPa. De gevoeligheid wordt uitgedrukt in mV/kPa en is in dit geval 2.90 mV/kPa.



Model Number		
137A24		
<b>Performance</b>	<b>ENGLISH</b>	<b>SI</b>
Measurement Range(for $\pm 5V$ output)	250 psi	1724 kPa
Sensitivity( $\pm 15\%$ )	20 mV/psi	2.90 mV/kPa
Maximum Pressure	5 kpsi	34.475 kPa
Resolution	2 mpsi	.001 kPa [1]
Resonant Frequency	$\geq 500$ kHz	$\geq 500$ kHz
Rise Time(Incident)	$\leq 6.5 \mu$ sec	$\leq 6.5 \mu$ sec
Non-Linearity	$\leq 1.0\%$ FS	$\leq 1.0\%$ FS [2]
<b>Environmental</b>		
Temperature Range(Operating)	-100 to +275 °F	-73 to +135 °C
Temperature Coefficient of Sensitivity	$\leq 0.03\%$ /°F	$\leq 0.054\%$ /°C
<b>Electrical</b>		
Output Polarity(Positive Pressure)	Positive	Positive
Discharge Time Constant(at room temp)	$\geq 0.2$ sec	$\geq 0.2$ sec
Excitation Voltage	20 to 30 VDC	20 to 30 VDC
Constant Current Excitation	2 to 20 mA	2 to 20 mA
Output Impedance	$\leq 100$ ohm	$\leq 100$ ohm
Output Bias Voltage	8 to 14 VDC	8 to 14 VDC
<b>Physical</b>		
Sensing Geometry	Compression	Compression
Sensing Element	Quartz	Quartz
Housing Material	Aluminum	Aluminum
Diaphragm	Invar	Invar
Sealing	Epoxy	Epoxy
Electrical Connector	BNC Jack	BNC Jack
Weight	12.4 oz	351 gm
 [3]		
<i>All specifications are at room temperature unless otherwise specified.            In the interest of constant product improvement, we reserve the right to change specifications without notice.</i>		
ICP® is a registered trademark of PCB Group, Inc.		

# Bijlage D: Tekeningen ontworpen schijven







# Auteursrechtelijke overeenkomst

Ik/wij verlenen het wereldwijde auteursrecht voor de ingediende eindverhandeling:

**Optimalisatie van metingen aan het uiteinde van de loopmond van een .50 wapen**

Richting: **master in de industriële wetenschappen: energie-automatisering**

Jaar: **2016**

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,

**Lens, Jonas**

Datum: **16/01/2016**