

Design av en optisk förbränningskammare

Generering av 3D-modeller och utvärdering av
konstruktionslösningar

Viljam Grahn

Examensarbete för yrkeshögskoleexamen

Utbildningsprogrammet för maskin- och produktionsteknik

Vasa 2018



EXAMENSARBETE

Författare: Viljam Grahn
Utbildning och ort: Maskin- och produktionsteknik, Vasa
Handledare: Jari Hyvönen och Katri Mäkinen, Wärtsilä
Kaj Rintanen, Novia

Titel: Design av en optisk förbränningskammare

Datum 15.11.2018

Sidantal 58

Bilagor 4

Abstrakt

Optiska testtriggare används för undersökning av händelser inuti förbränningsutrymmet, utveckling av bränsleinsprutning, förbränningsprocesser och dess prestanda. Syftet med detta examensarbete är att generera detaljerade 3D-modeller för en optisk förbränningskammare som opererar i höga tryck och temperaturer. Målet är att kammaren skall vara optimerad med avseende på optisk funktionalitet.

Arbetet tar avstamp från en kort presentation av olika typer av optiska testtriggare, grundläggande teorier om optisk sprejdiagnostik jämte teorier för konstruktionens nyckelelement, så som fönster. Teoridelen fungerar som beslutsgrund för konstruktionslösningar för att uppnå målet.

Under konstruktionsarbetets gång diskuteras och presenteras olika lösningsalternativ för konstruktionsproblem. För att validera olika komponenters hållfasthet görs enkla FE-simuleringar med NX Nastran.

Arbetet resulterar i detaljerade 3D-modeller för en moduluppbyggd konstant volyms förbrännings testtriggare där olika injektorer kan monteras. Modultänkandet visade sig vara en god lösning för testtriggaren för att bibehålla flexibilitet och styrka framtida möjligheter till att optimera testtriggaren för olika undersökningar.

Språk: svenska

Nyckelord: optiska förbränningskammare, 3D-design, NX

OPINNÄYTETYÖ

Tekijä: Viljam Grahn

Koulutus ja paikkakunta: Kone- ja tuotantotekniikka, Vaasa

Suuntautumisvaihtoehto: Suunnittelu

Ohjaajat: Jari Hyvönen ja Katri Mäkinen, Wärtsilä

Kaj Rintanen, Novia

Nimike: Optisen ruiskutuskammion suunnittelu

Päivämäärä 15.11.2018

Sivumäärä 58

Liitteet 4

Tiivistelmä

Optisia testirigejä käytetään palotilan tutkimista sekä polttoaineen ruiskutuksen, palamisprosessien ja suorituskyvyn kehittämistä varten. Tämän oppinäytetyön tarkoitus oli tuottaa 3D-malleja optisesta polttokammioista, joka toimii korkeissa paineissa ja lämpötiloissa. Tavoitteena oli optimoida kammion optinen toiminnallisuus.

Ensin erilaiset optiset testirigit on esitelty lyhyesti. Optisen sprejidiagnostiikan teoria on esitelty ja lopuksi tärkeiden suunnittelulementtien kuten tiivisteen ja lasien teoriaa on käyty läpi. Kaikki ratkaisut perustuvat teoriaan, sillä tavalla kaikki tavoitteet on saavutettu.

Suunnitteluprosessin aikana erilaiset ratkaisut esiteltiin ja ongelmista on keskusteltu. Yksinkertaiset simulaatiot on tehty NX Nastranilla erilaisten komponenttien kestävyysvarmistamiseksi.

Lopputulos on 3D-malleja moduulipohjaiseen ruiskutuskammioon. Ruiskutuskammio lämmitetään esipolttajärjestelmällä. Ruiskutuskammiossa on vakioilavuus ja siihen voi asentaa erilaisia injektoreita. Moduulirakenteen ansiosta tulevaisuudessa on hyvät mahdollisuudet käyttää tätä kammiota kaikenlaisiin tutkimusprojekteihin.

Kieli: ruotsi

Avainsanat: optinen ruiskutuskammio, 3D-suunnittelu, NX

BACHELOR'S THESIS

Author: Viljam Grahn

Degree Programme: Machine and Production Engineering

Specialization: Construction

Supervisors: Jari Hyvönen and Katri Mäkinen, Wärtsilä

Kaj Rintanen, Novia

Title: Design of an Optical Combustion Chamber

Date September 15, 2018

Number of pages 58

Appendices 4

Abstract

Optical test rigs are frequently used for in-cylinder research, development of fuel injection, combustion processes and their performance. The purpose of this thesis is to generate detailed 3D models of an optical combustion chamber which operates at high pressures and temperatures. The goal is to optimize the chamber for optical functionality.

The thesis presents different types of optical test rigs, basic spray diagnostics and some theory about key elements such as the windows. The theory chapter will support the design work in order to achieve all design targets.

During the design phase different solutions and alternatives will be presented and discussed. In order to validate the strength of the design NX Nastran was used for FE simulations of the key components in the test rig.

This thesis resulted in a detailed 3D design of an optical high-pressure combustion chamber consisting of modules. The module thinking was one of the key solutions in order to make the test rig as flexible as possible. This strengthens the possibilities to customize the test rig for future research projects.

Language: Swedish

Key words: optical combustion chamber, 3D-design, NX

Förord

Detta examensarbete har genomförts vid Wärtsilä Finland Oy, som en del av ett projekt att konstruera en testrigg för utvecklingssyfte. Arbetet med den optiska förbränningskammaren har verkligen varit en mångsidig och intressant utmaning.

Jag vill framför allt tacka min förman och handledare Jari Hyvönen för möjligheten att utföra detta examenarbete samt ditt energiska och inspirerande sätt att handleda. Det har verkligen varit en intressant sommar. I ditt team är allt möjligt. Jag vill också tacka min andra handledare Katri Mäkinen för allt stöd och alla tips under arbetets gång. Utan din hjälp vore jag fortfarande kvar på ruta ett.

Jag vill ännu tacka Sören Höstman, samt hela expertgruppen för cylinderlock och ventilmekanismer för goda diskussioner och en härlig stämning i gruppen.

Jag vill även rikta ett tack till min handledare från Yrkeshögskolan Novia, Kaj Rintanen. Det har varit värdefullt att ha ett bollplank att diskutera med och hitta vägen framåt i studierna när min kompass har varit sönder.

Till sist vill jag även rikta ett tack till min familj och speciellt Emma för all uppskattning och stöd.

Vasa, september 2018

Viljam Grahn

Innehållsförteckning

1	Inledning.....	1
1.1	Bakgrund	1
1.2	Problem.....	2
1.3	Syfte	3
1.4	Avgränsning.....	3
1.5	Sekretess.....	3
1.6	Disposition	3
2	Teori	4
2.1	Olika typer av optiska testriggar	4
2.2	Optisk sprejdiagnostik	8
2.2.1	Passiva	9
2.2.2	Aktiva	10
2.3	Fönster.....	14
2.3.1	Teori om olika fönster	14
2.3.2	Optiska material.....	16
2.4	Tätningar	18
2.5	För-förbränning.....	20
3	Tidigare erfarenheter och utgångspunkter.....	22
3.1	Erfarenheter på Wärtsilä.....	22
3.2	Utgångspunkter och krav	23
4	Design	24
4.1	Kammarkroppen	24
4.2	Fönster.....	26
4.2.1	Tätningar.....	28
4.3	Gasväxling	29
4.3.1	Adapterplatta	30
4.3.2	Ventiler	30
4.4	Bränslesystem	32
4.4.1	Injektor adapter	32
4.4.2	Fingerborg.....	34
4.5	Övriga system	36
4.5.1	Skruvförband.....	37
4.5.2	Mätutrustning.....	37
4.5.3	Övriga	37
5	Analys av design	38
5.1	FE-simuleringar	38

5.2	3D-modeller.....	50
5.3	Montering.....	53
6	Diskussion.....	53
6.1	Problemområden	53
6.2	Vidare utveckling.....	56
6.3	Slutlig konklusion.....	56
	Referenser	58

Bilageförteckning

Bilaga 1 Optiska materials transmissioner vid olika våglängd och tjocklek

Bilaga 2 Materialdatablad för fönster (Yoder Jr, 2006)

Bilaga 3 Allmän översikt och funktion för olika tätningar (Mägi & Melkersson, 2006)

Bilaga 4 Beräkningar

Figurförteckning

Figur 1. Genomskäring av en optisk forskningsmotor. (Espey & Dec, 1993)	5
Figur 2. Genomskäring av ett RCYM cylinderhuvud (Bermúdez, García, Juliá, & Martínez, 2003). RCYM testrigger vid användning (València, u.d.).....	6
Figur 3. Jämförelse av olika optiska testrigger. (0 neutral, + bättre och - sämre) (Baert, Frijters, Somers, Luijten, & De Boer, 2009)	8
Figur 4. Schlieren fotografering är en metod för visualisering av sprej struktur och flamutbredning. (Zhao, 2012).....	9
Figur 5. Jämförelse av Rayleigh och Mie spridning (Georgia State University, 2016) .	11
Figur 6. Schematiskt energidiagram som visualiserar principerna för Rayleigh spridning, Raman spridning och laser inducerad fluorescens. (Zhao, 2012).....	13
Figur 8. Fönstertjocklek, fixerat jämfört med ofixerat. (Yoder Jr, 2006).	15
Figur 8. O-ringens funktion. (Mägi & Melkersson, 2006).....	19
Figur 9. Principen för för-förbrännings teknikens funktion. (Baert;Frijters;Somers;Luijten;& De Boer, 2009).	21
Figur 10. Kammarkroppens design	26
Figur 11. Fönsterdesign.....	28
Figur 12. Gasväxlingens adapterplatta i genomskäring.	30
Figur 13. Gasväxlingsventiler i genomskäring.....	31
Figur 14. Genomskäring av en hörnmodul utrustad med en elektrisk gasventil.	32
Figur 15. Adapter för W31 Diesel/DF injektorn till vänster och adapter för W32 LG-injektorn till höger.....	33
Figur 16 Adapter för W20 LC-injektorn.....	34
Figur 17. Fingerborgens utformnings med avrinningskanal.....	36
Figur 18. Meshen jämte randvillkor för kammarkroppen.....	39
Figur 19. FE-simulering av kammarkroppen.....	39
Figur 20. Meshen jämte randvillkor för ett klämt fönster till vänster och icke-klämt till höger.....	40
Figur 21. FE-simuleringar över fönster konstruktionen.....	41
Figur 22. Meshen samt randvillkor för den uppdaterade fönsterdesignen.....	42
Figur 23. Slutgiltig FE simulering av fönsterdesignen.	42
Figur 24. Meshen jämte randvillkor för avgas ventilhus med öppen ventil till vänster och ventilhus med stängd ventil till höger.....	44
Figur 25. FE-simulering av avgas ventilhus med öppen ventil till vänster och ventilhus med stängd ventil till höger.	44
Figur 26. Meshen jämte randvillkor för insugs ventilhus med stängd ventil samt FE-simulering till höger.	45
Figur 28. Meshen jämte randvillkor för insugsventil till vänster och FE-simulering till höger.....	46
Figur 27. Meshen jämte randvillkor för avgasventil till vänster och FE simulering till höger.....	46
Figur 29. Meshen jämte randvillkor för hörnadaptern avsedd för tändstift.	47
Figur 30. FE-simulering av tändstiftets hörnadapter.....	48
Figur 32. Meshen jämte randvillkor för roterad fixtur till vänster och FE simulering av töjning till höger.....	49
Figur 31. Meshen jämte randvillkor för fixturen till vänster och FE simulering av töjning till höger.....	49
Figur 33. 3D-modell av testrigger.....	50
Figur 34. Genomskäring av testriggens diagonal till vänster och tvärsnitt av W31 Diesel/DF-injektorn ansluten till testrigger till höger.....	51
Figur 35. Genomskäring av gasväxlingsmodulen ansluten till testrigger.	52

Tabellförteckning

Tabell 1. Våglängderna för intensitetstoppar av strålning från molekyler och radikaler i en förbränningsmotor (Zhao, 2012, s. 243)	16
Tabell 2. Preliminär kravlista, enligt Pahl & Beitz	24

Lista på förkortningar

CFD – Computational Fluid Dynamics

ORE – Optical Research Engine

RCM – Rapid Compression Machine

RCYM – Rapid Cycling Machine

CPFR – Constant Pressure Flow Rig

CVHC – Constant Volume Hot Cell

CVPC – Constant Volume Pre-combustion Cell

LIF – Laser Induced Fluorescence

LII – Laser Induced Incandescence

CRU – Combustion Research Unit

OPD – Optical Path Difference

FE – Finite Element

1 Inledning

I detta kapitel presenteras examensarbetet i korthet. Bakgrunden, problem som har genererat ett behov och syftet med detta arbete tas upp. Därefter diskuteras avgränsningar och sekretess. Slutligen presenteras dispositionen i korthet för att förbättra förståelsen för hur arbetet är uppbyggt.

1.1 Bakgrund

Förbränningsmotorn kan spåras tillbaka till år 1876 då Nicolaus Otto utvecklade den första gnistantända motorn. Några år senare såg dieselmotorns dagens ljus, då Rudolf Diesel hade utvecklat den kompressionsantända motorn. Dessa motorer har sedan dess utvecklats, precis som kunskaperna om dem. De senaste decennierna har utvecklingen av motorerna allt mera tilltagit eftersom att kraven på dess prestanda och emissioner har höjts allt mera. (Heywood, 1988, ss. 1–37).

Syftet med en förbränningsmotor är att konvertera en kemisk energi lagrad i bränslet till mekanisk energi i form av en roterande axel. Denna kan sedan användas för att vidare konvertera den mekaniska energin till t.ex. elektricitet med en generator. Konverteringen av kemisk energi till mekanisk sker då bränslet oxideras i en sluten kammare inuti motorn. Den snabba oxidationen av bränslet skapar ett tryck på kolven som då börjar röra sig neråt i cylindern, och på så vis åstadkomma vevaxelns rotationsrörelse. Bränsleluftsblandningen och resterna efter oxidering utgör arbetsfluiderna i en förbränningsmotor. (Heywood, 1988, ss. 1–37).

I en förbränningsmotor som fungerar med kompressionsantändning, som i vardagligt tal kallas dieselmotor, sprutas bränslet direkt in i cylindern med högt tryck i slutet av kompressionstakten. Luften som komprimerats är då väldigt het och bränslet självantänder och oxiderar. En annan metod är att använda en så kallad förkammare. Denna metod går ut på att bränsle och luft blandas effektivt i ett utrymme med liten volym och självantänder för att senare antända den resterande bränsleluftsblandningen. Genom att använda turboladdare kan man åstadkomma högre luftdensitet i kompressionsvolymen, vilket innebär att en större mängd bränsle kan förbrännas under samma arbetstakt, detta leder till en ökad effekt. (Heywood, 1988, ss. 1–37).

Förbränningsprocessen som sker inuti motorn kommer att avgöra motorns effekt, verkningsgrad och utsläpp. För kompressionsantända motorer är blandningsprocessen av luft och bränsle avgörande för hur effektivt förbränningen sedan kommer att ske. Bränslets sönderdelning, förångning och luftens strömning i cylindern är exempel på faktorer som direkt inverkar på förbränningsprocessen. (Heywood, 1988, ss. 1–37).

För att kunna ta tillvara den kemiska energin som frigörs vid förbränning i en kompressionsantänd motor, är utformningen av förbränningskammaren och insprutningsmunstycket i nyckelposition. Blandningen av bränsle och luft bör ske väldigt effektivt för att förbränningen skall kunna ske inom optimala vevaxelintervall. Detta blir en utmaning, speciellt vid höga varvtal då tiden för processen att äga rum minskas och mängden bränsle som sprutas in ökar. (Heywood, 1988, ss. 1–37).

Bakgrunden till behovet för detta arbete kan härledas till den kontinuerliga utvecklingen av förbränningsmotorn. Specifikt i detta fall då den kompressionsantända motorn där bränslet injiceras i cylinder med två olika metoder, direktinsprutning in i cylindern eller alternativt en indirektinsprutning där förkammare med en rikare blandning av bränslet först antänds. Utformningen av förbränningskammaren och insprutningsmunstycke är faktorer som i hög grad påverkar blandningsprocessen och förbränningsprocessen.

1.2 Problem

Sedan tidigare finns det goda kunskaper i vad som sker före och efter förbränning, men det som sker inuti förbränningskammaren är ännu föremål för vidare forskning. Genom tryckmätningar, emissionsmätningar och CFD-simuleringar har utvecklingen fortskridit. Detta har emellertid genererat ett behov att kunna validera de CFD-modeller som använts, samt att visuellt kunna åskådliggöra det som sker inuti förbränningsutrymmet.

Inom Wärtsilä har en del projekt gjorts inom området, av vilka en del kommer att presenteras noggrannare i det tredje kapitlet. Det finns dock ingen dylik kammare vilket innebär att denna uppgift inleds med en grundlig litteraturundersökning, med tyngdpunkt på liknande konstruktioner och optisk sprejdiagnostik.

1.3 Syfte

För att kunna tillgodose de behov som uppstått och stöda framtida utvecklingsprojekt skall en konstant volymkammare som tål höga tryck och temperaturer konstrueras. Denna kammare skall vara optiskt tillgänglig för att kunna visualisera bränslesprejer.

Syftet med denna kammare vore att i första hand verifiera CFD-modeller, samt att undersöka olika sprejers atomisering och kunna mäta exempelvis sprejpenetrering och droppstorlek. Kammaren bör även vara lämplig för framtida modifieringar för att exempelvis möjliggöra undersökningar på hur sprejen interagerar med cylinderväggar och kolvkronan.

1.4 Avgränsning

Detta examensarbete utförs på uppdrag av Wärtsilä Finland Oy med mål att generera detaljerade 3D-modeller för en optisk sprejkammare jämte konstruktion av hjälpsystem för drift av kammaren.

Detta betyder att ritningar, tillverkning, montering och inledande tester av kammaren inte tas i beaktande i detta arbete. Vidare kommer även de verktyg och hjälpsystem som måste konstrueras att utelämnas från detta arbete. Målet är att diskutera de relevanta konstruktionsproblem som uppkommer samt att presentera detaljerade 3D-modeller av kammaren som slutresultat.

1.5 Sekretess

De delar av detta examensarbete som innehåller sekretessbelagd information och inte får distribueras utanför Wärtsilä kommer att ersättas med fiktivt data. Eventuella bilagor med känslig information och ritningar kommer likaså att utelämnas från den officiella versionen.

1.6 Disposition

Det första kapitlet introducerar bakgrunden för detta arbete och varför det finns ett behov av en optisk förbränningskammare för undersökning av bränslesprejer i höga tryck och temperaturer.

Det andra kapitlet är en teoretisk referensram för arbetet och är uppbyggd av mindre teoriavsnitt som behövs för att förstå, bygga och lösa nyckelproblem under arbetets gång.

Arbetsgången i detta arbete baserar sig på att lösa problem genom att tillämpa teorier och ta stöd av slutsatser från liknande konstruktioner.

I det tredje kapitlet lyfts de kunskaper och tidigare arbeten som gjorts inom Wärtsilä i korthet fram. Utgående från detta samt litteraturstudierna i kapitel två jämförs uppgiften. Utgångspunkter och riktgivande krav presenteras.

I det fjärde kapitlet presenteras arbetsgången, nyckelfunktioner och delar hos kammaren. I denna del diskuteras således lösningar på designproblem och vilka teorier som ligger till grund för de beslut som gjorts.

Det femte kapitlet presenterar och diskuterar en del FE-simuleringar på nyckelkomponenter samt slutliga 3D-modeller på konstruktionen. Detta kapitel kommenterar även förfarandet vid montering av kammaren.

Det sjätte kapitlet sammanfattar examensarbetet. I denna del diskuteras problemområden under konstruktionsarbetets gång. En slutsats kommer att dras och förslag till vidareutveckling kommer att avsluta denna rapport tillsammans med egna reflektioner kring arbetet.

2 Teori

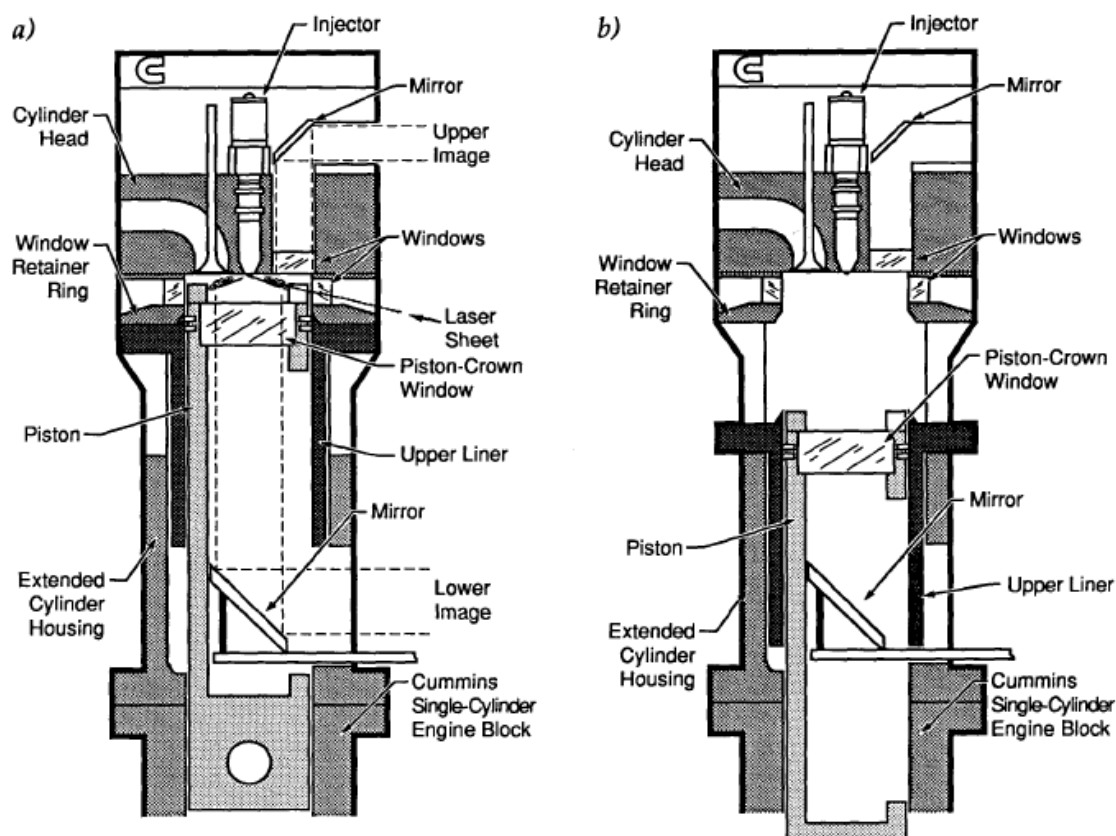
Detta kapitel är en teoretisk referensram som utgör grunden för examensarbetet. Teorin för detta arbete fungerar som beslutsgrund för kammarens design. Teoridelen presenterar olika typer av optiska testriggar, grunder för optisk diagnostik samt mindre teoridelar relaterade till olika konstruktionsproblem. Tyngdpunkten i teoridelen kommer att vara den grundläggande teorin om optisk diagnostik, eftersom den kommer att vara kammarens viktigaste funktion.

2.1 Olika typer av optiska testriggar

Den viktigaste egenskapen för en optisk testrigg, där undersökningar av bränslesprejer utförs, är de gasförhållanden som råder inuti kammaren. Dessa bör motsvara rådande gasförhållanden i en riktig motor precis innan kolven når övrevändläge och bränslet sprutas in och självantänder. (Baert, Frijters, Somers, Luijten, & De Boer, 2009, s. 1).

Den testrigg som mest liknar en konventionell motor är en Optical Research Engine (ORE). ORE testriggar förekommer ofta som encylindriga modeller där förbränningskammaren är tillgänglig genom ett stort fönster i kolven och flera fönster i en distansplatta mellan cylinderlocket och cylinderfoder. Alternativt kan också fönster placeras in istället för en ventil i cylinderlocket. Cylinderfodret och kolven är förlängda för att ge insyn i förbränningsutrymmet från undersidan av kolven. I *figur 1* ses en bild av hur uppställningen av en dylik testrigg kan se ut. Typiskt för ORE-testriggar är att kompressionsförhållandet är något mindre vilket medför lägre tryck och temperatur nivåer jämfört med den motormodell som undersöks. (Espey & Dec, 1993, ss. 1–3).

En ORE-testrigg är den som till närmast liknar en verklig motor. Nackdelen är dock att den optiska tillgängligheten är begränsad och vissa typer av grundläggande sprejundersökningar där bränslesprejens interaktion med cylinderväggar samt kolvkrona är oönskade eftersom dessa skapar komplexa flöden i cylindern. (Baert, Frijters, Somers, Luijten, & De Boer, 2009, ss. 1–2).

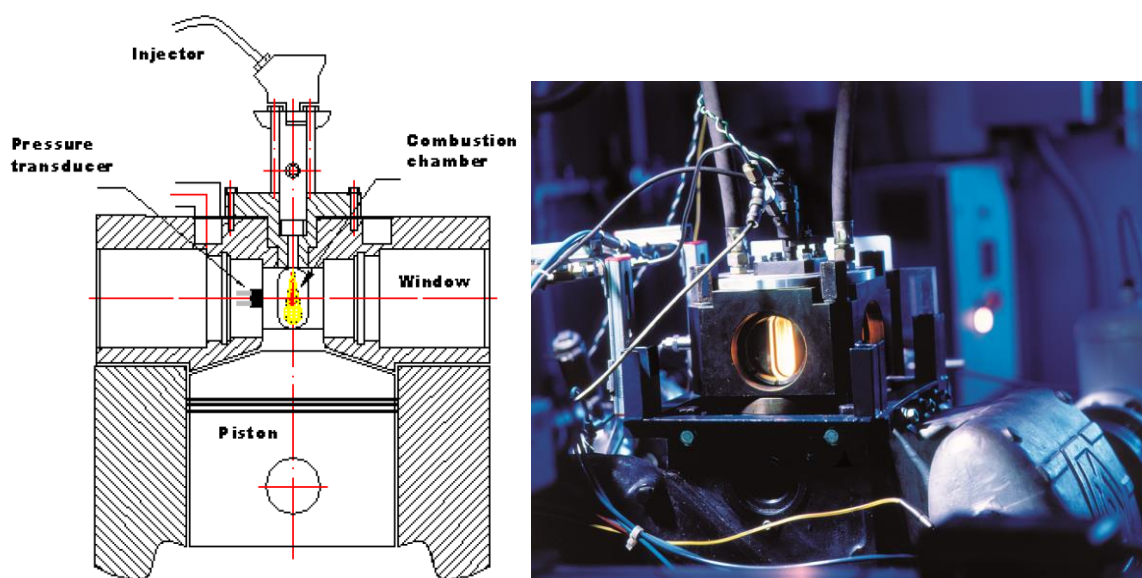


Figur 1. Genomsnitt av en optisk forskningsmotor. (Espey & Dec, 1993)

En annan typ av testrigg är en Rapid Compression Machine, (RCM) som används för att undersöka förbränningsprocesser i kolmotorer. Denna utför endast en kompressions takt och sedan sker förbränningen. I vissa fall tillåts även kolven röra sig bakåt och utföra delar av en expansionstakt, detta kräver dock ett väldigt sofistikerat kontrollsystem för att kunna utföra tester där även data från expansionen används. Komprimeringen i dessa testriggar utförs oftast av ett hydrauliskt eller pneumatiskt hjälpsystem. I denna testrigg är fönstren placerade på samma ställen som i ORE testriggen. (Kamimoto, Kando, Kobori, Hatano, & Kobayashi, 1988, ss. 1–3).

Denna typ av testrigg fungerar bra för mindre motorer, då en större slaglängd krävs för att nå godtagbara tryck-, och temperaturförhållanden vid övre vändläge. Detta gör att dessa typer av testriggar blir väldigt stora och skrymmande för stora motorer. En annan nackdel är de oönskade vibrationer som ofta uppkommer vid kompressionstaktens slut. Dessa kan orsaka dåliga bilder och försvårar laserdiagnostik. (Baert, Frijters, Somers, Luijten, & De Boer, 2009, s. 2).

En Rapid Cycling Machine (RCYM) är en av de äldsta testriggarna som finns. Denna testrigg har ett specialkonstruerat cylinderhuvud. I *figur 2* kan fönster, bränsleinsprutningsystem och sensorer ses monterade. Det finns inga ventiler i cylinderhuvudet utan gasväxlingen liknar en tvåtaktare och sköts av sidoportar i cylinderfodret. Testriggar av denna typ är oftast encylindriga och roteras vanligen med en elmotor eftersom den energi som frigörs vid insprutning inte räcker till för att driva motorn. Ofta görs också tester med inert gas där ingen förbränning äger rum. (Bermúdez, García, Juliá, & Martínez, 2003, ss. 3–4).



Figur 2. Genomskäring av ett RCYM cylinderhuvud (Bermúdez, García, Juliá, & Martínez, 2003). RCYM testriggen vid användning (València, u.d.).

En annan typ av testrigg som är ganska ovanlig är en konstant flödesrigg (CPFR). I denna typ av testrigg sprutas bränsle in mot ett konstant flöde av trycksatt het luft varpå sprejens penetrering och förbränning studeras. Dessa kammare är ofta inuti ett rör, som ger goda möjligheter att integrera fönster i. Nackdelarna med denna typ av kammare är att dess temperatur och trycknivåer är kraftigt begränsade. (Baert, Frijters, Somers, Luijten, & De Boer, 2009, ss. 2–3).

De sista två typerna av testriggar som presenteras här hör båda till kategorin konstant volymkammare. Idén med denna kammare är att isolera en känd mängd av oxidationsmedel, vilket oftast är luft eller syre, i en kammare som tål höga tryck och temperaturer. Bränslet sprutas sedan in i den varma trycksatta kammaren och oxideras varpå sprejen och förbränningen kan studeras. Ett annat fall är att endast fylla kammaren med inert gas och endast undersöka bränslesprejen. Denna typ av kammare kännetecknas av väldigt god kontroll över temperatur och trycknivåer. (Baert, Frijters, Somers, Luijten, & De Boer, 2009, ss. 3–4).

Den första kammaren är en Constant Volume Hot Cell (CVHC). Denna är av väldigt simpel design och fungerar så att stål kroppen som kammaren består av värms upp för att generera rätta gasförhållanden inuti kammaren. Detta begränsar emellertid kammaren till lägre trycknivåer, eftersom de höga temperaturnivåerna i stål kroppen utgör en stor belastning på materialet. Andra nackdelar med denna typ av kammare är att det tar väldigt lång tid att ändra temperaturvillkor. I och med att väggarna är uppvärmda är detta ett steg bort från förbränningsmotorn, dessutom kommer förbränningsprocessen att påverkas oönskat av de varma väggarna. (Baert, Frijters, Somers, Luijten, & De Boer, 2009, ss. 3–4).

Den andra kammaren är en Constant Volume Pre-combustion Cell (CVPC). I denna kammare genereras lämpliga tryck- och temperaturnivåer med hjälp av att en mager gasblandning antänds. Bränslesprejen sprutas sedan in i resterna från förbränningen och oxiderar. Detta är en teknik som ökar flexibiliteten vid användning av kammaren, mer om detta under kapitlet för-förbränning. Denna typ av kammare är således lämpad för höga tryck och temperaturnivåer vilket har gjort den populär i modern tid. En nackdel är dock att tiden mellan tester är ganska lång. (Baert, Frijters, Somers, Luijten, & De Boer, 2009, ss. 3–4).

Vid det tekniska universitetet i Eindhoven har man gjort en grundlig litteraturundersökning av olika kammare och kartlagt dess för- och nackdelar med avseende på att undersöka bränslesprejer och förbränningsprocessen. I *figur 3* presenteras resultaten av denna undersökning. (Baert, Frijters, Somers, Luijten, & De Boer, 2009, s. 4).

Type of optical test rig	ORE	RCM	RCYM	CPFR	CVHC	CVPC
Optical accessibility	0	0	++	++	-	+
Similarity to the real engine situation	0	-	--	--	--	--
Free spray penetration distance	0	+	+	+++	++	++
Control on trapped gas p / T	0	+	0	++	++	++
Control on trapped gas composition (i.e. EGR)	0	-	0	+	++	+++
Flow field impact on combustion	--	-(-)	-	0	-	-
Test facility volume	0	+	0	0	++	++
Time to switch between operating conditions (i.e. T)	0	0	0	0	--	++
Time between tests [s] (*)	1	120-600	1	1-3	60	600

Figur 3. Jämförelse av olika optiska testriggar. (0 neutral, + bättre och - sämre) (Baert, Frijters, Somers, Luijten, & De Boer, 2009)

Det finns många olika typer av optiska testriggar varav ORE och RCM liknar mest en konventionell motor. Beroende på vad som skall undersökas, faktorer som påverkar resultaten och budget, är olika testriggar optimala för olika ändamål. I detta kapitel presenteras de vanligast förekommande optiska testriggar, vartefter dess egenskaper diskuteras. Presentationen av de olika testriggarna kommer att underlätta valet av koncept som passar konstruktionsuppgiften bäst

2.2 Optisk sprejdiagnostik

Grovt taget kan olika metoder för att åskådliggöra händelserna inuti förbränningskammaren delas in i två kategorier. Dessa kategorier benämns oftast som passiva och aktiva. De passiva metoderna utnyttjar det ljus som emitteras från förbränningsprocessen, medan de aktiva metoderna utnyttjar ljus som visualiserar förbränningen.

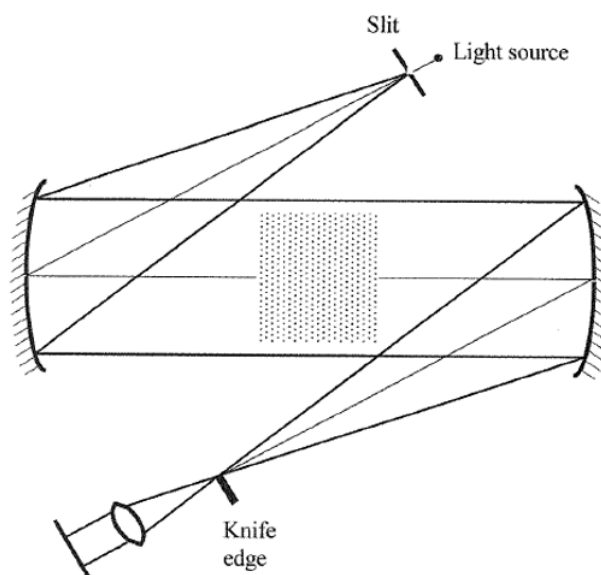
För att åskådliggöra det som sker inuti förbränningskammaren behövs apparatur som registrerar det som sker. Ofta används höghastighetskameror till detta ändamål, eftersom tiden för en insprutning äger rum under ett par millisekunder. (Seppä, 2011, ss. 16–17). Nedan presenteras och diskuteras olika metoder för att visualisera det som sker inuti kammaren. Dessa indelas i kategorierna passiva, med fokus på skuggfotografering och aktiva, med fokus på laserdiagnostik.

2.2.1 Passiva

Skuggfotografering är en samling metoder som används för att visualisera ljusets brytning genom genomskinliga medier t.ex. luft, vatten eller glas. Två av de vanligen förekommande metoderna är Shadowgraph- och Schlierenfotografering. Denna del beskriver kort teorin bakom fenomenet och presenterar praktiska anknytningar till tester i förbränningskammare.

Shadowgraph- och Schlierenfotografering är vanliga metoder att åskådliggöra flöden som nödvändigtvis inte är synliga för det mänskliga ögat. Metoden baserar sig på att olika gasers brytningsindex varierar med dess densitet vilket leder till förändringar i brytningsindex som yttrar sig så att ljuset avböjs. (Wikipedia, 2017). Ett bra exempel på detta fenomen är en asfalterad väg en varm solig dag. Då hetluft stiger upp från asfalt ser det ut som att vatten rinner längs vägen. I själva verket är det den varma luftens låga densitet som gett upphov till skillnader i brytningsindex som vårt öga uppfattar.

Båda metoderna går ut på att en stråle av parallellt ljus passerar genom objektet och fokuseras genom en lins mot kameran, som placerats precis bakom brännpunkten. En Shadowgraph blir en Schlieren om halva strålen skymms, oftast med en knivsegg, vid brännpunkten. Detta medför att systemet blir mera känsligt för skillnader i brytningsindex. (Fischer, 2013, ss. 10–11). I *figur 4* ses en bild av hur en Schlieren uppsättning kan se ut.



Figur 4. Schlieren fotografering är en metod för visualisering av sprej struktur och flamutbredning. (Zhao, 2012)

Höghastighetsfilmning av Shadowgraph och Schlieren har visat sig vara ett effektivt sätt att undersöka bränslesprejer, såväl oxiderande system som endast sprejer. Från skuggfotograferingar och passiv fotografering av bränslesprejer och förbränningsprocesser, genereras information om sprejpenetrering, spridningsvinkel, tidpunkten för självantändning, position för antändning och sotformationer. Denna typ av data används för att förbättra CFD-modeller, design av förbränningsutrymmen och insprutningsutrustning. (Pickett, Kook, & Williams, 2009, ss. 439–445).

I en förbränningskammare där bränslesprejer sprutas in kommer ljuset att avböjas olika beroende på vilket medie denna passerar, precis som i exemplet med varm asfalt. Tre olika skeden kommer att inträffa. Det första skedet inträffar då sprejen sprutas in och skillnaderna i brytningsindex mellan bränslet och gasen i kammaren registreras av kameran. Det andra skedet inträffar då sprejen förångas och kyler den kringliggande gasen vilket ger densitetsskillnader som registreras av kameran. Så småningom blandas gaserna och blir osynliga eftersom temperaturen är jämn och därav har blandningen samma brytnings-index. Det tredje skedet inträffar då gasblandningen självantänder och genererar höga temperaturer, följt av områden med låg densitet som kameran registrerar. (Pickett, Kook, & Williams, 2009, ss. 439–445).

De passiva metoderna för sprejvisualisering i förbränningskammare är enkla och ger information om sprejstruktur och förbränningsförlopp. De har genom historien använts flitigt av diverse universitet och laboratorium. För mer detaljerad information om t.ex. temperatur, blandningsprocesser och förbränningsradikaler behövs en mer kvantitativ metod som oftast är laserdiagnostik. Denna möjliggör bl.a. spatialt upplösta bilder i två dimensioner.

2.2.2 Aktiva

De aktiva metoderna för att undersöka bränslesprejer och förbränning vid höga tryck och temperaturer involverar oftast laserdiagnostik. I dessa fall används laser för att visualisera fysikaliska och kemiska fenomen. Denna del beskriver kort teorin för några av de vanligaste fenomen som utnyttjas med aktiva metoder, samt beskrivningar på hur dessa fenomen kan användas för att visualisera händelser i förbränningsutrymmet.

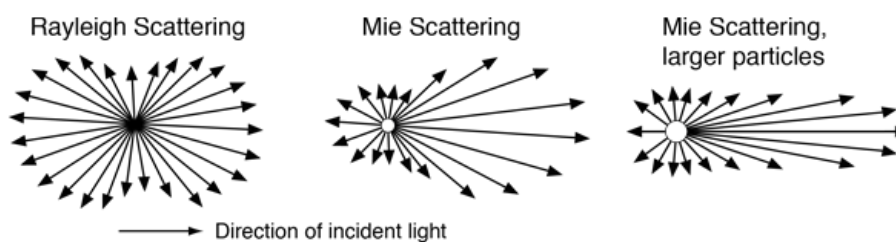
För att förstå hur de olika fenomen som används i samband med laserdiagnostik fungerar presenteras först en kort grundläggande teoridel om molekylär spektroskopi. Inom laserdiagnostik baseras många visualiseringstekniker på det faktum att molekyler eller

atomer och fotoner interagerar och utbyter energi mellan varandra. Den inre energin för en molekyl kan delas upp i tre grupper, elektronenergi, vibrationsenergi och rotationsenergi. När energi-fördelningen i medeltal är jämn mellan dessa tre grupper är molekylerna i termisk jämvikt. En molekyl kan endast innehålla en specifik mängd energi, som beror av energinivåerna i varje grupp, alltså, $E_{total} = E_{elektron} + E_{vibration} + E_{rotation}$. (Zhao, 2012, ss. 41–70).

En molekyls, eller en atoms energitillstånd kan vidare beskrivas av energinivåer. En molekyls, eller en atoms elektronkonfiguration, samt vibrations- och rotationsstatus bestämmer energinivåerna utgående från en av kvantmekaniken förutbestämd konfiguration. Förändringar från en energinivå till en annan resulterar i absorption eller emission av strålning. I detta sammanhang kommer det främst att handla om absorption och emission av fotoner. (Zhao, 2012, ss. 41–70).

Det finns tre typer av diffraktion som används för att undersöka partiklar. Dessa skiljer sig från varandra beroende på partikelstorlek samt hur ljuset avböjs från partiklarna. Mie spridning och Rayleigh spridning är två typer av diffraktion där ljuset avböjs med samma våglängd som det infaller, det vill säga elastiskt. Skillnaden mellan Mie och Rayleigh är partiklarnas storlek. Då Mie spridning inträffar är partiklarna lika stora som det infallande ljusets våglängd eller större. Vid Rayleigh spridning är partiklarna mycket mindre än det infallande ljusets våglängd. Skillnaderna leder till att ljuset avböjs olika. (LaVision).

Eftersom Mie spridning inträffar vid större partiklar används detta fenomen oftast för att mäta sprejpenetrering, droppstorlekar och flödesstrukturer. Rayleigh spridning å andra sidan används ofta för att åskådliggöra gasdensitet och gastemperaturer, då denna inträffar vid kollision med små partiklar. I *figur 5* ses ljusets avböjning beroende på partikelstorlek. (LaVision).



Figur 5. Jämförelse av Rayleigh och Mie spridning (Georgia State University, 2016)

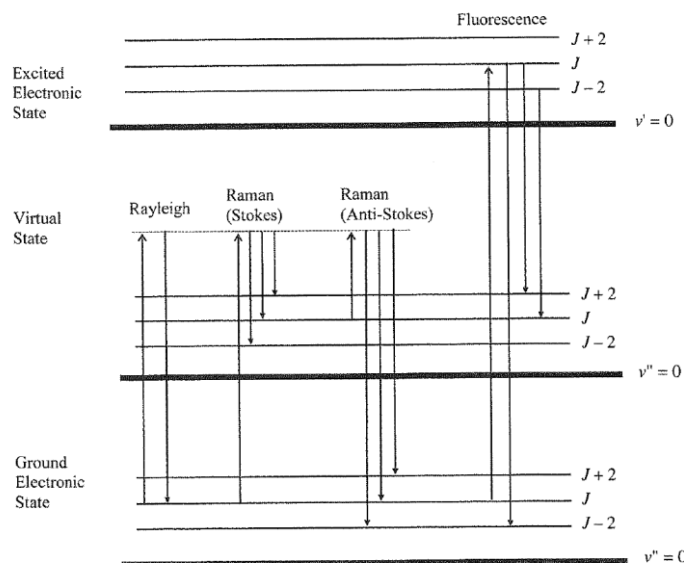
Den tredje varianten av hur ljuset kan avböja från partiklar är motsatsen till Rayleigh och kallas Raman spridning. Ljuset som avböjs vid Raman spridning är dock av annan våglängd än ljuset som infaller. Detta kan förklaras utgående från teorin om molekylär spektroskopi. Då molekylerna träffs av fotoner absorberas energin från fotonerna och molekylerna exciteras till ett tillstånd, så kallat virtuellt tillstånd, med högre energi. (Zhao, 2012, ss. 41–70).

Vid Rayleigh och Mie spridning sker kollisionen elastiskt. Detta innebär att fotonen som emitteras från molekylerna då den återgår till sitt grundtillstånd kommer att ha samma våglängd som den inkommande. Vid Raman spridning å andra sidan sker kollisionen oelastiskt, vilket betyder att mängden energi kommer att ändras. Följaktligen kommer fotonen som emitteras inte ha samma våglängd som den inkommande. Energin som fotonen får styrs av kvantmekanikens lagar och kan antingen vara lite större, anti-stokes, eller mindre, stokes, än den inkommande fotonens. (Zhao, 2012, ss. 41–70).

Våglängderna kommer även att bero av vilken typ av molekyl som fotonerna träffar, laser styrka och gasens densitet. Raman spridning används oftast i samband med temperaturvisualiseringar och detektering av gassammansättning. I *figur 6* ses ett energidiagram över hur molekylerna exciteras av det inkommande ljusets energi. (Zhao, 2012, ss. 41–70).

Ett annat sätt att undersöka gaser och fluider är med en metod som kallas laser inducerad fluorescens (LIF). Denna metod fungerar så att ett spårämne, ifall fluiden inte har fluorerande egenskaper, tillsätts i gasen eller fluiden som skall undersökas. När det fluorerande ämnet träffas av lasern kommer dess molekyler att exciteras till en högre energinivå, vanligen benämnd exciterat elektrontillstånd. Molekylerna kommer efter ett ögonblick att vilja återgå till sin grundnivå, men på vägen kommer denna att emittera en fluorerande foton. Den utgående fotonens våglängd styrs av de ingående fotonernas våglängder. Beroende på fluorescerande ämne bör ingående våglängd väljas så att energin räcker till för att excitera molekylerna till en högre energinivå. Eftersom möjligheterna att välja våglängder och filtrera bort oönskade ger denna metod goda möjligheter att studera bränslesprejer, även då de förångats. Denna metod används ofta för att visualisera flöden

och blandnings-processer. I *figur 6* visualiseras molekylernas excitering orsakat av det inkommande ljusets energi. (Zhao, 2012, ss. 41–70).



Figur 6. Schematiskt energidiagram som visualiserar principerna för Rayleigh spridning, Raman spridning och laser inducerad fluorescens. (Zhao, 2012).

Ett annat fenomen som används för att aktivt visualisera händelser i förbränningsutrymmen är chemiluminiscence. Denna metod baserar sig på att en kemisk reaktion emitterar fotoner, som fotograferas genom ett filter av en höghastighets kamera. Beroende på vad som studeras väljs kemikalie tillsatser som reagerar med delprodukter i förbränningen och visualiserar var dessa delprodukter befinner sig. Ett exempel på detta är formaldehyd som reagerar med mellanprodukten CH och visualiserar kalla lågor under självandtändningsprocessen. Ofta kombineras detta med passiva metoder så som Schlieren och för att förbättra dess spatiala upplösning. (Zhao, 2012, ss. 248–255).

För att undersöka bränslesprejer, förångning och förbränning med hjälp av laserdiagnostik används fenomen ovan. Vid laserbaserad diagnostik produceras ett laserark med hjälp av linser, som möjliggör två dimensionella bilder och fotograferingar sprejens olika tvärsnitt. Laserarket kombinerat med de ovannämnda fenomenen och olika filter genererar spatialt och temporalt upplösta bilder. Laserarket placeras vanligen så att det klyver hela sprejen. Kameran placeras vinkelrätt mot laserarket för att fotografera det som sker i tvärsnittet. Laserarket bör även ha en dump, där arket förintas och inte reflekteras tillbaka och stör mätningarna. Även fotografering av Raman och Rayleigh spridning sker vanligen vinkelrätt mot laserns riktning, där spridningen når sitt minimum.

Förutom dessa nämnda fenomen kan också laserarken och dess energi till att värma fördefinierade områden, så att sotpartiklarna i detta område börjar bete sig som en svart kropp som utstrålar värme. De börjar alltså glöda. Denna typ av undersökning används för att undersöka sotformationer och kallas för laser inducerad incandescence (LII). (LaVision).

De aktiva metoderna för att visualisera händelser i förbränningsutrymmen med hjälp av laser baserar sig på ljusets diffraktion, samt molekyler och atomers energitillstånd. Genom att studera de fysikaliska och kemiska egenskaper dessa fenomen uppvisar kan dessa användas för att generera kvantitativ och spatiotemporal information om händelser i förbränningskammaren.

2.3 Fönster

Den komponent som är mest ömtålig och kritisk för kammarens funktionalitet är dess fönster. I detta kapitel presenteras tumregler för design av opto mekaniska system, samt olika fönstermaterial och dess egenskaper.

2.3.1 Teori om olika fönster

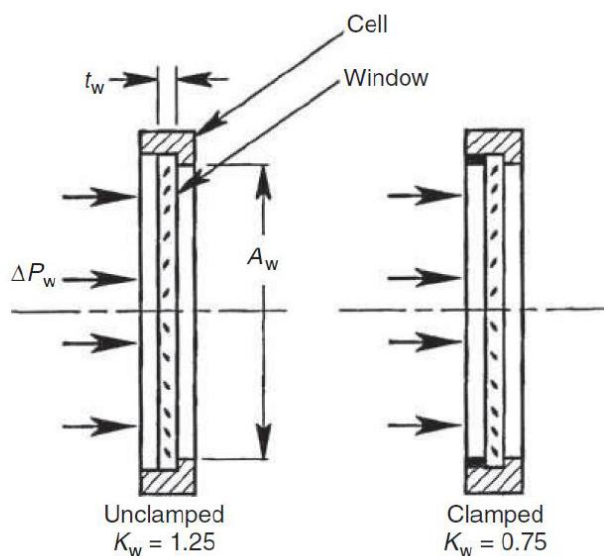
I en konstruktion där ett fönster kommer att utsättas för stora tryckskillnader är fönstrens tjocklek en av de centrala parametrarna i systemets design. Ett fönsters tjocklek kommer att påverka systemets egenskaper på två sätt. Det ena är fönstrens hållfasthet och det andra är den optiska prestandan. I denna del diskuteras tjockleken påverkan av fönstrens båda egenskaper samt tumregler för dimensionering av fönster med avseende på tjocklek.

Ur Opto-Mechanical Systems Design av Yoder Jr (2006) framgår följande tumregel för dimensionering av ett fönsters tjocklek. Ett plant cirkulärt fönster som utsätts för en tryckskillnad, ΔP_w , på en ostödd yta, A_w , bör ha minst en tjocklek, t_w , för att garantera en säkerhetsfaktor, f_s , mot fönstermateriallets brottgräns, S_f . För beräkning av fönstrets tjocklek gäller då sambandet,

$$t_w = 0.5A_w \sqrt{\left(K_w f_s \frac{\Delta P_w}{S_f}\right)} \quad (1)$$

där K_w är en konstant som beror av hur fönstret är fixerat. För ett ofixerat fönster är konstanten, $K_w = 1.25$ medan för ett fixerat är konstanten, $K_w = 0.75$. Säkerhetsmarginalen mot brottgräns bör vara kring fyra. Olika fönstermaterial och dess brottgränser varierar väldigt kraftigt. Fönstermaterial och dess egenskaper presenteras noggrannare i kapitel 2.3.2 Optiska material. (Yoder Jr, 2006, ss. 323–329).

Utgående från det matematiska sambandet och de angivna värdena på konstanten, K_w , kan det konstateras att fönstrets erforderliga tjocklek varierar väldigt kraftigt beroende på hur fönstret är fixerat. Ifall fönstren fästs så som i *figur 8* kommer maxspänningarna för fallet där fönstret är ofixerat att återfinnas i fönstrets centrum, medan om fönstret spänns fast av någon typ av fläns kommer maxspänningarna att återfinnas vid den area som förspänningskraften verkar. (Yoder Jr, 2006, ss. 323–329).



Figur 8. Fönstertjocklek, fixerat jämfört med ofixerat. (Yoder Jr, 2006).

Den optiska prestandan kommer att förändras då tjockleken på fönstermaterialet ändras. Detta skiljer sig för olika material och kan beskrivas av avvikelser, Optical Path Difference (OPD), avser skillnaden som uppkommer mellan två ljusstrålar då den ene tvingas genom ett optiskt tätare material och bromsas ner. Detta medför en fasskillnad mellan ljusvågorna som då kan påverka t.ex. mätningar där fönstertjockleken varierar. För en ljusstråle genom ett optiskt material utsatt för en tryckskillnad kan *OPD* approximativt beräknas enligt sambandet

$$OPD = 0.00889(n - 1) \frac{\Delta P_w^2 A_w^6}{(E_G^2 t_w^5)} \quad (2)$$

där n , är materialets brytningsindex och E_G , är Youngs modul, som beror av material. Ifall ett fönster dimensioneras med avseende på optisk prestanda kan fönstertjockleken med fördel lösas ut ur ovanstående samband. (Yoder Jr, 2006, ss. 323–329).

2.3.2 Optiska material

I föregående del presenterades de matematiska samband som är relevanta för beräkningar av fönstrens tjocklekar. Utgående från dessa inses vikten av det material som väljs för fönstren. I denna del presenteras en del olika material vars egenskaper kan vara av vikt vid val av fönstermaterial.

De viktigaste materialegenskaperna för ett fönster, som används för optiska undersökningar, är materialets fysikaliska egenskaper så som brottgräns, men också förmåga att bära elektromagnetisk strålning. Alla material kommer att i någon mån absorbera eller reflektera den strålning som de utsätts för. Generellt för transparenta material gäller att vissa våglängder kommer att absorberas eller reflekteras mer än andra. Förmågan att bära strålning är inte perfekt, utan den utgående strålens intensitet kommer att vara lägre än den inkommande strålens intensitet. Vid val av fönstermaterial är det därför viktigt att beakta olika radikalers och molekylers intensitets toppar för att kunna välja ett material som är transparent i dessa regioner. *Tabell 1* nedan visar intensitetstoppar för olika molekyler och radikaler. I *bilaga 1* ses jämförelser mellan olika materials transmissions spektran och tjocklekar. (Yoder Jr, 2006, s. 100).

Tabell 1. Våglängderna för intensitetstoppar av strålning från molekyler och radikaler i en förbränningsmotor (Zhao, 2012, s. 243)

CH (nm)	OH (nm)	CH ₂ O (nm)	CO ₂ (μm)	C ₂ (nm)	CHO (nm)
314	281-283	368	2.69-2.77	470-474	320, 330
387-389	302-309	384	4.25-4.3	516	330, 340
431		395		558-563	355, 360
		412-457			380,385

De finns många olika optiska material. Dessa kan kategoriseras som plaster, optiska glas och kristaller. För undersökningar där ingen oxidation äger rum kan med fördel olika plaster, så som plexiglas och polykarbonat användas. Dessa är tillräckligt starka för moderata tryck. Plasterna är ofta också ett väldigt förmånligt alternativ. Vid optiska undersökningar av förbränning kommer dock materialgränserna för tryck och temperatur att överstigas. (Zhao, 2012, ss. 8–10).

För applikationer med förbränning har optiska glas varit ett gott alternativ. Vid optisk diagnostik är det ofta nödvändigt att ljus med våglängder från UV-regionen och uppåt kan passera fönstret. Ett kronglas vid namn BK7 uppvisar goda genomstrålningsegenskaper för ljus av våglängder mellan 350 – 2000 nm. Vid slutet av UV-regionen kan dock detta inte material användas, eftersom ljus av våglängder kortare än 300 nm inte tar sig igenom. (Zhao, 2012, ss. 8–10).

Andra material som uppvisar goda genomstrålningsegenskaper är smält kiseldioxid och smält kvarts. Dessa består av samma kemiska sammansättning, men dess tillverkningsteknik och renhet skiljer sig från varandra. Smält kvarts tillverkas genom smältning av kiseldioxidsand och naturlig kvarts. Smält kiseldioxid å andra sidan tillverkas genom flammhydrolys av kiselhalid. Skillnaderna i materialens tillverkningsteknik gör att smält kiseldioxid är betydligt renare material och intern absorbering av ljus i UV regionen är därför betydligt lägre än för smält kvarts. Smält kiseldioxid används för våglängder ända ner till 170 nm, medan smält kvarts kan användas för våglängder ner till 250 nm. Materialen har väldigt låg längdutvidgningskoefficient och värmeledningsförmåga och kan användas kontinuerligt ända upp till 1000 °C. (Zhao, 2012, ss. 8–10).

Safir är ett annat ämne som vanligen används i optiska sammanhang. Detta material är väldigt hårt och uppvisar goda mekaniska egenskaper. Dess resistivitet mot kemiska angrepp är också väldigt god. Safir kan användas för våglängder från 180 nm ända till 5500 nm. På grund av inre reflektionsförluster, som tilltar märkbart i UV regionen, försämras dock genomstrålningsegenskaperna. Användandet av safir i optiska samband begränsas ofta av dess höga kostnader och används i specialfall, ofta där de mekaniska egenskaperna spelar stor roll. (Zhao, 2012, ss. 8–10).

Beroende på vilka våglängds intervall som skall användas, samt erforderliga mekaniska egenskaper kan olika material för optiska fönster väljas. I *bilaga 2* ses material-

specifikationer för en del fönstermaterial. De optiska fönstrens design och val av material diskuteras i kapitel 4.2.

2.4 Tätningar

Ett av de mest kritiska maskinelementen för den optiska testriggens funktion är tätningarna. En tätningens uppgift är att förhindra medietransport. Tätningar är ett av de vanligaste maskinelementen, endast skruvar och skruvförband är vanligare. I denna del presenteras allmän teori, främst o-ringars funktion och en del tumregler för val av tätningar.

Läckage kan uppstå där det råder tryckskillnader mellan två maskindelar. Tätningarnas uppgift är att förhindra detta läckage oavsett vilket medie som läker. Vanligen är det vätskor, gaser eller fasta partiklar som bör tätas. I vissa fall kan det även handla om frätande och korrosiva vätskor. Tätning av dylika kemikaliskt belastande fluider kräver kemiskt resistent tätningar. (Mägi & Melkersson, 2006, ss. 283–299).

Tätningarna kan delas in i olika grupper på flera olika sätt. Ett vanligt sätt att dela in dem är med kinematiska indelningsgrunder där tätningssituationerna är statiska eller dynamiska. Statische tätningar avser berörande tätningar, där läckaget kan tätas praktiskt taget fullständigt. Dynamiska tätningar avser täta delar som utför translations rörelser eller rotationsrörelser. Dessa kan vara både berörande och beröringsfria, vilket betyder att dessa tätningar kommer att i någon mån läcka. Tätningarnas funktionsduglighet definieras i Mägi och Melkersson (2006) av följande punkter:

- Tätningens förmåga
- Trycktålighet
- Kemisk resistens
- Rörelsemotstånd
- Nötningsbeständighet
- Inbyggnadsmått
- Övriga krav

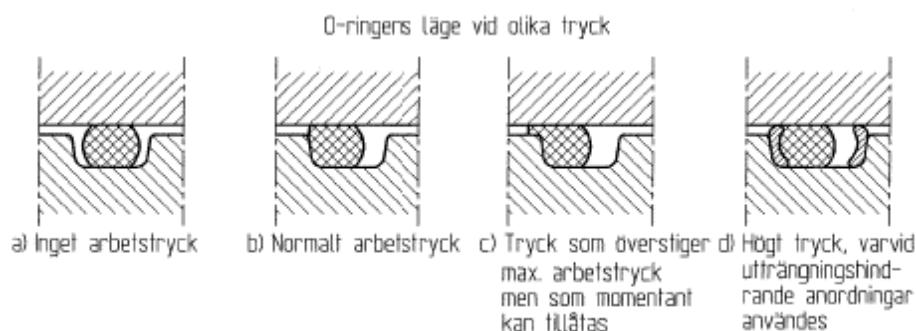
Vid dimensionering av en tätning bör dessa krav beaktas och den valda tätningen bör tillgodose kraven inom rimliga gränser. I *bilaga 3* definieras en allmän översikt för olika tätningar och dess funktionsområden. (Mägi & Melkersson, 2006, ss. 283–299).

I statiska tätningsfall förekommer deformationsmässigt inga relativa rörelser. Ytfinheten är därför en viktig parameter för att läckage inte skall förekomma. Ifall läckage uppkommer i en statisk tätning beror detta på en av följande orsaker:

1. Fel inbyggnad och skadade tätningsytor
2. Förlorad initialklämning av tätningskroppen
3. Bearbetningsrepor
4. Vibrationer eller tryckpulser som orsakar att tätningens funktion ändrar till dynamisk.

Fall 1 och 2 kan upptäckas vid okulär granskning av tätningen och kan förekomma även om tätningen är korrekt dimensionerad. Fall 3 och 4 är svåra att upptäcka och är ofta fel orsakade av feldimensionering. (Mägi & Melkersson, 2006, ss. 283–299).

Ett av de vanligaste tätnings-elementen som förekommer för statiska och en del dynamiska tätningar är O-ringstättningar. O-ringen placeras i ett spår som finns bearbetat i ena maskindelen. När den andra maskindelen sätts på plats pressas O-ringen, som är gjord av en elastomer, ihop och tätar mellan ytorna. I statiska sammanhang skapar monteringen erforderlig tätnings funktion. I dynamiska fall eller vid flytande medier bildas en hydro dynamisk film mellan O-ring och den rörligamaskindelen. Denna funktion minskar nötningen men orsakar läckage, vilket är oundvikligt. I *figur 8* visualiseras O-ringens tätningsfunktion i olika tryckfall. (Mägi & Melkersson, 2006, ss. 283–299).



Figur 8. O-ringens funktion. (Mägi & Melkersson, 2006).

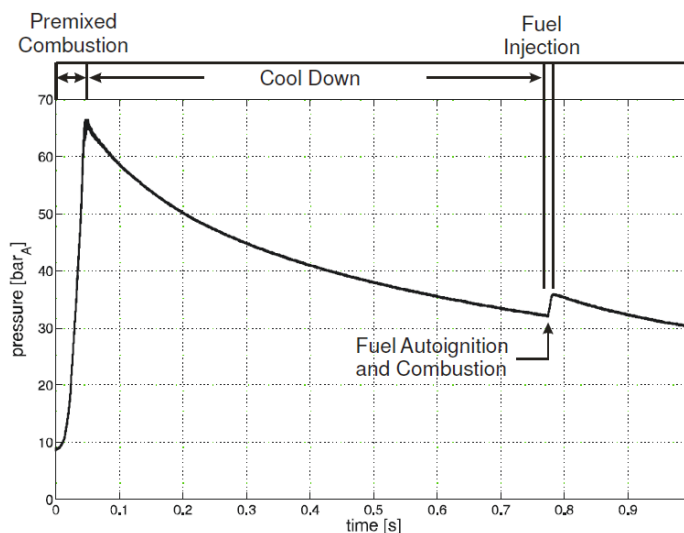
Vid normal montering tätar O-ringen upp till 100 bar, vid högre tryck börjar O-ringen pressas ut, enligt belastningsfall C i *figur 8*. Vid tryckskillnader högre än 100 bar och upp till maximalt 500 bar bör stödringar användas. Stödringarna förhindrar O-ringen från att pressas ut från spalten, så som i belastningsfall D i *figur 8*. (Mägi & Melkersson, 2006, ss. 283–299).

Valet av elastomer för o-ringen är kritiskt för dess funktion och beror starkt av temperatur och fluid som tätningen skall fungera i. För de flesta vätskor och gaser finns det material som är resistent. (Mägi & Melkersson, 2006, ss. 283–299).

2.5 För-förbränning

För att generera lämpliga temperatur- och trycknivåer för bränsleinsprutningen har användningen av för-förbrännings tekniken i moderna optiska konstantvolymkammare blivit allt vanligare. Denna del presenterar för-förbrännings tekniken, dess funktion, samt några praktiska tips från tidigare tester.

Tekniken går ut på att kammaren töms med en vakuumpump för att sedan fyllas av gaser i en förutbestämd ordning för att få rätt blandningsförhållande. Fyllnadsprocessen resulterar i en mager gasblandning som kan antändas med en gnista. Kammartrycket övervakas noggrant och rätt blandning av gaser kontrolleras genom mätning av tryckets förändring då gaserna släpps in i kammaren. Varje gas kommer att ha ett förutbestämt partialtryck som motsvarar gasens volym-% i blandningen. Den magra gasblandningen antänds inuti kammaren varefter tryck-, och temperaturnivåerna höjs, enligt *figur 9*, och skapar en trycktopp. Trycket för gasblandningen sjunker sedan vart eftersom förbränningsvärmen transporteras bort genom kammarkroppen. Då lämpligt tryck uppnås injiceras sedan bränslesprejen. (Baert, Frieters, Somers, Luijten, & De Boer, 2009, ss. 8–10).



Figur 9. Principen för för-förbrännings teknikens funktion.
(Baert;Frijters;Somers;Luijten;& De Boer, 2009).

Den magra gasblandningen kan bestå av lite olika komponenter, men oftast är det en blandning av syre, kväve, etylen, acetylen och vätgas. Att endast använda vätgas skulle innebära att ingen koldioxid skulle finnas i förbränningsresterna, men dock väldigt mycket vattenånga efter förbränning av vätgas. Detta kan orsaka problem med vatten som kondenserar på fönstren. I tidigare arbeten med dylika optiska testriggar har förhållandet mellan etylen och vätgas varit mellan 1:4 – 1:11.4. Då gaserna väljs är det alltså skäl att fundera över förbränningsprodukterna, men också gasernas förmåga att antända. Eftersom att gasblandningen kommer att vara väldigt mager med ett kraftigt syreöverskott måste de brännbara gaserna vara lättantändliga för att kunna antändas av ett tändstift. (Baert, Frijters, Somers, Luijten, & De Boer, 2009, ss. 8–10).

För att ytterligare efterlikna luftens sammansättning, densitet och specifika värmekapacitet kan argon tillsättas. Argonets låga specifika värmekapacitet kommer att kompensera vattenångans och koldioxidens höga värde i för-förbrännings restgaser. Andra viktiga parametrar som kan påverka bränsleinsprutningen är gasens viskositet och värmeledningsförmåga. (Baert, Frijters, Somers, Luijten, & De Boer, 2009, ss. 8–10).

I rapporten av Baert et al (2009) diskuteras en del praktiska tips och utmaningar med för-förbrännings tekniken. En av utmaningarna är kunna säkerställa metodens repeterbarhet. Repeterbarheten diskuteras och testas i den kammare som designats. För att undvika extra felkällor bör också låga partialtryck av gaser undvikas. Då kammaren fylls med gaser bör fyllnads ordningen tas i beaktande för att processen skall ske så säkert som möjligt. Vidare

upptäcktes det i ett tidigt skede också frätskador på injektormunstycken som använts vid tester i simulerad luft. Detta löstes genom att ytbehandla injektormunstycken med TiN. (Baert, Frijters, Somers, Luijten, & De Boer, 2009, ss. 8–10).

3 Tidigare erfarenheter och utgångspunkter

I detta kapitel presenteras kort en del av de arbeten och erfarenheter som finns på Wärtsilä om detta tema. Syftet är att ta lärdom av de tidigare erfarenheter, återanvända goda konstruktionslösningar, jämföra uppgiften mot dessa samt att presentera en riktgivande kravlista och utgångspunkter.

3.1 Erfarenheter på Wärtsilä

Undersökningar av händelser inuti förbränningsutrymmen har på senare år intresserat mer och mer. På Wärtsilä har en del projekt genomförts som har bringat nya erfarenheter till företaget. Nedan presenteras en del av de projekt och utrustning som kan bringa mervärde till den konstruktions uppgift som detta arbete handlar om.

Jussi Seppä konstruerade år 2011 en uppdatering till singelcylindermotorn, belägen på Vasklot, som möjliggjorde optiskt tillgänglighet till förbränningsutrymmet. Syftet med detta projekt var att öka förståelsen för vad som sker inuti cylindern på gasmotorer med förkammare i Wärtsilä 34 storlek. Målet med projektet var bl.a. att förbättra CFD-modellerna för gasförbränning. I Seppäs rapport från konstruktionsarbetet beskrivs utmaningar och lösningar på konstruktionsproblem. Speciellt fönster och fönsterhållarna är nyckeldelar som är väldigt ömtåliga. Design av optomekaniska system är något som inte görs allt för ofta på Wärtsilä, vilket också betyder att erfarenheter inom området saknas. (Seppä, 2011).

Vid samma tidpunkt konstruerades en CVHC-testrigg av Kaj Herrman för Wärtsilä Switzerland Ltd. Denna sprejkammare representerar en stor tvåtaktsmotor, med injektorer anslutna till sidorna av den cylinderformade kammaren. Denna kammare var emellertid en förbättrad version av CVHC-kamrarna som nämns i teorin. Kammarkroppen värms inte upp, utan luften som fyller kammaren är upphettad av en så kallad re-generator. (Herrmann, 2011).

Kammaren försågs med tre små runda fönster fästa på strategiska platser på cylinderflänsen. För att visualisera en hel sprej görs flera insprutningar, där flänsen roteras för att nästa del av sprejen skall bli synlig. Gasväxlingen för denna kammare sköts av en pneumatisk cylinder

som pressar fast en ventil, mot trycket. Denna fungerar samtidigt som en övertrycksventil, som öppnas då trycket överstiger ett fördefinierat värde. I presentationen av kammaren noteras det speciellt att fönstren snabbt blir smutsiga, vilket snabbt försämrar undersökning av händelser inuti kammaren. (Herrmann, 2011).

På Wärtsiläs bränslelaboratorie, i Vasa, finns dessutom en modifierad RCM-testtrigg, som också utför en expansionstakt. Denna används för att undersöka olika gaser, gasblandningar och deras knockningsbeständighet. Till denna finns även möjlighet till optiska undersökningar genom en kolv med fönster, samt fönster i en distansplatta mellan cylinderfoder och cylinderhuvud. Förutom RCM-testtriggen finns även en Combustion Research Unit (CRU) på bränslelaboratoriet. Denna används för att simulera dieselprocessen och undersöka olika bränslens självantändningsförmåga. Denna testtrigg ger dock inga möjligheter till optiska undersökningar.

Förutom nämnda testtriggar finns det en mängd med projekt som tangerar detta ingenjörsarbete. Bland dessa kan höghastighetsfilmning av insprutningar vid normalt temperatur och tryck samt laserbaserade undersökningar av flöden i en optisk förkammare nämnas. I Norden finns även flera universitet som aktivt genomför olika forskningsprojekt i optiska testtriggar. Bland dessa kan Lunds Universitet och Chalmers Tekniska Högskola nämnas. Dessa har gedigen erfarenhet av optiska testtriggar och laserbaserad diagnostik.

3.2 Utgångspunkter och krav

Utgående från de projekt som tidigare gjorts på Wärtsilä är detta någonting nytt. Kaj Herrmans (2011) CVHC kammare är den som mest likar den kammare som det nu finns ett behov av. Utgående från litteraturstudier och övriga marknadsstudier kan det konstateras att olika typer optiska förbränningskammare finns, men de flesta är konstruerade för betydligt mindre motorer så som lastbilar och personbilar.

Denna uppgift startas med andra ord från ett tomt bord, vilket ger friheten att fritt välja de komponenter och lösningar som ger den bästa funktionaliteten för kammaren. Därför är det viktigt att lista grundläggande krav och önskemål genom vilka den optiska testtriggens funktionalitet definieras. I *tabell 1* ses de preliminära kraven för denna konstruktionsuppgift listade.

Tabell 2. Preliminär kravlista, enligt Pahl & Beitz

Ändringar	K Ö	Målpunkter, K=Krav, Ö= Önskemål	Viktfaktor
		Geometri	
	K	Minst W31 injektor	
	K	Injektor hål 5-11st	
	K	Paraplyvinkel 150°-170°	
	K	Sprej-penetrering 180 mm	
	K	Minst 3st fönster i olika riktningar	
	K	Stor optisk tillgänglighet, hela sprejen från ett hål synlig	
	K	Möjlighet att rotera injektorn ("twin needle")	
	K	Möjlighet att isolera en sprej	
	K	Olika injektorer skall kunna användas	
	Ö	Sprej-Vägg-Kolv interaktion (motor likhet)	
	Ö	4 fönster	
	Ö	Fönstertjocklek max 80mm	
		Energi	
	K	Max tryck 400 bar	
	K	Förvärmning av kammarkroppen till 100°C	
		Signaler	
	K	Tryck sensorer	
	K	Temperatur sensorer	
		Underhåll	
	K	Lätt och snabbt att putsa fönster	
		Material	
	K	Fönster materialet bör släppa genom våglängder mellan 200 och 2000nm	
	Ö	Använda så många befintliga delar som möjligt	
		Schema	
	Ö	Förstudie färdig 31.08.2018	

4 Design

I detta kapitel presenteras konstruktionsarbetet av kammaren och de viktigaste komponenterna som behövs för att uppfylla kraven och garantera funktionaliteten för kammaren. Nyckelfunktionen för detta kapitel är att använda den information som framkommer i de tidigare kapitlen för att konstruera en optisk testrigg.

4.1 Kammarkroppen

Utgående från presentationen av olika testriggar i kapitel 2.1 kommer en kammare av typen CVPC att uppfylla de preliminära krav som ställdes på kammaren i föregående kapitel. Kammaren kommer således att värmas med för-förbrännings teknik vilket möjliggör högre

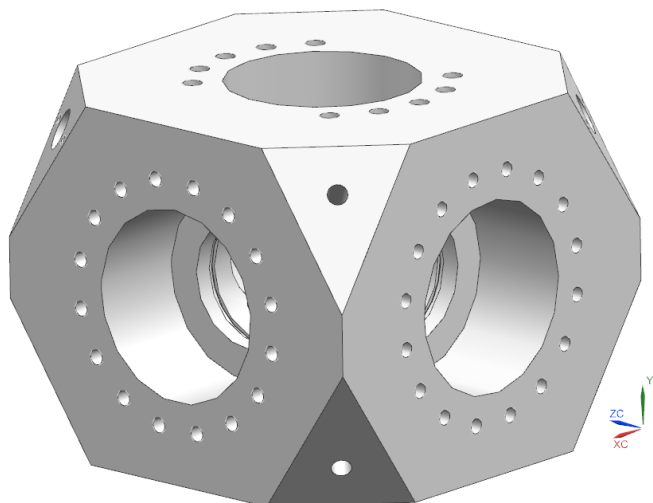
maxtryck men också flexibilitet då en god kontroll över gasförhållanden som möjliggör undersökningar i olika gasförhållanden.

Kammarkroppen bör vara kraftigt överdimensionerad och av god stålqualität, främst med tanke på säkerhetsaspekter, ifall tillåtet maxtryck överstigs. Kombinationen av god gaskontroll och överdimensionerad stål kropp är grunden för en säker kammare. Exempelvis en övertrycksventil skulle aldrig hinna öppna innan kammaren sprängs, eftersom att förbränningsförloppet och tryckstegringen sker under ett ytterst kort tidsintervall.

Utgående från teorin i kapitel 2.2 om optisk sprejdiagnostik bör kammaren ha minst tre fönster. De passiva metoderna som Schlieren och Shadowgraph behöver fönster rakt igenom kammaren, medan de aktiva metoderna som laserdiagnostik behöver vinkelrät åtkomst till kammaren. Laserark bör kunna placeras så att olika tvärsnitt av sprejen kan studeras. För att undvika att laserarken börjar reflekteras runt i kammaren och störa mätningarna är det skäl att uppfylla önskemålet om ett fjärde fönster för att släppa ut laserarket ur kammaren.

Det är fördelaktigt även att fönstren är löstagbara och kan ersättas med stålmodeller och snabbt kunna pustas vid eventuell nedsmutsning. Fönstrets storlek bör enligt kravlistan tillåta sprejpenetrering upp till 180 mm. Fönstrens form, tjocklek och yttre mått påverkar direkt kammarkroppens konstruktion. Dessa diskuteras i kapitel 4.2.

I det inledande skedet evaluerades olika lösningsalternativ och andra kammare som finns runt om i världen. För att lättast kunna montera fönster vore plana ytor att föredra. Å andra sidan är cylindriska formationer mera motorlika och lättare att konstrueras mot stora tryck. Eftersom att testriggen skall möjliggöra effektiva optiska undersökningar favoriseras en kammardesign med plana ytor, där fönster lätt kan monteras för att erhålla maximal optisk tillgänglighet till kammaren. I *figur 10* illustreras kammarkroppens design, som synes så påminner den om den kammare som utvecklades på Eindhovens tekniska högskola (Baert;Frijters;Somers;Luijten;& De Boer, 2009). Kammarkroppen tillverkas från ett solitt rätblock av stål, där ett stort hål bearbetas från kubens alla sidor. Dessa hål utrustas med gasväxlingssystem, bränsleinsprutningssystem, fönster eller övrig önskvärd utrustning.



Figur 10. Kammarkroppens design

Stålstommen för kammaren måste vara av god kvalitet, där inga inneslutningar eller sprickor finns, som kan försvaga konstruktionen. Bearbetning från rätblockets alla sidor genererar förbränningsutrymmet i rätblockets mitt. Till rätblockets varje sida kommer utrustning i form av gasväxlingsadapter, bränslesystem, fönster samt en del mätutrustning från kubens hörn, att monteras. Även hörnen kommer att planas och utrustas med en utbytbara moduler.. I kapitel 5.1 presenteras en FE-simulering av stål kroppen, för att säkerställa att spänningsnivåerna är på godtagbara nivåer vid maxtryck.

4.2 Fönster

Den optiska kammarens fönster kommer att vara den del som är den mest kritisk för kammarens funktion, men också den ömtåligaste delen. Fönstrens design och fixering varierar från kammare till kammare och många olika lösningar finns tillgängliga på marknaden. I denna del diskuteras olika lösningar för hur kammarens fönsterdesign bör se ut.

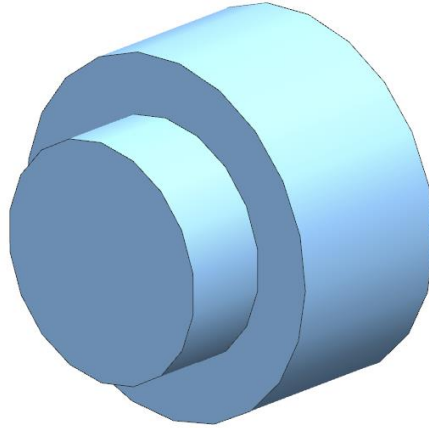
För att effektivt kunna evaluera olika typer av konstruktionslösningar gjordes approximativa beräkningar på fönstrens tjocklek utgående från ekvation (1). De material som är av intresse är utgående från teorin om optiska material safir och smält kiseldioxid. Dock kommer smält kiseldioxid att användas i första hand, dels för att den är förmånligare men huvudsakligen för att detta material uppvisar, enligt teorin, bättre optiska egenskaper än safir. Tjockleken på ett fönster med effektiv diameter 180 mm, gjorda av smält kiseldioxid är 127 mm för klämda och 164 mm för icke-klämda. Tjockleken för fönster gjorda av safir är 57 mm för

klämda och 73 för icke-klämda. Fullständiga beräkningar finns tillgängliga i *bilaga 4* där också OPD:s beroende av tjocklek och material finns beräknade enligt ekvation (2). Materialdata för beräkningarna är hämtade från *bilaga 2*.

Den första tanken var att utnyttja en liknande lösning som Jussi Seppä, vars arbete kort presenterades i kapitel 3.1, använde i singelcylindermotorn. Denna hade kvarts fönster som limmades fast i fönsterramen. I denna applikation var det limmets skjuvhållfasthet som upptog de spänningar som uppkommer av de stora kammartrycken. Detta innebär att fönstren med ram blir väldigt kompakta. Limmen som används har vanligen en skjuvhållfasthet på ca 6 MPa, vilket kräver att limmet bredds ut på en stor yta för att limmet skall hålla. Eftersom att maxtrycket i denna kammare är dubbelt så stort som i Seppäs singelcylinder, blir den erforderliga ytan för limmet väldigt stor och innebär en tjocklek på 300 mm om diametern är konstant. En grov överslagsberäkning finns tillgänglig i *bilaga 4*.

Ett annat lösningsalternativ vore att använda koniska fönster, liknande som kammaren på Eindhovens tekniska högskola utrustades med. Idén med koniska fönster jämte fönsterhållare är att spänningarna från kammartrycket skall minimeras i fönstren och upptas av den fjädrande fönsterhållaren. (Baert, Frijters, Somers, Luijten, & De Boer, 2009, ss. 4–5). Fönsterhållarnas konstruktion blir med andra ord kritisk, en styv konstruktion leder till att fönstren havererar medan en elastisk konstruktion innebär att fönsterramens material närmar sig plastisk deformation. En av nackdelarna med denna konstruktion är även kostnaden för fönstren. Komplicerade former med höga toleranser medför höga tillverkningskostnader för fönstren.

Den lösning som bäst verkar passa för denna kammare presenteras av *figur 11*, där fönstret har raka kanter med två olika diametrar. Detta genererar en yta genom vilken spänningarna kommer att föras vidare till fönsterhållarna. En konstruktion som denna innebär att fönstret är klämda vilket ger en mindre tjocklek på fönstret. Den spänningsöverförande ytans storlek beror av fönstermaterial, som diskuterades i kapitel 2.3.2 och dess mekaniska egenskaper som ses för olika material i *bilaga 2*. FE-simulering, som diskuteras i kapitel 5.1, för fönstren del visade dock att teorin lämnar rum för tolkningar.



Figur 11. Fönsterdesign

Smält kiseldioxid har en väldigt låg brottgräns på ca 60 MPa, vilket betyder att kontakt ytan mellan fönster och hållarna blir stor. Enligt Yoder Jr (2006) kan den yttre diametern, D_y , approximativt bestämmas till $D_y = 1.5A_w$. I denna applikation blir fönstrets yttre diameter då 270 mm. Fönstret är testriggens ömtåligaste komponent, speciellt med tanke på att smält kiseldioxid används framom safir tack vare dess goda optiska egenskaper. Fönstret dimensioneras enligt de approximativa formler som presenteras i teorin och kontrolleras med FE-simuleringar.

4.2.1 Tätningar

En av de största utmaningarna med konstruktionen av den optiska testriggen är att välja tätningar som klarar av de temperatur och tryckförhållanden som råder inuti kammaren. I denna del diskuteras olika möjligheter för val av tätningar och dess funktion.

För att förhindra medieutbyte med kammarens förbränningsutrymme och omgivningen, bör fönstren tätas. Tätningarna kan även ha andra uppgifter som att centrera fönstret i hållaren och ge en kompressibel kontakt mot fönsterhållarna. Från *bilaga 3* sida tre presenteras olika val av tätningar som lämpar sig för statiska belastningsfall. Utgående från detta är bland annat O-ringar, bricktätningar och planpackningar tätningstyper som kunde användas i denna applikation. Planpackningar gjorda av grafit har tidigare använts i liknande sammanhang av bland annat Seppä (2011) och i den optiska förkammaren som nämndes i kapitel 3.1.

Fiber- eller stålförstärkta grafitpackningar ger goda tätningsegenskaper och resistans mot att packningen blåses ut. Tanken är att placera grafitpackningar på de ytor som kommer att leda spänningarna som uppkommer från maximalt förbränningstryck genom fönstret till skruvförbandet som fönsterhållarna är fixerade med. Packningarna placeras mellan fönsterhållaren och fönstret samt fönstret och kammarkroppen. Packningarna bör vara tillräckligt tjocka för att skydda fönstren från små relativa rörelser som uppkommer vid förbränningsförloppet eller volymförändringar på grund av temperaturen. Packningens uppgift är också att utjämna spår efter bearbetning och avvikelser i ytans form. Grafitpackningen får således vara ganska tjock.

För att uppnå tätning bör packningen belastas med ett av tillverkaren angett yttrycksintervall. Detta är för grafitpackningar ofta i storleksordningen 20 MPa – 250 MPa (Fachhochschule Münster University of Applied Science, 2018). Yttrycket beror av packningens area samt den kraft som riktas mot ytan. Eftersom att fönstermaterialet är väldigt ömtåligt blir den överförande ytan, enligt beräkningar i före gående del, väldigt stor för att hålla yttrycket så lågt som möjligt. För att uppnå erforderliga tätningsegenskaper bör packningen minst belastas med ett yttryck som är närmare sig hälften av fönstrets brottgräns. Detta ger ett väldigt snävt intervall av spänningar där tätningen fungerar och fönstret håller.

För att säkerställa att trycket verkar på fönstrets minsta diameter och avlastar fönstret från stora förspänningar används ytterligare en tätning i form av en O-ring. Tanken är att O-ringen centrerar fönstret vid montering och tätar för-förbränningstrycket. Tryckstegringen vid förbränning kommer i sin tur att pressa fönstret mot grafitpackningarna och då erforderligt yttryck uppnås fungerar denna som en sekundär tätning. Maxtrycket på 400 bar innebär enligt teorin presenterad i kap 2.4 att O-ringen skall monteras med en stödring för att undvika att O-ringen pressas ut genom spalten. För val av O-ring och stödring konsulteras tillverkare. Dimensionering spår och installation av O-rings tätning görs lämpligen utgående från Wärtsilästandarderna WFI337.0010-WFI33.0014.

4.3 Gasväxling

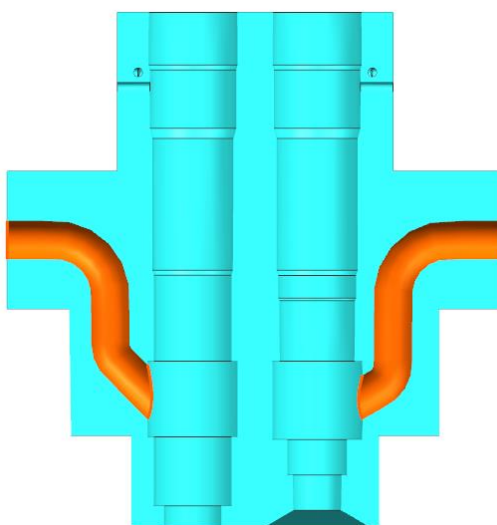
Nästa del på kammaren är gasväxlingsmodulen som i princip har samma funktion som cylinderhuvudet på en motor, det vill säga tillåta gasväxling inuti kammaren, dock sker bränsleinsprutningen skilt. Bränslesystemet presenteras i kapitel 4.4. Gasväxlingsmodulen

kan delas in i två delar, adapterplattan som är ansluten till kammare och håller ventilerna, som är den andra huvudgruppen.

4.3.1 Adapterplatta

Adapterplattan utgör basen för gasväxlingsmodulen, som placeras under på undersidan av kammaren. Till adapterplattan installeras ventilerna jämte inlopp och utlopp från ventilerna. Eftersom kammarens alla håligheter är likadana kommer adapterplattans utseende till viss del motsvara fönstrens geometri. Adapterplattan tätas på samma sätt som fönstren, vilket diskuteras i kapitel 4.2.1.

Utmaningen med adapterplattan är att innesluta kanaler för transport av gaser till och från kammaren. Den ursprungliga tanken var att kunna borra kanalerna som behövs till insugs- och avgasventilen. Utrymmet är emellertid väldigt trångt och möjligheten att gjuta denna del förefaller vara ett gott alternativ. Gjutning av ett fåtal adapterplattor kan vara en relativt kostnadseffektiv metod då en 3D-printad modell av adapterplattan kan fungera som modell för gjutformen. I *figur 12* ses den färdiga adapterplattan, där kanalen till vänster symboliserar insugskanalen och kanalen till höger utgör avgaskanalen.



Figur 12. Gasväxlingens adapterplatta i genomskärning.

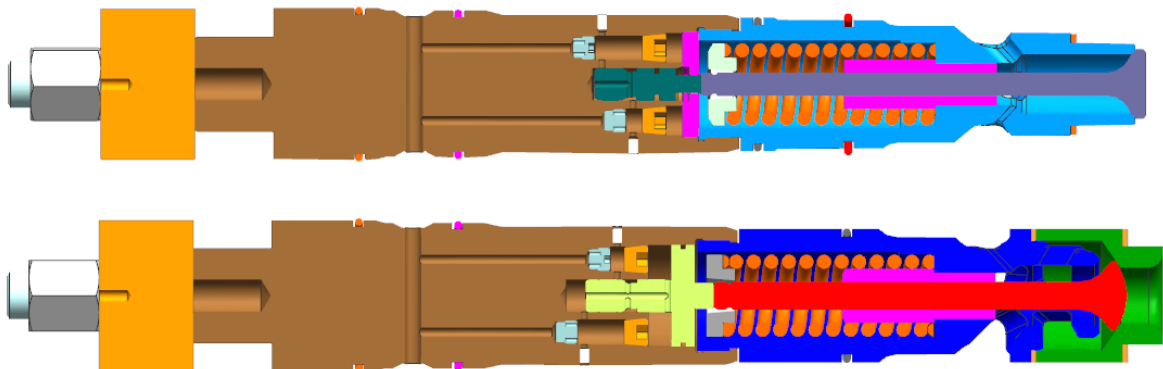
4.3.2 Ventiler

Grundfunktionen för gasväxlingen är att den skall bestå av två ventiler, vilka skall kunna öppnas och stängas enligt av operatören definierad ordning. Den första ventilen är normalt stängd och motsvarar en motors insugsventil. Det att ventilen är normalt stängd innebär att trycket i kammaren kommer att pressa ventilen mot ventilens tätning. Genom denna ventil släpps de gaser in som reagerar i för-förbränningsprocessen. Den första tanken var att använda en

befintlig ventil, som t.ex. W20 motorns avgasventil för detta ända mål. Det visade sig dock att denna var aningen för stor för detta syfte. Storleken på ventilen påverkar tiden det tar att fylla kammaren och vilket inte är en viktig egenskap i denna kammare. Detta ger möjligheten att använda mindre ventiler och låta fyllnadsprocessen av kammaren att eventuellt ta längre tid.

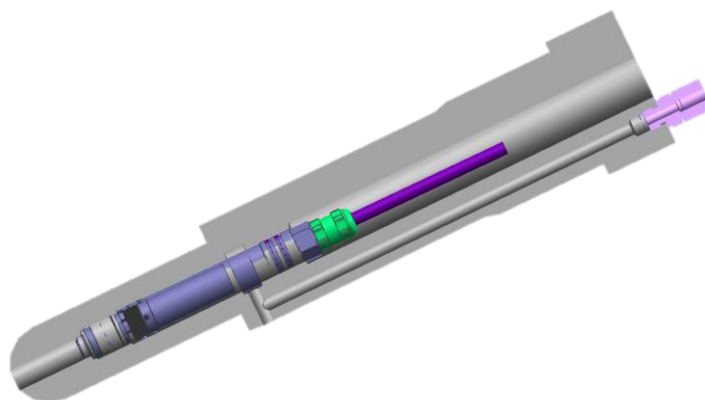
Till ett tidigare projekt utvecklades en ventil för direkt injicering av gas i cylindern. Denna ventil öppnas och stängs hydrauliskt och har en fjäder som håller den stängd, i *figur 13* ses denna ventil överst. Denna ventil visade sig passa utmärkt för detta ändamål. Ventilhusets konstruktion, speciellt området kring gaskanalerna, behövde stärkas för att hålla för det maxtryck som kammaren konstruerats för. Resultat av FE-simuleringar på ventilhuset presenteras och diskuteras i kapitel 5.1.

Den andra ventilens huvudfunktion är öppna för att evakuera avgaserna. Konceptet liknar den avgas ventil som Kaj Herrman använde i sin kammare. Ventilen för denna kammare kan ses i *figur 13* underst. Ventilen är en modifikation av direkt gas ventilen, där ventilhuset, hydraul kolven och ändbiten har ändrats. Tanken är att fjädern håller ventilen normalt öppen, för ventilation och tömning av kammaren innan tester. Ventilen stängs sedan hydrauliskt med en 3/2 ventil och hålls stängd mot kammartrycket. Detta innebär att arean för kolven bör dimensioneras med tanke på hydraulikens arbetstryck. Då förbränningen ägt rum i kammaren bör avgaserna och trycket evakueras snabbt. För att undvika att ventilerna skadas har kolvarna en trappa som stryker flödet i kolvens ändlägen och på så vis bromsar ventilens rörelse



Figur 13. Gasväxlingsventiler i genomskärning.

Utöver gasväxlingsmodulen förbereds kammarens hörn med adapterplattor och då möjligheten att placera olika typer av utrustning i dessa. Ett alternativ är att använda en gasventil som kan styras av elektricitet för att släppa in gaserna i kammaren. Denna är väldigt liten och kunde då lämpligen användas integrerad i en adapterplatta som placerats i ett av kammarens hörn. Alternativt kan fyllnadsprocessen ske genom både genom kammarens hörn och gasväxlingsmodulen. Då testtriggen används för undersökningar i inert gas är det speciellt behändigt att direkt koppla gasen till ett av kammarens hörn. I *figur 14* ses en genomskärning på hur en hörnmodul konstruerad för en elektrisk gasventil ser ut.



Figur 14. Genomskärning av en hörnmodul utrustad med en elektrisk gasventil.

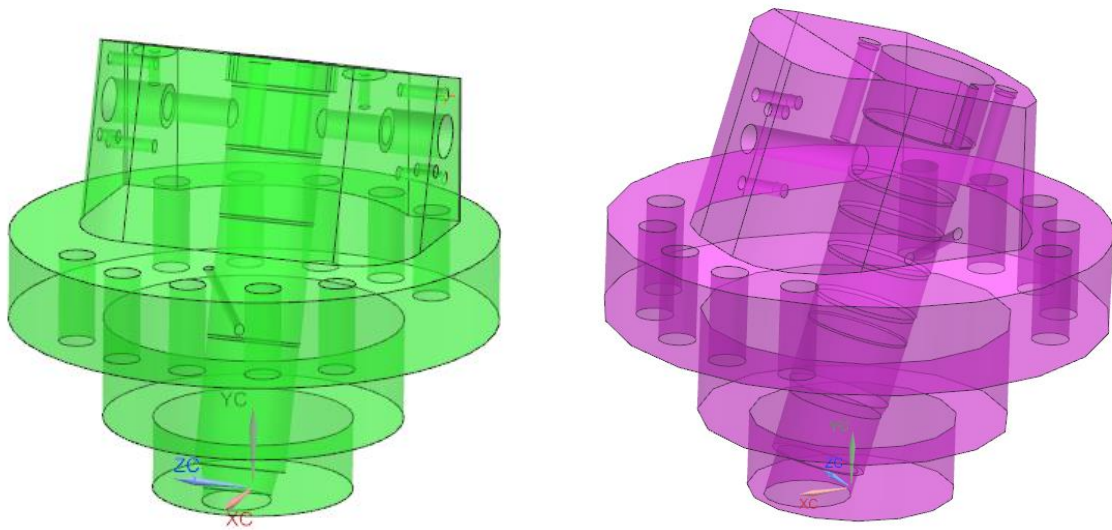
4.4 Bränslesystem

Bränslesystemet består huvudsakligen av en injektor, en injektoradapter, en fingerborg och en bränslegenerator eller bränslepump. I denna del diskuteras injektoradapters och fingerborgens konstruktion. Enligt de riktgivande kraven som presenterades i *tabell 1* bör testtriggen kunna utrustas med minst W31 Diesel/DF-injektorer. Dock finns det redan intresse att undersöka W32 LG-injektorn och W20 LC-injektorn. Det beslutades således att dessa tre injektorer skall kunna testas med denna kammare.

4.4.1 Injektor adapter

För att kunna titta på ett tvärsnitt av en injektors sprej bör injektorn monteras snett mot kammaren, för att möjliggöra att ett laserark kan skära av sprejen och då möjliggöra undersökning sprejens tvärsnitt. Injektorn placeras även snett för att bättre kunna utnyttja förbränningsutrymmets volym. Injektorerna som skall undersökas i kammaren är av olika utseende och storlek vilket innebär att varje injektor bör ha en egen adapterplatta.

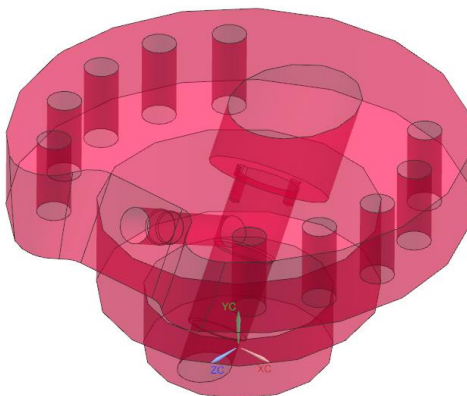
Den första är en diesel twin needle injektor för W31. Denna har två insprutningsmunstycken. Ett mindre för pilot insprutning och ett större för huvudinsprutningen. Tanken var att adaptorn skulle möjliggöra tester med både pilot och huvudmunstycket. För att kunna göra det måste injektorn kunna roteras 180°. Detta innebär att adaptorn måste ha anslutningar för högtrycksröret genom vilket bränslet levereras till injektorn. Denna behöver kunna tätas för att undvika bränsleläckage då den andra anslutningen är i användning. Adaptorns utsida formas enligt kammaren och insidan enligt konturen på motsvarande cylinderhuvud. I *figur 15* till vänster ses en bild på adapterplattan.



Figur 15. Adapter för W31 Diesel/DF injektorn till vänster och adapter för W32 LG-injektorn till höger.

Den andra injektorn är en W32 LG-injektor som till stora delar liknar W31-injektorn. Denna har även två munstycken, en mindre pilot och ett större huvudmunstycke. För denna injektor är huvudmunstycket av intresse. Liksom W31-injektorns adapter formas W32LG-adaptorns yttre mått enligt kammaren och insidan enligt motsvarande cylinderhuvud. I *figur 15* till höger ses en bild av denna adapter.

Den tredje injektorn som är av intresse är betydligt mindre än de övriga, eftersom att den tillhör W20-motorerna. Denna har endast ett insprutningsmunstycke, men nog ett högtrycksrör som monteras vinkelrätt mot injektorn. Högtrycksröret orsakade en del problem då injektorn var väldigt kort vilket ledde till att injektorn ännu måste lutas mera för att möjliggöra anslutningen till bränsleröret. I övrigt konstruerades adapterplattan liksom de andra. I *figur 16* ses en bild av W20-injektorns adapterplatta.



Figur 16 Adapter för W20 LC-injektorn.

Utformningen och konstruktionen av adapter plattorna styrs ganska långt av injektorns och kammarens form. Adaptern uppgift är att stöda injektorn och dess komponenter, samt att täta mot förbränningskammaren. Adapterplattorna är gjorda av massivt gjute och utformade enligt fönsterhållarna. Dess hållfasthet räcker utan tvivel till mot kammarens maxtryck. W31 och W32 injektorernas adapterplattor kommer att ha en vikt på närmare 180 kg. Av denna anledning görs ingen FE simulering av adapterplattorna. Skruvförbandens dimensionering diskuteras i kapitel 4.5.1 och fullständiga 3D-modeller presenteras i kapitel 5.2.

4.4.2 Fingerborg

Eftersom att injektorerna som har valts att undersökas i kammaren har multipla hål för insprutning bör de övriga isoleras bort för att inte orsaka störningar och dåliga bilder vid tester. Ursprungligen var idén att bygga en kammare som skulle tillåta att hela sprejen är synlig, men de upptäcktes snart att detta blir en oskäligt stor konstruktion. I denna del diskuteras olika lösningar för att kunna isolera en sprej.

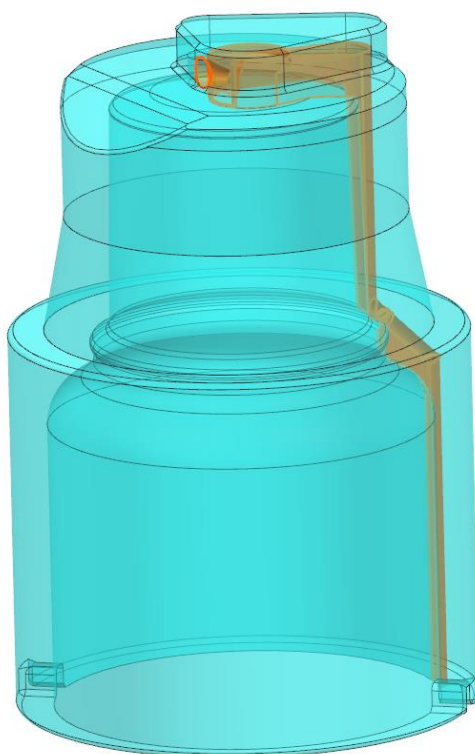
Enligt kravlistan presenterad i kapitel 3.2 bör en sprej kunna isoleras från de övriga, så att denne kan undersökas utan störning från de andra sprejerna. Detta kan göras på tre olika sätt. Genom att special tillverka en injektor med endast ett hål, vilket kraftigt kommer att påverka

sprejformationen. Ett annat sätt är att plugga eller svetsa fast de övriga hålen, detta kommer dock leda till att nålen inuti injektorn kommer att börja svaja vilket påverkar sprejen. Det tredje sättet är att konstruera en fingerborg som kan appliceras på injektorn. Denna tillåter endast en sprej att sprutas in i kammaren, medan de övriga samlas ihop och dräneras bort från kammaren. Detta påverkar sprejen så lite som möjligt, men nackdelen är att den kommer skymma första delen av sprejen. (Baert, Frijters, Somers, Luijten, & De Boer, 2009).

Fingerborgens uppgift är isolera bort de sprejer som inte skall påverka förbränningen inuti kammaren. För att dessa ska kunna dräneras bort utan att de oxiderar bör hålet kring den sprej som skall penetrera kammaren vara någorlunda tät. Hålet bör även vara tillräckligt stort, så att sprejen inte vidrör väggen och ändrar struktur under insprutning. Tanken var att modifiera hylsorna som stöder och tätar injektorn i cylinderhuvudet till en kombinerad hylsa som tätar injektorn till adaptern samt tätar munstycket till injektorn inuti fingerborgen.

De injektorer som använder sig av pilotinsprutningar styrs av skilda solenoider vilket innebär att den ena nålen kan lämnas stängd. Detta innebär att ingen bränsle dränering behövs till det munstycke som inte undersöks, vilket underlättar designen. Dock måste varje munstycke istället ha en egen hylsa med integrerad fingerborg. Eftersom att pilot munstycket för W31 och W32-injektorn är i det närmaste likadana beslöts det att fyra hylsor kommer att konstrueras. Två för W31-injektorn där båda munstycken skall kunna undersökas. Till W32 och W20-injektorerna konstrueras varsitt munstycke. Hylsans utvändiga form kan nästan rakt av kopieras från motsvarande cylinderhuvud, medan insidan formas enligt injektorn. För de injektorer som inte designats av Wärtsilä kan mätningar av en befintlig injektor komma att behövas, då detaljerade ritningar inte finns till hands.

Den första idén var att låta fingerborgens samla ihop överblivet bränsle och sedan skulle behållaren tömmas med jämna mellanrum. Efter inledande skisser och beräkningar (*bilaga 4*) på de bränslevolymer som genereras vid full last kunde det konstateras att behållaren bör vara väldigt stor för att rymma bränslet för ca fem insprutningar. Ett annat alternativ vore att vända kammaren, så att gasväxlingsadaptorn är uppe och injektorerna under kammaren. Genom att innesluta kanaler från fingerborgens genom hylsan ut till adaptorn kan bränslet dräneras. Förutom fördelen med att inte behöva plocka isär injektor adaptorn för att tömma fingerborgens kan nu dräneringen av bränsle vid undersökningar utan förbränning lättare transporteras bort ur kammaren, utan att riskera bränslen lämnar i avgas eller insugssystem. Dock kommer det att förekomma gasläckage mellan fingerborgens och dysan vilket innebär att dräneringen från injektorn till omgivningen måste förses med en ventil som hålls stängd under drift. I *figur 17* presenteras idén för konstruktionen av fingerborgens.



Figur 17. Fingerborgens utformnings med avrinningskanal.

4.5 Övriga system

Detta kapitel behandlar de mest relevanta system och komponenter som inte diskuteras i andra kapitel. Till dessa hör dimensionering av skruvförband, val av mätutrustning samt placering av dem och metoder för uppvärmning av kammaren.

4.5.1 Skruvförband

Förutom tätningarna är skruvförbanden ett viktigt maskinelement som bör konstrueras med eftertanke. Skruvförbanden kan liknas vid väldigt styva fjädrar som åstadkommer en klämkraft som håller delarna på plats.

För att dimensionera skruvförbanden används standarden VDI 2230 där rätt skruvstorlek väljs utgående från förhands definierade belastningsfall. Skruvarnas frihåll, längd och gängdjup bestäms enligt Wärtsilästandarderna. För dimensionering av flänsar för skruvförbanden kan lämpligen tumreglerna enligt Mägi och Melkerssons (2006) användas.

4.5.2 Mätutrustning

För att kontrollera och styra kammaren behövs sensorer som kontinuerligt övervakar temperatur och tryck. Många trycksensorer som används i förbränningsmotorer är referensgivare som jämför trycket med ett tidigare uppmätt värde från den förra cykeln. I detta sammanhang bör tryck sensorerna kunna mäta absolut tryck. Vidare kommer två tryck givare att behövas inuti kammaren. En som är noggrant skalerad för låga tryck som används då kammaren fylls med gas inför för-förbränningen. Vidare vore det bra att även förse insugs och avgas sidan med tryck givare för att kunna simulera fullständigt tryckbilden över testriggen.

Temperaturgivarna kan lämpligen vara termopar av k-typ, som relativt snabbt reagerar på temperaturdifferenser. Dess uppgift är att övervaka kammarkroppens temperatur och på så sätt reglera denna, så att den inte blir för varm. Temperaturen inuti kammaren kan inte registreras av dylika sensorer eftersom att temperaturstegringen är snabbare än vad sensorerna hinner registrera. För temperaturmätning inuti förbränningsutrymmet används därför optiska metoder.

4.5.3 Övriga

För att undvika att vattenånga från för-förbränning kondenserar på fönstren bör kammaren förvärmas. Att värma kammaren bör ske långsamt, så att alla komponenter får utvidga sig och värmen hinner sprida sig jämt över kammaren. För att värma kammaren till en drifts temperatur på 100 °C diskuterades många olika möjligheter. Bland annat att borra in kanaler i kammaren genom vilka en varm fluid kunde fungera som värmebärare. Dock finns det ont om utrymme i kammarkroppen för extra borrhningar.

Slutligen hittades ett förslag på lösning från ett svenskt företag som är experter på olika typer av värmare. Den typ av lösning som passar kammaren är folieelement laminerade på silikonunderlag som kan fästas på önskade ytor med en magnetisk baksida eller alternativt en självhäftande baksida. Värmeelementen kan special beställas enligt givna mått och levereras tillsammans med ett eget styrsystem för dessa. Utanpå dessa tillkommer ytterligare en isolering som är enkel att applicera och ta bort.

5 Analys av design

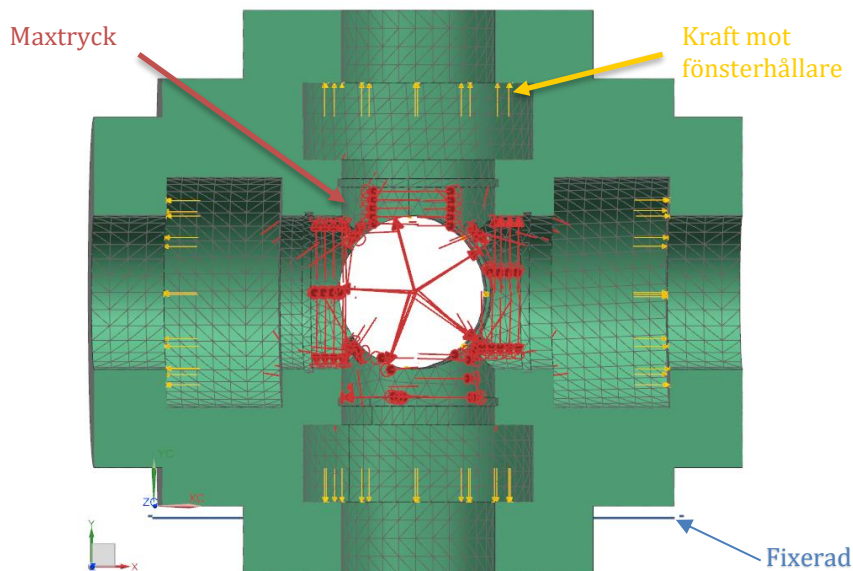
I denna del presenteras enkla FE-analyser på nyckelkomponenter samt den slutgiltiga designen för den optiska testtriggen. Syftet med detta kapitel är att ge läsarna en helhetsbild över den optiska testtriggen samt de konstruktionslösningar som slutligen använts.

5.1 FE-simuleringar

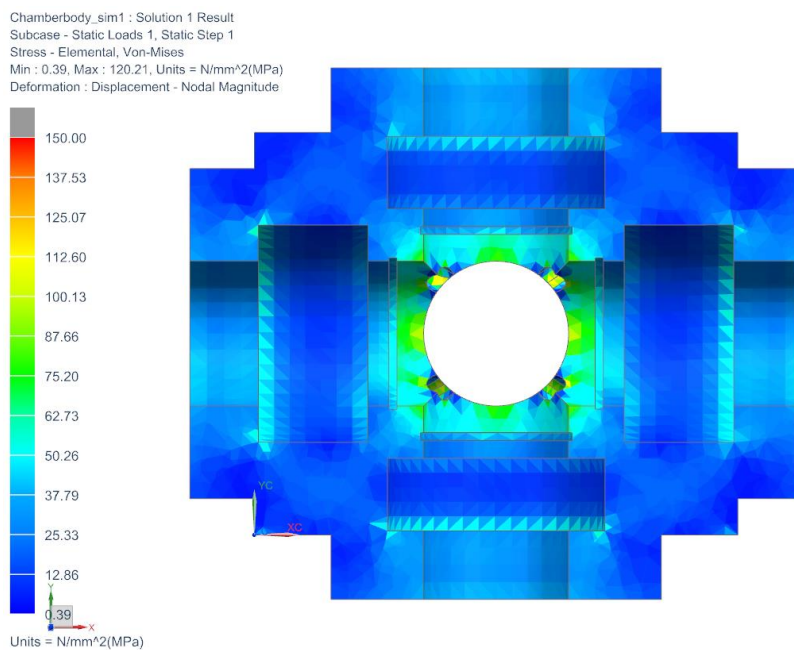
Nedan presenteras och diskuteras kort de FE-simuleringar som gjorts på kammarkroppen, fönstren, ventilhus, ventiler, hörnmoduler och slutligen även inledande simuleringar av fixturen som kammaren monteras på. Det bör påpekas att många av simuleringarna är förenklingar och representerar inte verkligheten, men ger en riktgivande bild på spänningsnivåer och amplituder. Materialen i simuleringarna är stål, hämtat från material biblioteket i NX. Enda undantaget är fönstermaterialet där ett nytt material skapades med hjälp av materialegenskaper hämtade från *bilaga 2*.

Kammaren simulerades i flera omgångar, först direkt efter att konceptets beslutats för att få en uppfattning om vilka dimensioner som kammaren bör tillverkas av, samt om denne håller för maximalt tryck. Vidare gjordes även en till simulering då en uppdatering av fönstrens tjocklek ledde till att kammarkroppen behövde förstöras. I simuleringarna har kammarna fästs längs kanten på undersidan, medan ett tryck på 400 bar har applicerats på alla ytor inuti kammaren som är exponerade. Fönsterhållarna är inkluderade och förenade med kammarkroppen för att kunna inkludera de spänningar som påverkar kammarkroppen från skruvförbanden. På de ytor som fönstren ligger mot appliceras således ett tryck på 320 bar eller 1018 kN enligt beräkningar från *bilaga 4*.

Meshen över kammaren består av ett nät av tetraedrar med en ganska grov maskstorlek på 20 mm, då det i huvudsak är en ungefärlig spänningsfördelning i kammarkroppen som undersöks. För mer detaljerade beräkningar borde meshen uppdateras med mindre maskstorlek på små ytor. Meshen, lasterna och fixeringarna ses i *figur 18* medan resultaten av simuleringarna presenteras i form av spänningsfördelning och spänningsnivåer i *figur 19*.



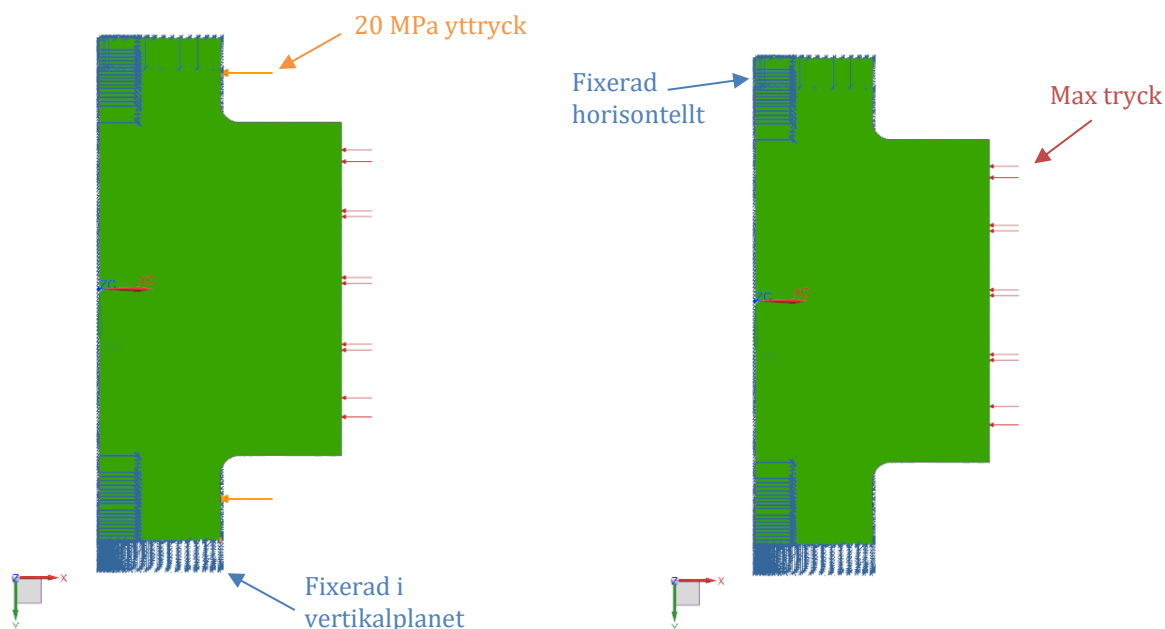
Figur 18. Meshen jämte randvillkor för kammarkroppen.



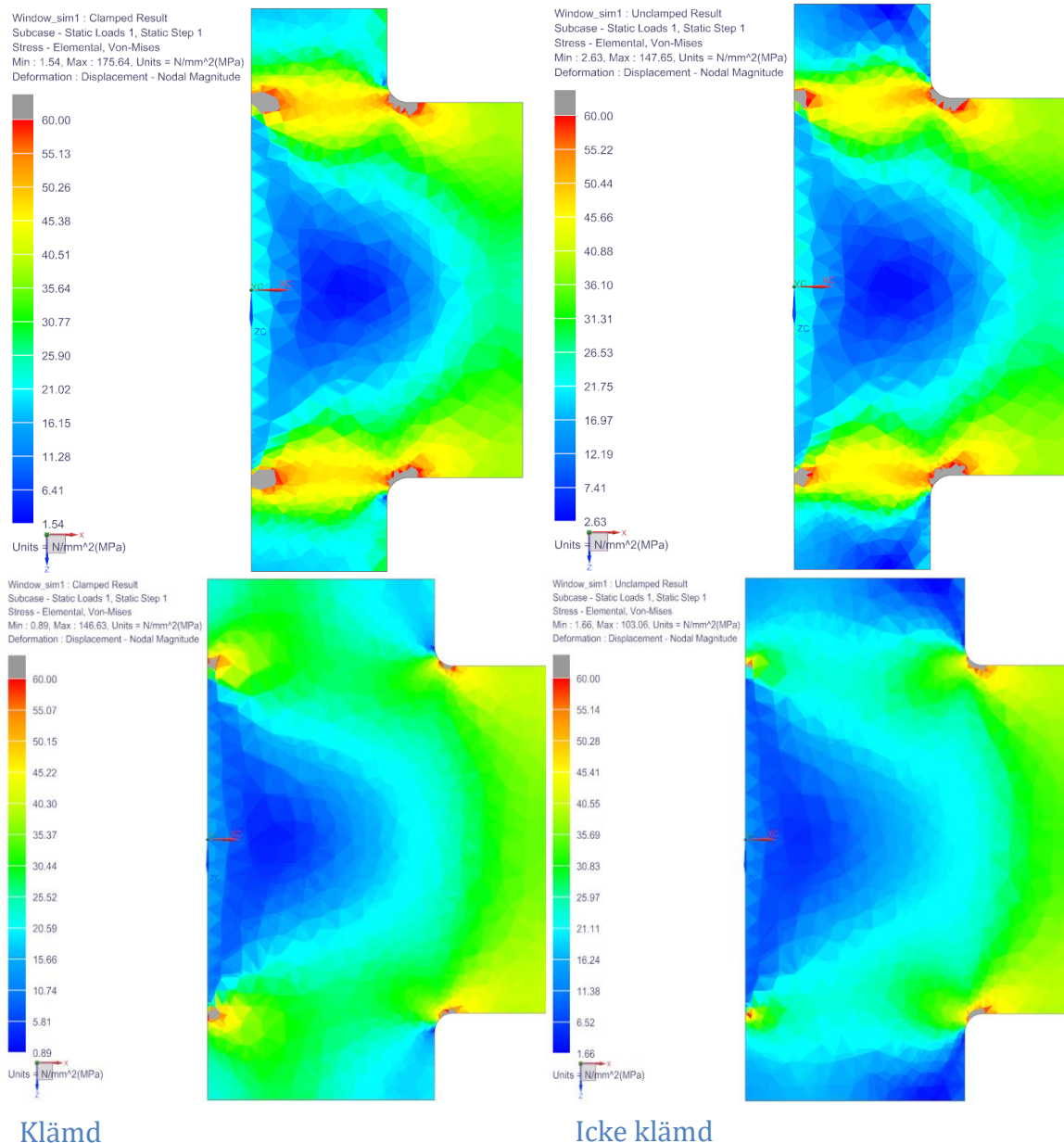
Figur 19. FE-simulering av kammarkroppen.

Utgående från figurerna kan det konstateras att spänningarna i stålkroppen är låga. Notera att endast spänningsnivåerna i kammarkroppen undersöks. Övriga ytor med höga spänningsamplituder kan bero på randvillkoren, förenklingar som sammanfogade komponenter eller meshen. Till den färdiga kammardesignen tillkommer ytterligare rundningar av hörn som kommer att sänka spänningsamplituderna i de skarpa kanterna.

Fönstrens utformning visade sig vara krävande. Enligt de beräkningar som tidigare gjordes i kapitel 4.2 utformades fönstret. Simuleringarna i *figur 21* visar hur spänningarna i fönstret förändras då dimensionerna justeras. I denna simulering har ytan mot fönsterhållarna fixerats i horisontell riktning, medan den är fixerade längs ytterdiametersnans mantelyta i vertikalplanet. Meshen består av ett nät med tetraedrar av storleken 5 mm. För att noggrannare bestämma spänningarna över rundningen uppdaterades ytan med ett finare nät med storleken 2 mm. Tumregeln är att minst fyra maskor bör finnas över en yta. Mot fönstret appliceras ett tryck på 400 bar och för fönstret till vänster i *figur 20* finns även ett tryck på 20 MPa mot ytan mellan kammarkroppen och fönstret för att verifiera skillnaden mellan klämda och icke klämda fönster som presenterades i kap 2.3.1, samt kontrollera hur minimi yttrycket för tätande grafitpackning skulle påverka fönstret. Meshen jämte villkor presenteras i *figurer 20* och resultaten av simuleringarna presenteras i *figur 21*.



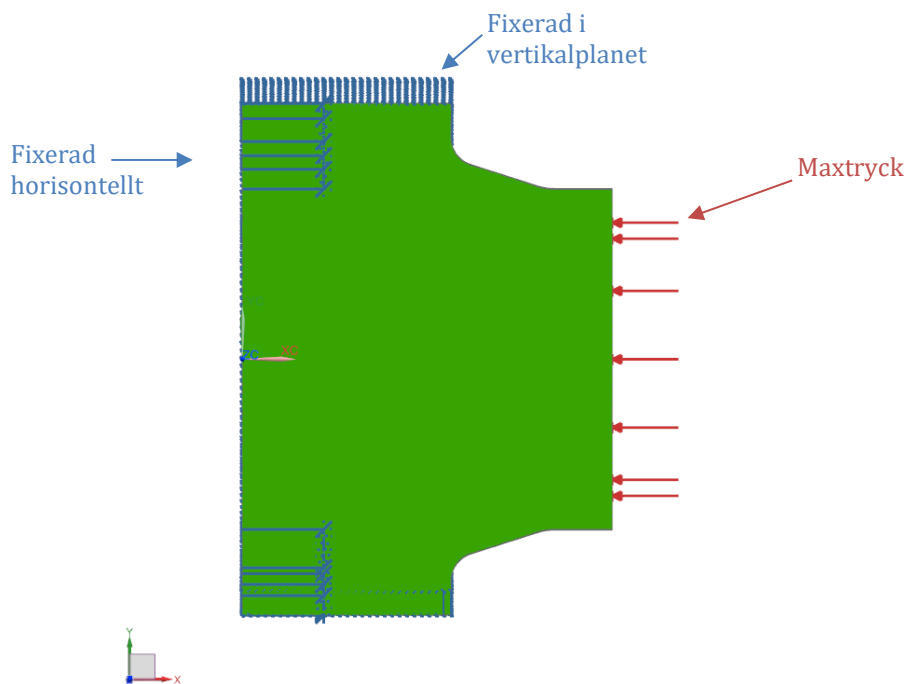
Figur 20. Meshen jämte randvillkor för ett klämt fönster till vänster och icke-klämt till höger.



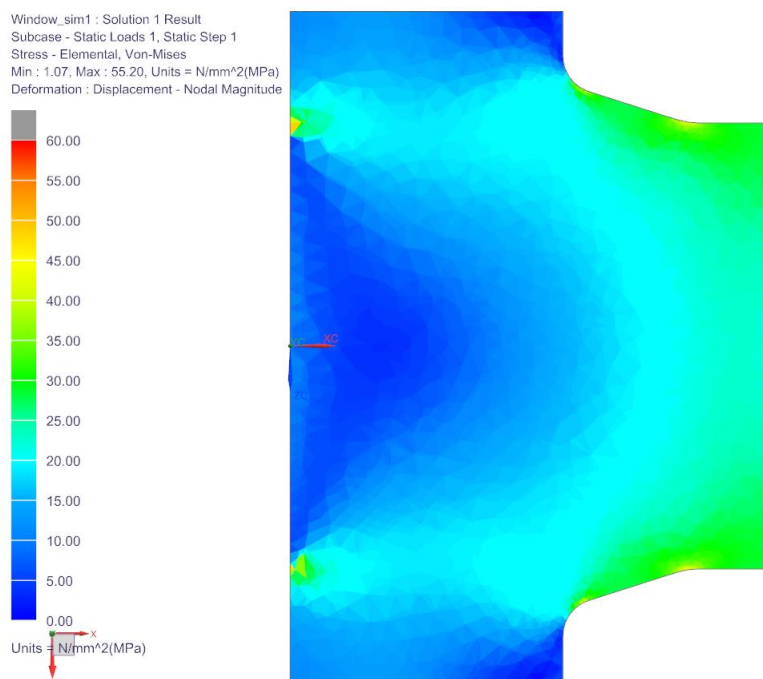
Figur 21. FE-simuleringar över fönster konstruktionen.

Utgående från figurerna kan det konstateras att fönstret med de ursprungliga dimensionerna troligen kommer att spricka längs den inre diametern. Fönstren med uppdaterade dimensioner visar godtagbara spänningsnivåer på ca hälften av fönstermaterialets brottgräns. De höga spänningsnivåerna vid kanten av ytan som är fixerad i horisontellt led kan bero av meshen. Fönstret som inte belastas med ett tätande yttryck på 20 MPa visar lägre spänningsnivåer i materialet. Därför kommer den ursprungliga idén med en tätande O-ring och två grafitpackningar som endast stöder och skyddar för ojämnheter att användas i den slutliga designen.

Spänningsnivåerna är ändå väldigt höga vid kanten, vilken kommer att behöva en stor avfasning samt rundningar för att låta spänningarna passera utan att överstiga brottgränsen. Därför gjordes en ny design på fönstret, men denna gång utan att applicera yttryck orsakat av fönster hållarna. Meshen för simuleringen av den slutgiltiga fönster designen utgörs av ett grövre bas nät på samt tätare maskor över rundningarna, enligt *figur 22*. I *figur 23* ses resultatet av fönstersimuleringarna.



Figur 22. Meshen samt randvillkor för den uppdaterade fönsterdesignen.

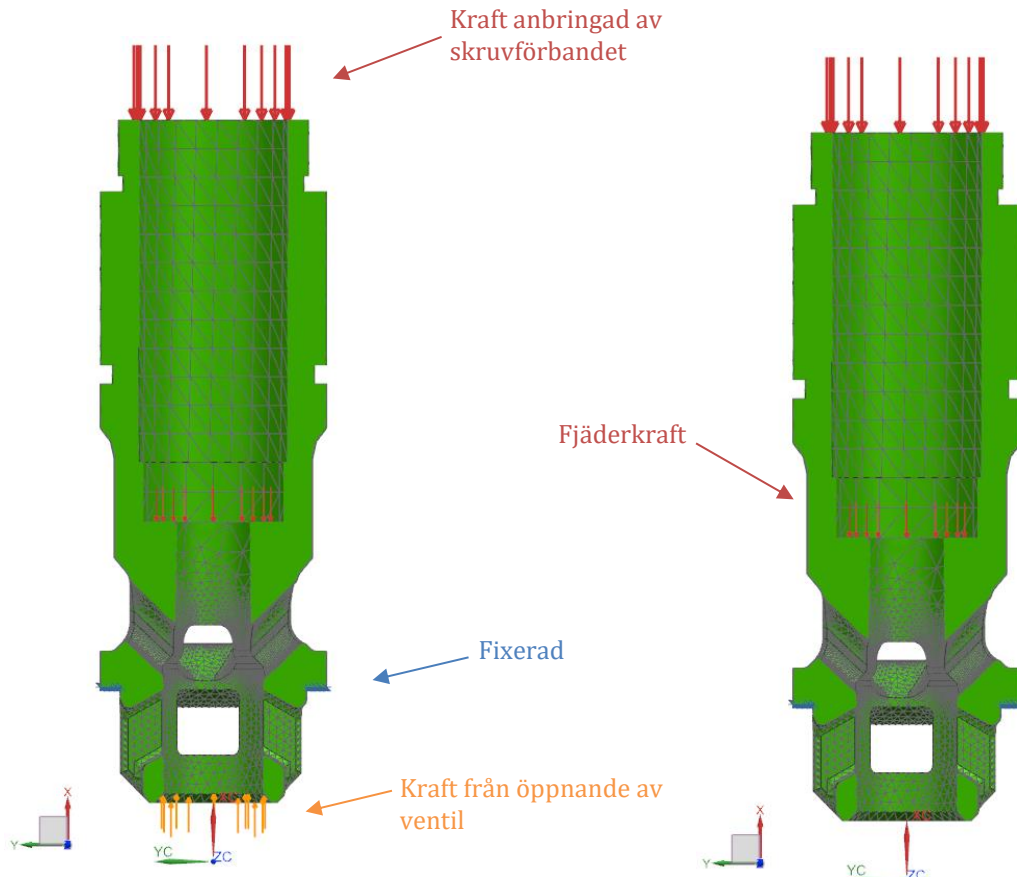


Figur 23. Slutgiltig FE simulering av fönsterdesignen.

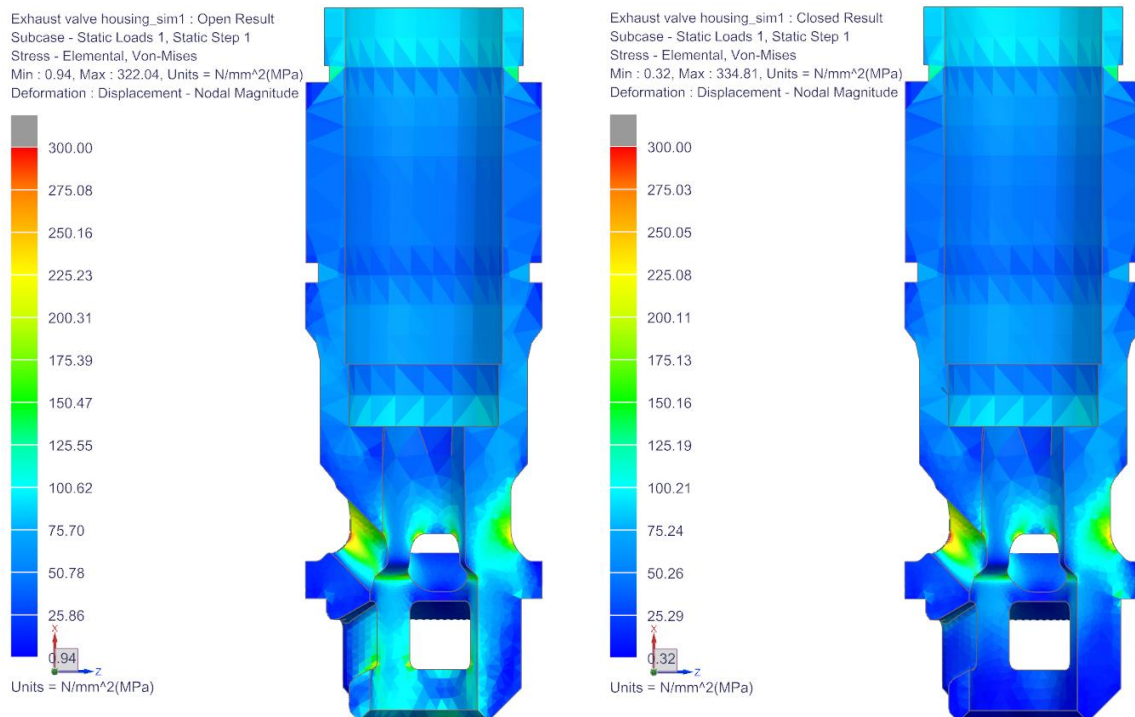
Fortfarande uppkommer spänningskoncentrationer vid kanten av ytan som är låst i horisontell riktning. I övrigt är spänningskoncentrationerna i rundningarna kring 53 MPa då kammartrycket når 400 bar. Fönstrets dimensioner har efter simuleringarna ändrats från att vara 130 mm tjockt till att bli 195 mm tjockt. En grov tumregel kunde alltså vara att fönstrets tjocklek är den samma som den optiska diametern. Diametrarna för fönstren är tills vidare av samma storlek för att uppfylla kraven presenterade i kap. 3.2. Slutgiltiga 3D-modeller presenteras i kap. 5.2.

Ventilerna och ventilhusen hör också till de komponenter som bör simuleras, för att säkerställa dess hållbarhet. Ventilhuset pressas mot tätningsytan av skruvförbandet. Kraften som skruvförbandet genererar bör vara större än kraften som maximalt förbränningstryck ger upphov till för att ventilhuset skall hållas på plats. Skruvförbandet ger upphov till spänningar i ventilhuset, där speciellt halsen är det svagaste partiet. Tätningsytan mellan ventilhus och kammarkropp definieras därför som fixerad och en kraft på 56 kN mot ventilhusets övre del som representerar klämkraften från skruvförbandet. Dessa randvillkor och laster är de viktigaste.

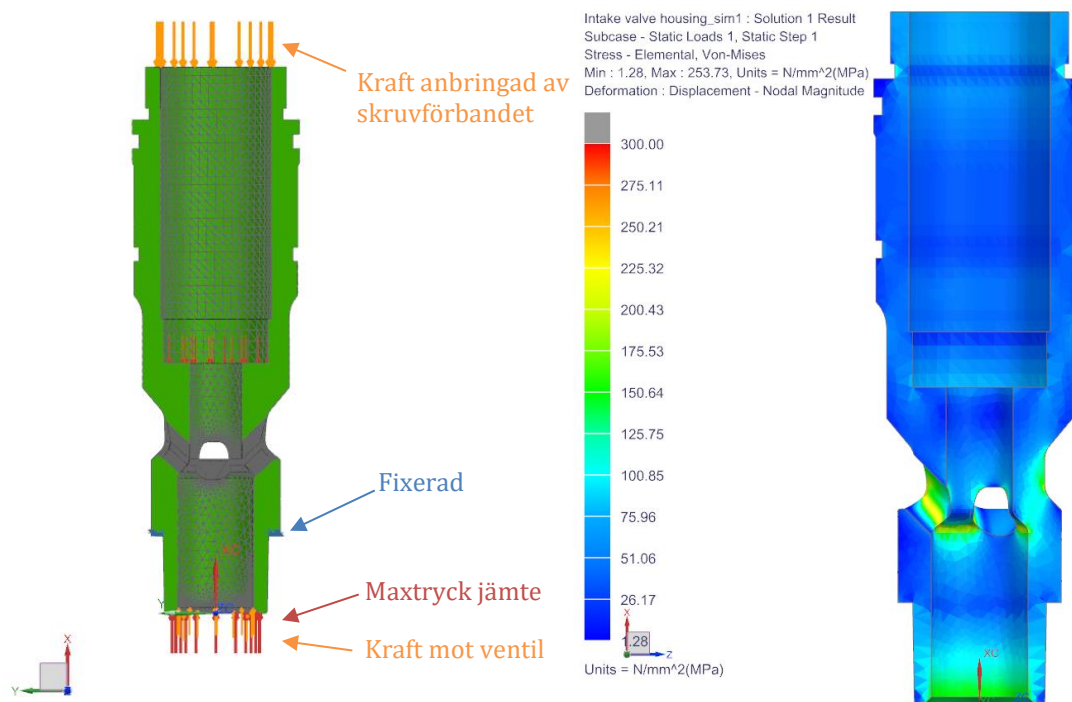
För att ytterligare göra en bättre modell kan fjäderkraften och maximalt förbränningstryck appliceras på de ytor som dessa verkar beroende på om ventilen är öppen eller stängd. Det emellertid inte självklart vilket fall som orsakar de största spänningsnivåerna i avgasventilens hus, därför simuleras båden öppen och stängd ventil. Meshen för modellen är uppbyggd av ett bas nät med maskstorleken 10 mm och finare nät över rundningar och mindre ytor så att tumregeln minst fyra maskor över en yta uppfylls. I *figurerna 24* och till vänster i *figur 26* ses meshen jämte randvillkor för ventilhusen och i *figur 25* till höger i *figur 26* ses simuleringarna över ventilhusen.



Figur 24. Meshen jämte randvillkor för avgas ventiltus med öppen ventil till vänster och ventiltus med stängd ventil till höger.



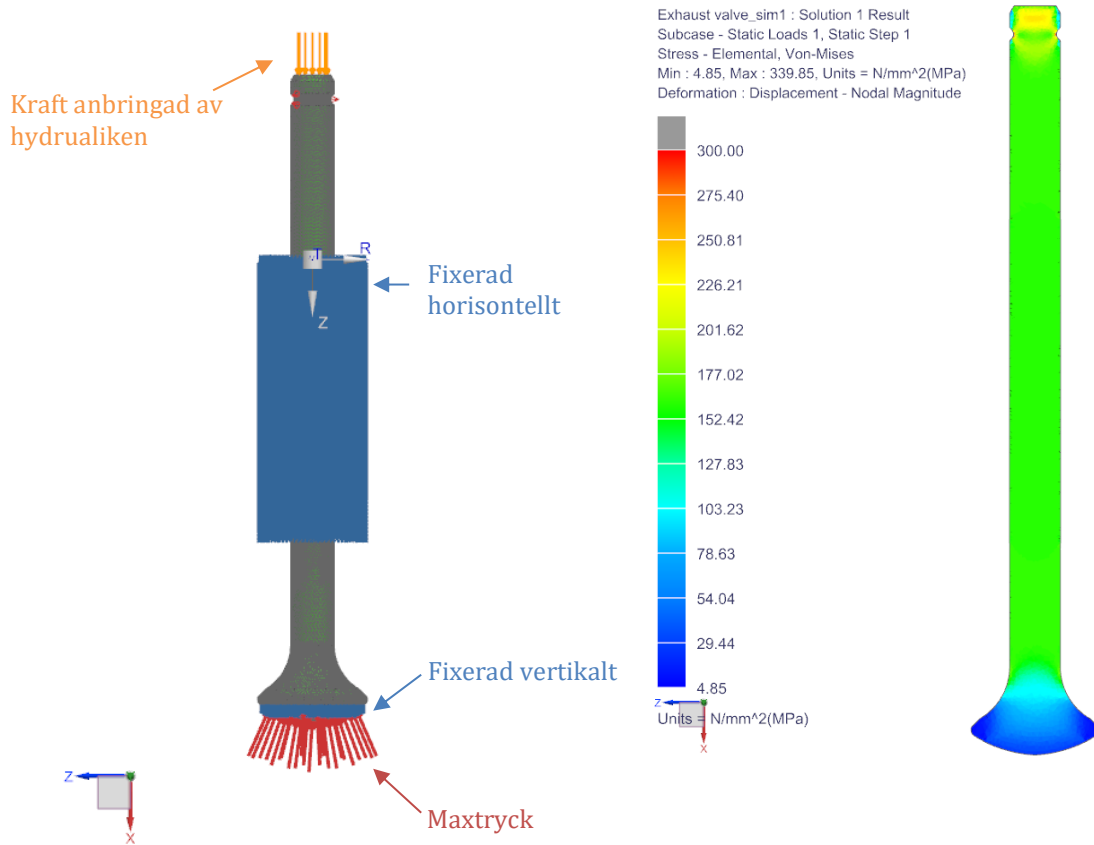
Figur 25. FE-simulering av avgas ventiltus med öppen ventil till vänster och ventiltus med stängd ventil till höger.



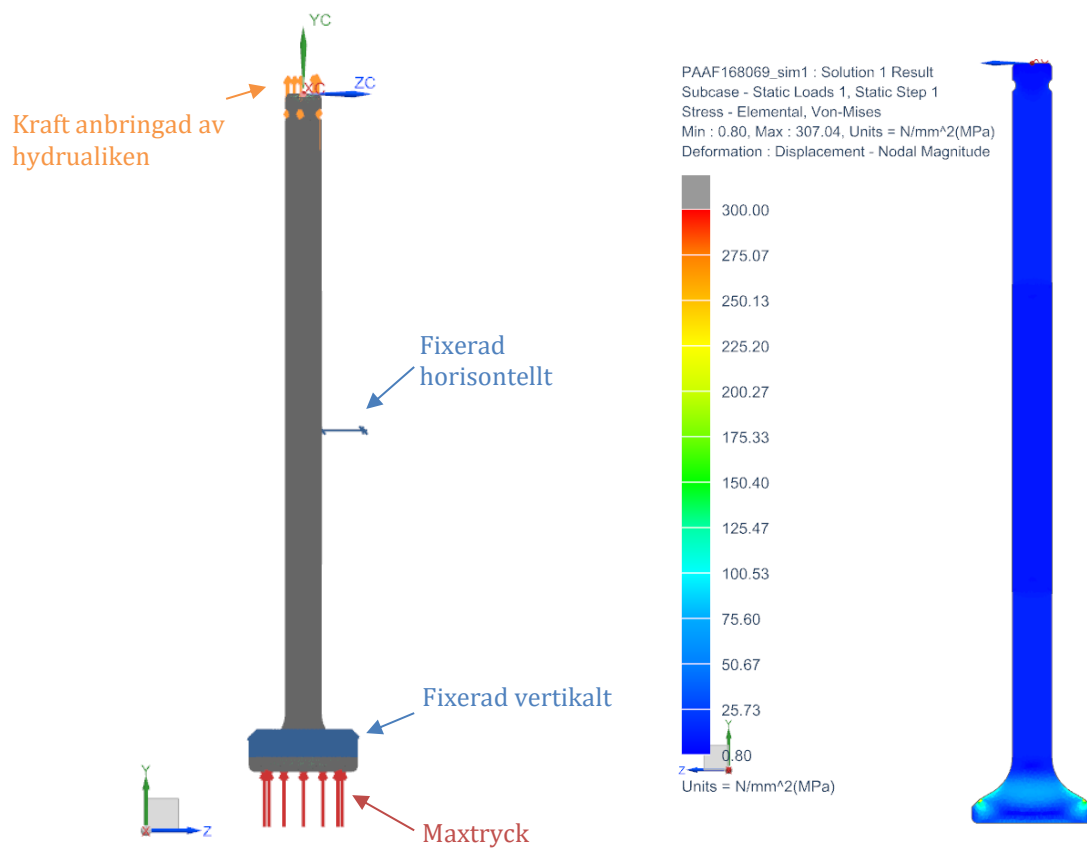
Figur 26. Meshen jämte randvillkor för insugs ventilhus med stängd ventil samt FE-simulering till höger.

Utgående från simuleringarna av ventilhusen kan det konstateras att spänningsnivåerna i stålet är tillfredsställande, då spänningsamplituderna understiger 300 MPa, även om klämkraften från skruvarna noggrannare bestäms senare ger detta en god fingervisning om spänningarna i ventilhusen. De inledande simuleringarna visade stora spänningsnivåer i ventilhusets hals. Dessa sänktes genom rundningar och nya former på gaskanalerna. Gaskanalerna för övrigt bör ha en yta som är större än öppningsarean mellan ventil och ventilhus, som skall vara den minsta ytan för gasen att passera. Kontrollberäkningar av ytornas storlek ses i *bilaga 4*.

Ventilerna fixeras horisontellt på glidytan genom holken och vertikal riktning vid ventilernas ända, i knasterspåret, ventilsätesytan eller tätningsytan. Ventilerna belastas sedan med max kammartryck på 400 bar mot de ytor som förbränningstycket verkar, eller alternativt motsvarande kraft från hydrauliken. Beroende på om ventilen är öppen eller stängd ändras belastningarna och fixeringen. Det är inte självklart vilket belastningsfall som orsakar större spänningar för avgasventilen, därför simuleras både öppen och stängd ventil, medan endast stängd insugsventil räcker eftersom att den inte öppnas mot trycket. Meshen för ventilererna är uppbyggd av ett relativt litet nät. Detta visade sig fungera bra då ventilererna har många små ytor. I *figurerna 27 och 28* till vänster ses meshen jämte randvillkor för ventilererna medan resultaten av FE-simuleringarna presenteras i *figurerna 27 och 28* till höger.



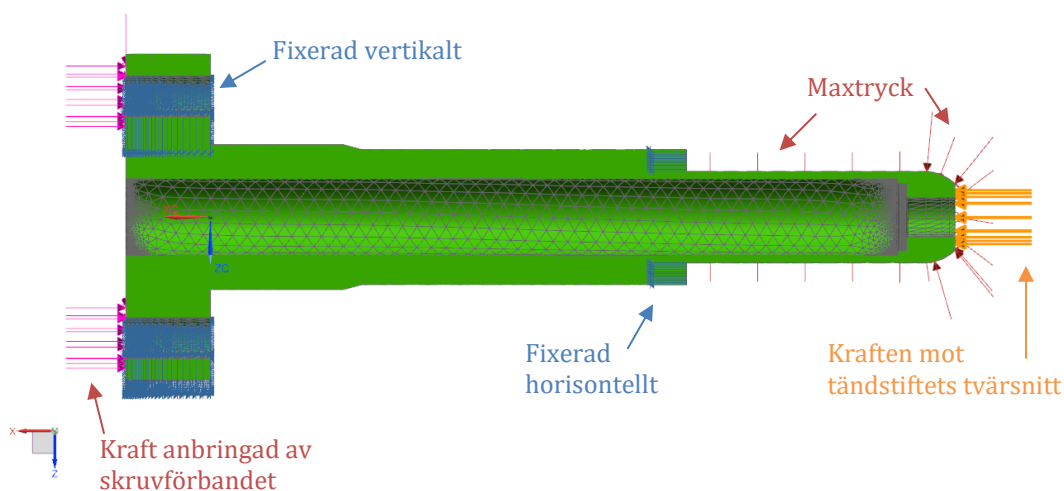
Figur 27. Meshen jämte randvillkor för avgasventil till vänster och FE simulering till höger.



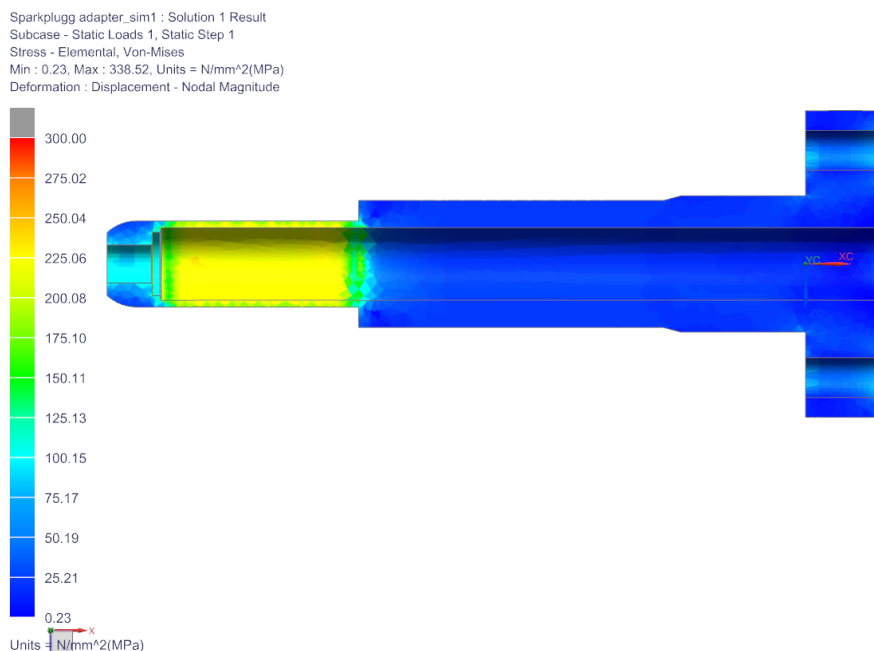
Figur 28. Meshen jämte randvillkor för insugsventil till vänster och FE-simulering till höger.

Simuleringen av avgasventilen då denne är stängd ger de största spänningsamplituderna. I simuleringen är det hydrauliken som ger upphov till spänningarna då ventilen tätar mot konan. Utgående från simuleringarna av ventilerna kan det konstateras att spänningsnivåerna är på godkänd nivå. Den högsta spänningsamplituden återfinns vid knasterspåret på avgasventilen. Knasterspåret utformning är inte ännu definitiv, men denna notering tas i beaktande då den detaljerade designen görs.

För hörnmodulerna konstrueras många olika adaptrar beroende på vilken utrustning som hörnet skall utrustas med. Hörnadapterna för trycksensorn och tändstift bör simuleras för att säkerställa att adapterna klarar av trycket och inte kläms ihop av förbränningstrycket. Dessa två är sinsemellan i samma storleks ordning, så det räcker med att endast den ena simuleras. Övriga adaptrar så som den elektriska gasväxlingsventilen och adapter för inertgas har betydligt tjockare väggar än den som simuleras och kommer därav med säkerhet att klara av trycket. Hörnadaptern fixeras horisontellt vid tätningssytan till kammaren. En kraft som motsvarar klämkraften från skruvarnas åtdragningsmoment placeras vid kontaktytan mellan bultskalle och fläns. Skruvhålen fixerar övriga riktningar. Maxtrycket på 400 bar placeras på alla ytor som påverkas av tryckstegring i förbränningsutrymmet. En kraft som motsvarar trycket mot arean av tändstiftet placeras även in i adapters ända. Meshen för adaptern byggs upp av ett grovt bas nät på 8 mm samt mindre nät över rundningar, fasningar och små ytor. Enligt tidigare nämnd tumregel. Meshen jämte randvillkor presenteras av *figur 29* och resultatet av simuleringarna kan avläsas från *figur 30*.



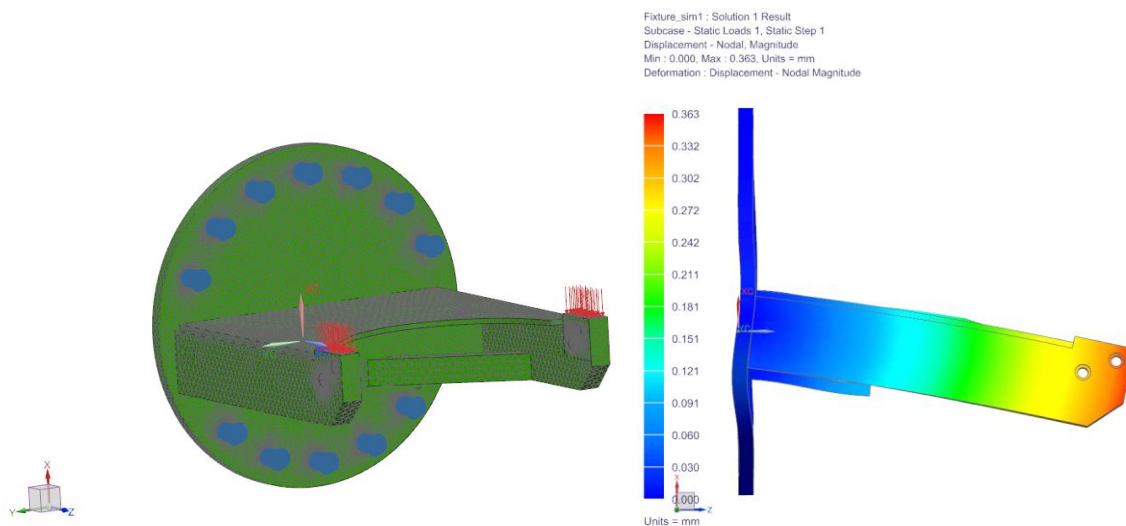
Figur 29. Meshen jämte randvillkor för hörnadaptern avsedd för tändstift.



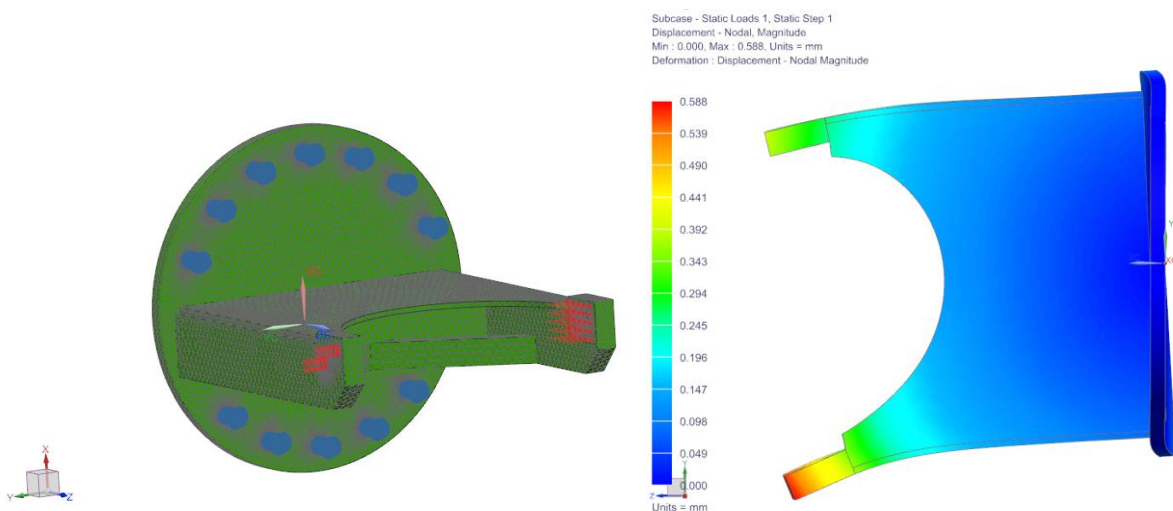
Figur 30. FE-simulering av tändstiftets hörnadapter.

Utgående från simuleringen kan de konstateras att spänningarna som uppkommer av skruvförbandets åtdragningsmoment är låga. Förbränningstrycket och kraften mot tändstiftet ger i sin tur betydligt högre spänningar, speciellt där vägg tjockleken är som minst. Max nivåerna för spänningarna är i klassen kring 300 MPa, vilket kan anses som godkända nivåer då stål med minst dubbelt så hög sträckgräns används. Notera även att modellen ännu saknar en del fasningar och rundningar vilket ger upphov till lokala maxspänningar över 300 MPa.

Eftersom att kammaren jämte utrustning har en massa på närmare 2000 kg bör fixturen för denne konstrueras och simuleras för att säkerställa att de valda dimensionerna håller, samt att belastningen på arbetsbänken understiger de av tillverkaren givna maxvärden. Fixturen omges av en mesh med relativt grova maskor på, då syftet är att kontrollera böjningen och amplituderna för töjning för att hitta de rätta dimensionerna. Fixturen fixeras i z-led på ytorna för flänsens bultskallar och i x-led och y-led av skruvhålens yta. Två olika fall simuleras, det första där kammarens tyngd verkar ovasidan lyftarmarna och det andra fallet roterad 90 grader där hälften av tyngden verkar i fixeringshålens yta och hela tyngden på kontaktytan nedåt. Meshen jämte randvillkor ses i *figurerna 31 och 32* till vänster och resultaten från FE simuleringen ses i *figurerna 31 och 32* till höger.



Figur 31. Meshen jämte randvillkor för fixturen till vänster och FE simulering av töjning till höger.



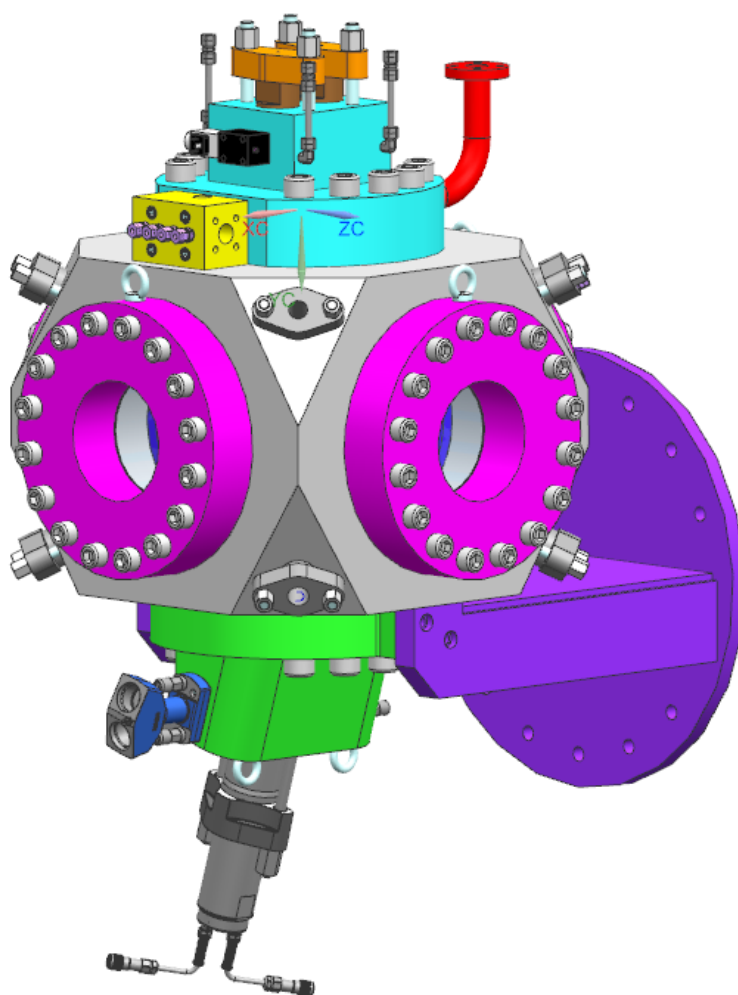
Figur 32. Meshen jämte randvillkor för roterad fixtur till vänster och FE simulering av töjning till höger.

Efter inledande FE-simuleringarna av fixturen framgår dess komplexitet tydligt. Beroende på hur fixturen roteras belastas konstruktionen mycket. Det faktum att tyngdpunkten är förskjuten i x-led från centrumaxeln av fixturen kommer att orsaka ett moment som vrider konstruktionen. Eftersom att fixturen är ett verktyg bör det även uppfylla vissa krav och tillverkas med högre säkerhetsfaktorer än vad som annars används. Ovanstående simuleringar representerar det koncept och komplexitet som under konstruktionskedet av testtriggen evaluerats och uppdagats. Konstruktionsarbetet av fixturen är väldigt omfattande och kommer som tidigare nämnt ej att vidare diskuteras av detta arbete.

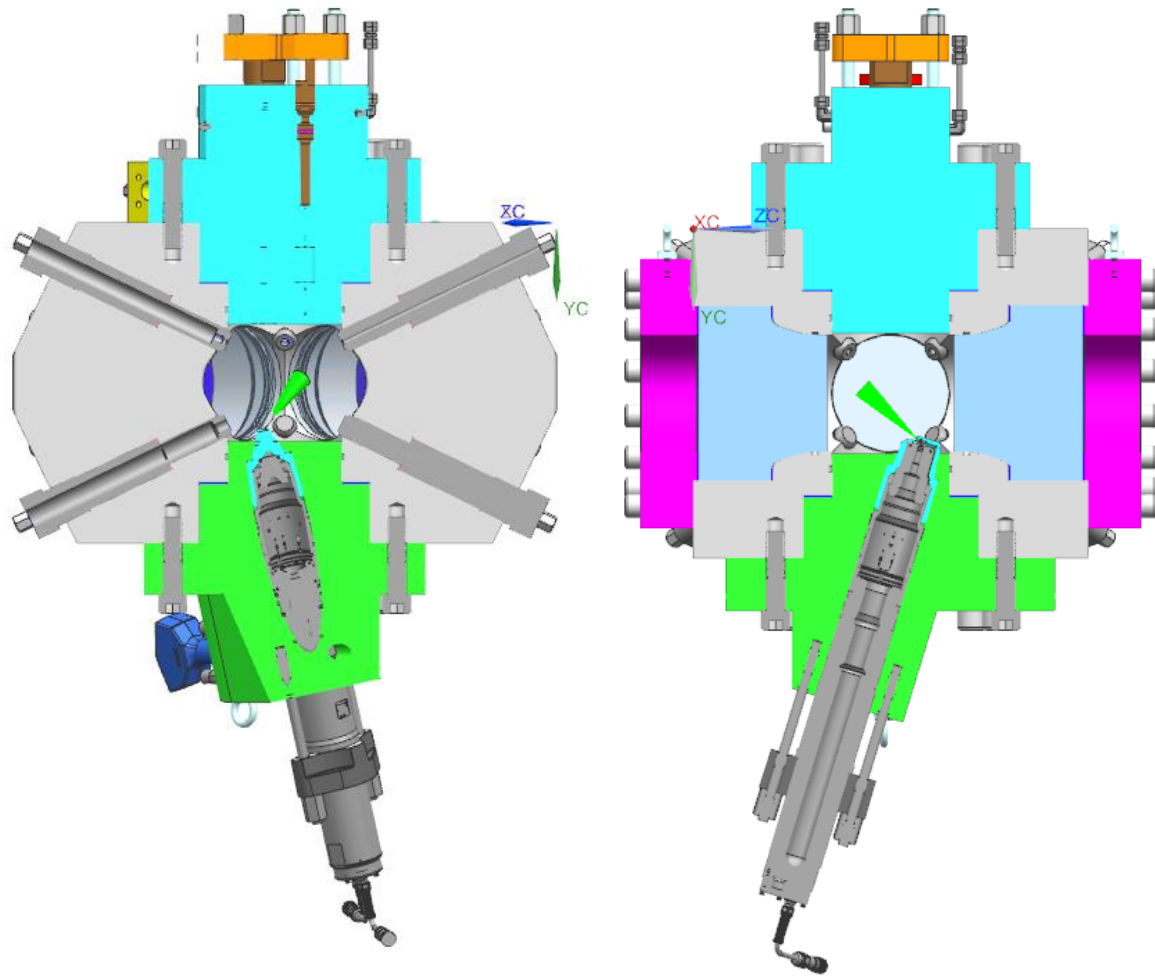
5.2 3D-modeller

Denna del presenterar slutresultatet av konstruktionsarbetet på den optiska testtriggen i form av 3D-modeller. Funktionen för olika komponenter och sammansättningen av kammaren presenteras och diskuteras.

I *figur 33* presenteras testtriggen som helhet där en skiss av fixturen även finns med för att beskriva testtriggens montering. Injektormodulen ansluts till kammarkroppen nerifrån. Till injektormodulerna behövs ännu ett system som levererar bränslet till injektorerna. Gasväxlingsmodulen som återfinns ovanpå kammarkroppen har färdiga anslutningar för hydraulik, gas och avgas. Fönsterflänsarna är utrustade med lyftkrokar för att de snabbt skall kunna lyftas bort, då fönstren är i behov av att putsas. De olika hörnmodulerna som ses i figuren kan utrustas med trycksensorer, tändstift eller ytterligare en gasventil. Från figuren saknas ännu värmeelementen jämte isolering.



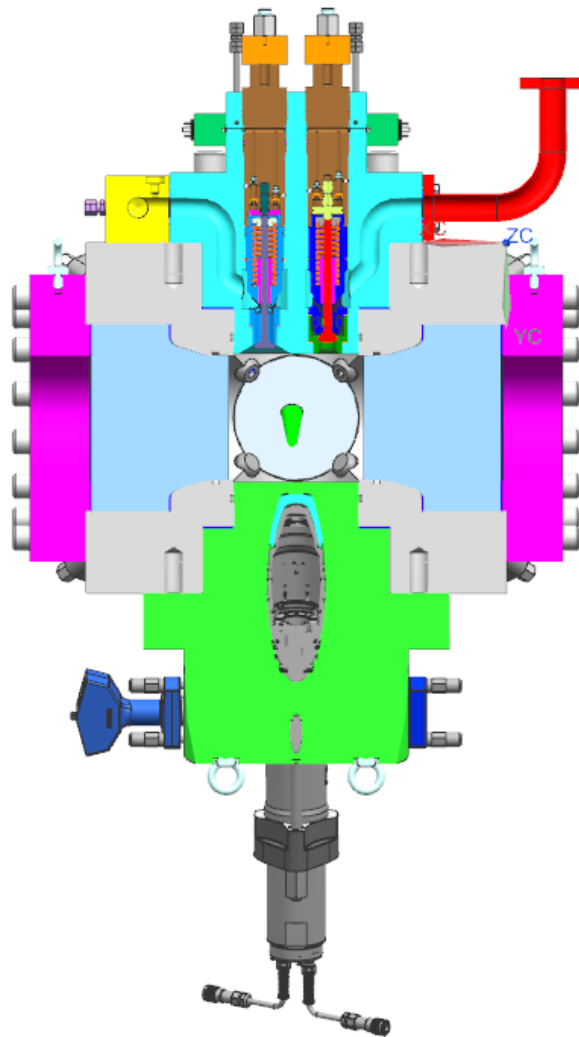
Figur 33. 3D-modell av testtriggen.



Figur 34. Genomskäring av testrigens diagonal till vänster och tvärsnitt av W31 Diesel/DF-injektorn ansluten till testriggen till höger.

I *figur 34* till vänster presenteras en genomskäring av testrigens diagonal vilket framhäver de olika hörmodulerna, dess placering och penetrering till förbränningskammaren. Den optiska anslutningen till kammaren är väldigt stor, nästintill hela kammaren blir synlig. Beroende på hur väl för-förbrännings gaserna blandas kan det komma att behövas någon typ av omrörare inuti kammaren, t.ex. en fläkt. En sådan kan passas in till en av hörnmodulerna.

Figur 34 till höger visar W31 injektorn monterad till sin adapterplatta och fäst till testriggen. En sprej har placerats in i kammaren och visualiserar hur ett laserark kan genomskära sprejen och möjliggöra ortogonal tillgänglighet för en höghastighetskamera. Även passiva metoder så som Schlieren skulle kunna användas vid ett dylikt scenario. Denna genomskäring visualiserar även fönstermodulens montering och utformning. Genom de stora fönstren kommer hela sprejen att vara synlig, vilket kan återkopplas till de inledande kraven.



Figur 35. Genomsnitt av gasväxlingsmodulen ansluten till testriggen.

I figur 35 presenteras ytterligare en genomsnitt. Denna gång på gasväxlingsmodulen, som återfinns monterad till kammaren från ovasidan. I förbränningskammaren ses även en 3D-modell av en sprej. Då ett laserark placeras in från denna sida av kammaren kan sprejen skäras i valfritt tvärsnitt. Här kommer fingerborgsen till sin rätt. Utan den skulle kammaren fyllas av bränslesprejer åt olika håll vilket skulle omöjliggöra optisk diagnostik på en sprej. Ifall ett fönster finns monterat på andra sidan kan laserarket evakueras bort från kammaren för att undvika störande reflektioner inuti kammaren. Fönstren kan också ersättas med gjutjärnsmodeller av fönstren för att undvika onödigt slitage då fönstren är de mest värdefulla och känsliga delarna på testriggen.

5.3 Montering

En optisk testrigg av denna storlek är väldigt tung, totalvikten ligger på dryga 2000 kg med fixturen inräknad. Därför är det skäl att även i konstruktionsskedet ta monteringen i beaktande och fundera över vilka krav konstruktionen ställer på faciliteterna, eller tvärtom. För att montera kammaren smidigt och säkert uppstod idén att utgå från ett lyftande och roterande arbetsbord avsedd för svetsning av stora tunga konstruktioner. Tanken är att injektoradaptorna skall sitta fast i en fixtur som kan monteras på denna roterande arbetsbänk, för att underlätta monteringen av injektorerna. Vidare kan kammarkroppen jämte fönster lyftas på med en kran och fixeras. Slutligen kan gasväxlingsadaptorn monteras med en kran ovanifrån. För att kunna genomföra denna monteringen bör alltså platsen där kammaren monteras ha en kran som lyfter minst 1000 kg.

6 Diskussion

Denna del sammanfattar konstruktionsarbetet med den optiska testriggen och diskuterar kritiskt de problem och utmaningar som funnits under arbetets gång. Slutligen framkommer även några förslag till vidare forskning och egna reflektioner kring uppgiften.

6.1 Problemområden

Arbetet med att designa denna optiska sprejkammare började från tomt skrivbord. Taktiken bakom arbetsgången har varit att först göra en grundlig litteraturstudie och identifiera de lösningar och problem som tidigare konstruktörer har använt. Tyngdpunkten i teoridelen ligger i grunderna till de optiska metoder som används för att undersöka det som sker inuti kammaren, vilket är nyckel till att skapa en god förståelse för hur testriggen bör fungera. I detta kapitel diskuteras en del av de problem som fanns i konstruktionsskedet av olika komponenter.

Det första och kanske mest avgörande beslutet för kammarens utseende och funktion var fönstren, dess utformning och montering. Utgående från de olika kammare som presenterats i olika refererade verk finns det många olika versioner och utformningar av fönster. Att montera fönstren till kammaren kan göras på två sätt aningen utifrån med en fönsterhållare eller att montera fönstren från insidan. Att montera fönstren från insidan skulle betyda att fönstret pressas mot kammarkroppen vid tryckstegring och pressas mot en packning som tätar för medie utbyte med kammaren och omgivningen. Detta skulle även betyda mindre

delar och inget maskinelement i form av skruvförband som skulle hålla fönstren på plats. Att montera fönstren från insidan visade sig vara problematiskt då fönstren är stora och kräver mycket utrymme för att kunna installeras, dessutom bör fönstren snabbt kunna tas bort och vid behov putsas. Denna diskussion ledde till beslutet att montera fönstren från utsidan. Utformningen av fönstren diskuteras i kapitel 4.2.

Då konceptet för fönstren var beslutat gjordes dimensioneringen enligt beräkningar utgående från approximativa formler från Yoder Jr (2006). Enligt dessa spelar monteringen en avgörande roll för hur tjockt fönstret bör vara. Teorin gav rum för tolkningar vilket senare kunde konstateras då FE-simuleringen av fönstren gjordes. Utgående från teorin inverkar monteringen av fönstren på dess tjocklek. Ett fastspänt fönster som belastas med ett ytryck ger en mindre erforderlig tjocklek, dock fanns inga riktlinjer för beräkning av ytrycket i teorin. Utgående från de FE-simuleringar som gjordes var de situationer där fönstret belastades med ett ytryck alltid sämre än utan.

Dimensionering av fönstren visade sig vara en verkligt svår uppgift, under arbetets gång kontaktades även en del potentiella fönstertillverkare för konsultering i gällande fönstrens utformning. Dessa hade heller ingen erfarenhet av de olika fönstermaterialens hållfasthet. Eftersom att dylika applikationer är ganska få till antalet har erfarenheterna av dessa också sannolikt uteblivit hos tillverkarna. Fönstrens hållbarhet fastställs sist och slutligen vid inledande tester av kammaren. Eftersom att fönster gjorda av smält kiseldioxid blir väldigt tjocka kommer det att finnas gott om utrymme för att i framtiden vid behov använda andra material och i behov placera in mindre fönster.

FE-simuleringarna var någonting helt nytt för mig och därför hade jag stor hjälp av Katri och Sören som är experter inom området. Simuleringarna av ventilerna och ventilhusen var de största utmaningarna. I dessa komponenter var det svårt att definiera fixpunkterna, belastningarna samt belastningarnas storlek. Utgående från de olika simuleringarna som gjordes erhöles alltid ett resultat. Emellertid kan det vara svårt att avgöra hur trovärdigt en simulering är, men med sunt bondförnuft och lite förenklade beräkningar vid sidan av simuleringarna kommer man långt. Bedömningen av spänningsnivåerna i komponenterna och vilka nivåer som kan anses vara godkända baserar sig till stor del på erfarenhets värden. Godkända spänningsnivåer beror förstås väldigt mycket på materialets egenskaper, men materialval sker i ett senare skede av projektet och ingår inte i detta arbete.

I alla FE-simuleringar och presentationen av dem har resultatet diskuterats och presenterats av Von Misses jämförelsespänningar i elementen. Det finns förstås både fördelar och nackdelar med att använda båda metoderna. Då spänningarna i elementen undersöks erhålls spänningarna som medeltalet i elementet av omkringliggande Gausspunkter. Detta gör att spänningsnivåerna elementen emellan kan skifta kraftigt vilket bland annat underlättar att se ifall meshen är för grov. Nod värden som i allmänhet ger lite högre spänningar representeras av medeltalet från omkringliggande Gausspunkter och ger en betydligt jämnare färgfördelning. En tumregel för analys av FE-simuleringarna är att undersöka både nod värden och elementvärden ifall spänningarna avviker mindre än 10 % från varandra kan simuleringen anses vara god (Botting, 2011).

Gällande alla komponenter som tillverkas i stål finns det mycket erfarenhet inom företaget. På de möten som ordnades under konstruktions arbetes gång kunde olika komponenter och problem diskuteras och experter som deltog i mötet kunde kommentera och diskutera problem. Dessa möten fungerade även som inspiration och källa till liknande komponenter som färdigt finns utvecklade inom företaget och möjligtvis kan modifieras för att användas på den optiska testriggen. Ett bra exempel på detta är gasväxlingsventilerna som modifierades från ett gammalt projekt för direkt gasinjicering.

Det bör kanske även understrykas att även om kammaren är konstruerad för insprutningsundersökningar där bränslet oxiderar, så är det ändå fullt möjligt att göra undersökningar där bränslet sprutas in i en trycksatt gas utan syre, vilket betyder att ingen förbränning äger rum. Vid dylika undersökningar trycksätts kammaren oftast med kväve vartefter flera insprutningar görs med korta tidsintervall. Vid denna typ av undersökningar lämnar allt bränsle inuti kammaren, vilket då behöver kunna dräneras bort. Vid design av fingerborgarna uppdagades detta problem och tanken på att placera injektorerna neråt för att lättare kunna samla ihop bränslet växte fram.

Under arbetets gång växte modultänkande och vikten för testriggens flexibilitet sig allt starkare. En dylik testrigg kommer sannolikt att vara i användning under flera årtionden framöver därav bör möjligheterna att ändra kammarens egenskaper för olika forskningsprojekt vara ytterst goda. Genom modultänkandet kan testriggens egenskaper lättare ändras och skräddarsys enligt behov.

6.2 Vidare utveckling

Detta examens behandlar som tidigare nämnt endast konstruktion av testtriggen jämte utrustning som behövs för dess funktionalitet. Dock är projektet ännu långt ifrån färdigt och ännu kvarstår detaljritningar, sammanställningsritningar och slutgiltiga materialval för samtliga delar som behövs för testtriggen. Dessutom finns det en del automation i form av styrsystemet för testtriggen kvar att göra. Speciellt gaskontrollen bör designas med eftertanke och testas för att säkerställa att repeterbarheten återfinns inom ett acceptabelt intervall.

Gällande vidareutveckling och framtida användningsområden för kammaren, så är det faktum att kammaren är uppbyggd av moduler dess största styrka. Detta innebär att nya moduler enkelt kan konstrueras för att passa in nya injektorer eller annan utrustning som skall undersökas optiskt. Eventuellt kunde även delar som motsvarar kolvkrona sättas in i kammaren för att studera hur bränslesprejen interagerar med de motordelar som den i vekligheten har kontakt med. Att placera in andra föremål i kammaren för att ändra dess volym är även en möjlighet.

6.3 Slutlig konklusion

Jag började i ett tidigt skede fundera på vilka företag som kunde ge en utmanande och intressant examensarbetsrubrik. Jag ville ha någonting där intresset fick ta över och ta mig djupare ner i ämnet, gärna så mångsidigt som möjligt. Planen var att efter sommaren hitta den perfekta rubriken, men efter diskussioner med en del lärare och min förman Jari Hyvönen, visade det sig att uppgiften som var tänkt som sommararbete skulle passa fint som examensarbete.

Även om jag tidigare arbetat för Wärtsilä på Energy Solutions så var detta en helt ny arbetsplats med nya system och ett annat sätt att tänka. Det jag hade med mig i bagaget från Energy Solution var en bra helhetsbild över hur kraftverk byggs upp kring en förbränningsmotor, samt hur projektarbetet kring byggandet av kraftverken är uppbyggt och fungerar eller inte fungerar.

Under arbetets gång har jag lärt mig mycket. Mer konkreta saker så som enkel FE-simulering och grundkunskaper i Siemens Teamcenter, men också kanske en mer tankemässig eller personlighets mognad som vissa kanske skulle refererar till som ingenjörsmässigt tänkande. Denna utveckling relaterar mer till social kontakt och möten med erfarna ingenjörer som engagerat sig i examensarbetet och varit ivriga att diskutera problem, lösningar eller

förevisat egna konstruktionsproblem. Att lära sig något konkret, till exempel hur man beräknar böjning av en balk, är som att få en nyckel som passar till en dörr, medan utveckla ett visst sätt att tänka och självständigt kunna lösa problem effektivt är mer som att få en universalnyckel som passar till alla dörrar. Ett sätt att tänka eller lösa problem är kanske i slutändan en stor del av vad studierna handlar om.

Utgående från de mål och krav som ställdes vid inledandet av projekten anser jag att dessa blivit uppfyllda av den slutgiltiga designen. Syftet var att ställa fokus på kammarens optiska funktionalitet och att genom en grundlig litteraturstudie inse hur designen bör utformas. Detta tycker jag har lyckats väldigt bra. I och för sig är detta saker som endast kan verifieras då testriggen sist och slutligen tas i bruk.

För att sammanfatta min egna prestation så är jag nöjd över att jag tagit tag i uppgiften som fanns på okänd mark med öppet sinne obegränsad av erfarenheter och endast fantasin med begränsande inverkan. Ett citat från en föreläsning med mentalcoachen Christoph Treier kanske kan beskriva attityden kring hur många goda lösningar kommit till; ”det kunde fungera om...”. Ifall jag skulle göra uppgiften igen skulle jag troligen göra den på samma sätt och göra nya misstag och få nya erfarenheter.

Arbetet med testriggen fortsätter under vintern. I detta skede är jag nöjd min prestation och med hur arbetet fortskridit. Samtidigt hoppas jag att förväntningarna från Wärtsiläs sida uppfyllts och att det fortsatta arbetet med den optiska förbränningskammaren får en god fortsättning och att tillverkningen av testriggen blir verklighet.

Referenser

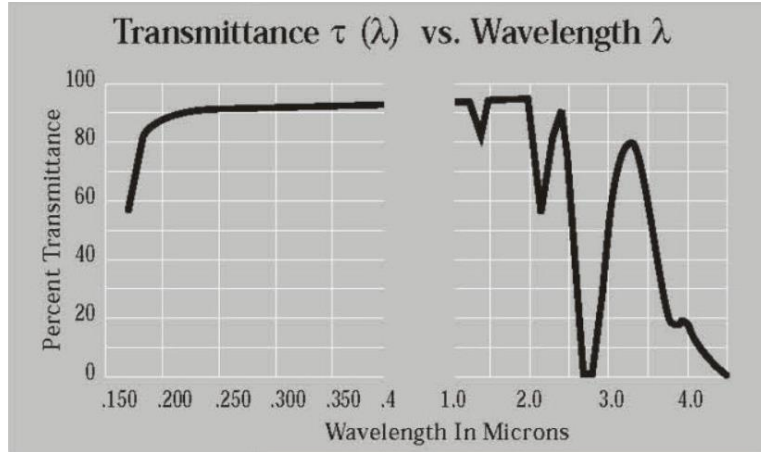
- Baert, R. S., Frijters, P. J., Somers, B., Luijten, C., & De Boer, W. (2009). Design and operation of a high pressure, high temperature cell for HD diesel spray diagnostics: guidelines and results. *SAE international*.
- Bermúdez, V., García, J., Juliá, E., & Martínez, S. (Mars 2003). Engine with Optically Accessible Cylinder Head: A Research Tool for Injection and Combustion Processes. *SAE International*.
- Botting, T. (Regissör). (2011). *SolidWorks Simulation - Element Stresses and Nodal Stresses* [Film]. Hämtat från <https://www.youtube.com/watch?v=wkzGRIuphdc> den 8 September 2018
- Espey, C., & Dec, J. (March 1993). Diesel Engine Combustion Studies in a Newly Designed Optical-Access Engine Using High Speed Visualization and 2-D Laser Imaging. *SAE International*.
- Eurocode Software AB. (u.d.). *Eurokoder betong*. Hämtat från http://www.eurocodesoftware.se/kurs/eurokod_revA/pdf/Eurokod_2_Betong.pdf den 20 Augusti 2018
- Fachhochschule Münster University of Applied Science. (den 8 Augusti 2018). *Center of Sealing Technologies*. Hämtat från <https://www.gasketdata.org/index.php?p=1&lang=en> den 10 Augusti 2018
- Fischer, W. P. (2013). *Design and qualification of a high-pressure combustion chamber for delay testing of diesel fuels*. Monterey, California: Naval Postgraduate School.
- Georgia State University. (2016). HyperPhysics. Georgia, Atlanta, United States of America. Hämtat från <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/atmos/blusky.html> den 18 Juli 2018
- Heraeus Quarzglas. (u.d.). *Transmission Calculator*. Hämtat från Heraeus Quarzglas: https://www.heraeus.com/en/hqs/fused_silica_quartz_knowledge_base/t_calculator/transmission_calculator.aspx?selection=suprasil_2b&chart=0&rangeX=120,5000&rangeY=0,100 den 7 November 2018
- Herrmann, K. (2011). *Spray Combustion Chamber, a representative of Large 2-Stroke Diesel Engine Combustion Systems*. Wärtsilä internal presentation.
- Heywood, J. B. (1988). *Internal Combustion Engine Fundamentals*. Massachusetts: McGraw-Hill Book Company.
- Janis Research Company. (den 7 November 2018). *Window Transmission Curves*. Hämtat från JANIS: <https://www.janis.com/Products/AccessoriesandAncillaryEquipment/WindowTransmissionCurves.aspx>
- Kamimoto, T., Kando, H., Kobori, S., Hatano, H., & Kobayashi, H. (Oktober 1988). Development of a Rapid Compression Expansion Machine to Simulate Combustion in Diesel Engines. *SAE International*.

- LaVision. (u.d.). Mie/Rayleigh/Raman. Göttingen, Tyskland. Hämtat från <https://www.lavision.de/en/techniques/mie-rayleigh-raman/index.php> den 18 Juli 2018
- Mägi, M., & Melkersson, K. (2006). *Lärobok i maskinelement*. Göteborg.
- Pickett, L. M., Kook, S., & Williams, T. C. (Januari 2009). Visualization of Diesel Spray Penetration, Cool-Flame, Ignition, High-Temperature Combustion and Soot Formation Using High-Speed Imaging. *SAE International*.
- Seppä, J. (2011). *Optical access to the combustion chamber in a large bore gas engine*. Vaasa: Vaasan ammattikorkeakoulu.
- València, U. P. (u.d.). *CMT-Motores Térmicos*. Hämtat från Universitat Politècnica de València: https://www.cmt.upv.es/G02_09.aspx den 1 Juli 2018
- VDI 2230 Standard. (u.d.).
- Wärtsilä Internal Standard WFI0 033.0005-0006. (u.d.).
- Wärtsilä Internal Standard WFI337.0010-WFI33.0014. (u.d.).
- Wikipedia. (den 7 Oktober 2017). *Shadowgraph*. Hämtat från Wikipedia: <https://en.wikipedia.org/wiki/Shadowgraph> den 8 Juli 2018
- Yoder Jr, P. R. (2006). *Opto-Mechanical Systems Design*. Boca Raton: Taylor & Francis Group, LLC.
- Zhao, H. (2012). *Laser Diagnostics and Optical Measurements Techniques*. Warrendale, Pennsylvania: SAE Internaltional.

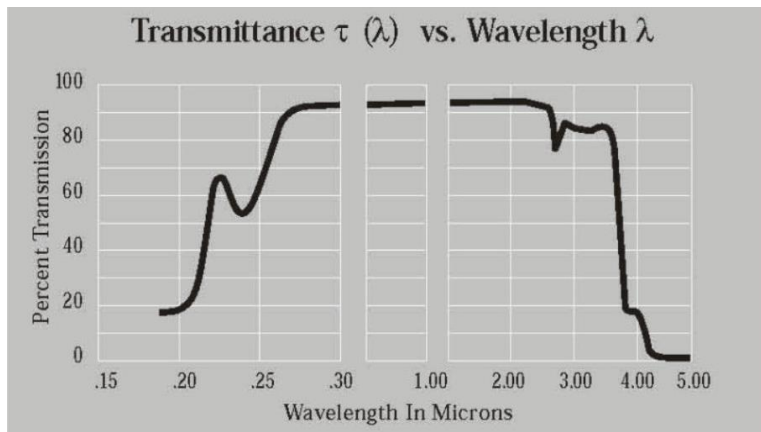
Bilaga 1. Optiska materials transmissioner vid olika våglängd och tjocklek

Window transmission curves. (Janis Research Company, 2018).

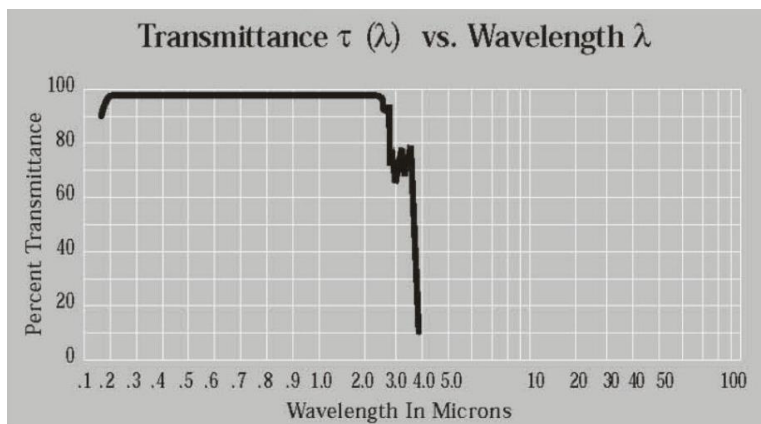
Fused Silica UV Grade (SiO₂) (Janis Research Company, 2018).



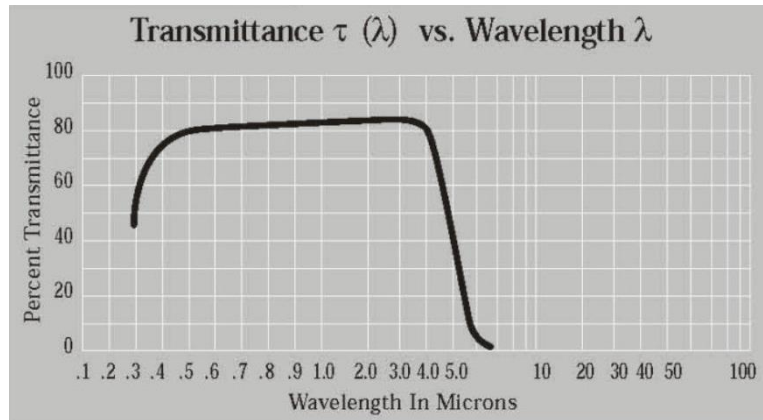
Fused Silica IR Grade (SiO₂) (Janis Research Company, 2018).



Quartz (SiO₂) (Janis Research Company, 2018).

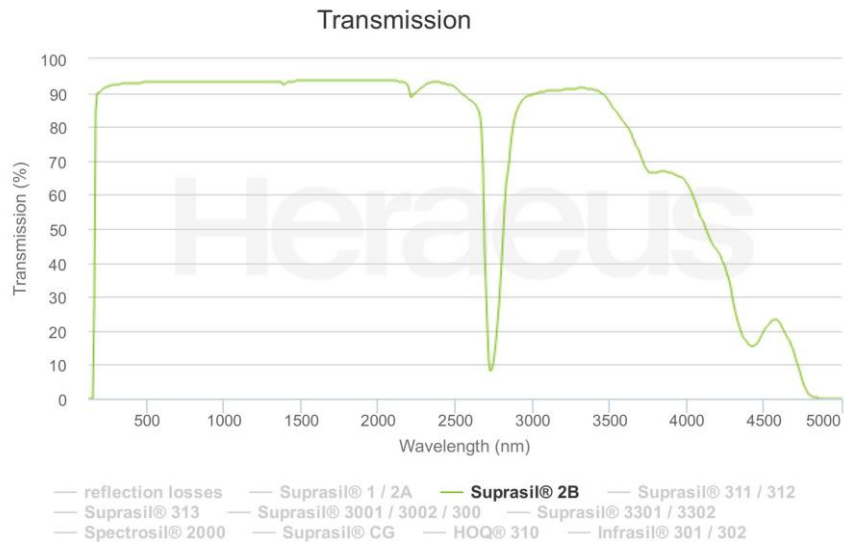


Sapphire (Al_2O_3) (Janis Research Company, 2018).

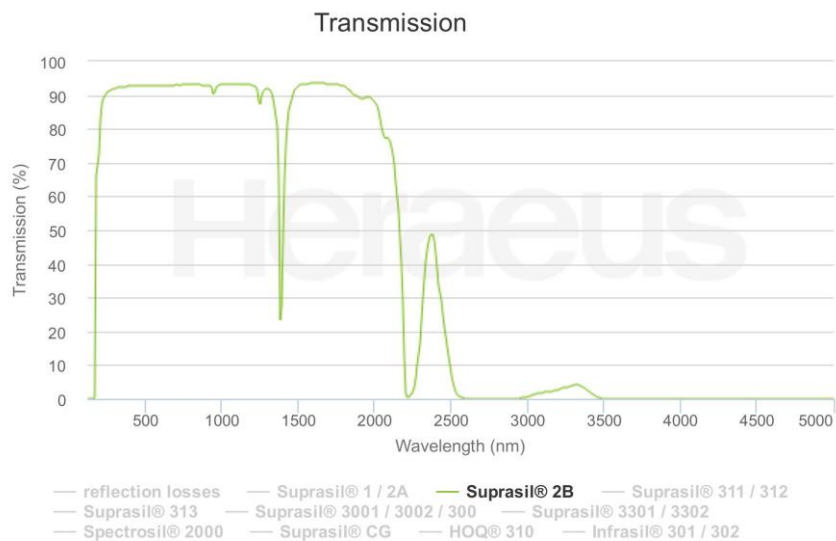


Skillnaden i transmission för två Fused Silica fönster av olika tjocklek. (Heraeus Quarzglas, ei pvm).

Transmission för 2mm tjockt Suprasil 2B glas (Heraeus Quarzglas, ei pvm).



Transmission för 200mm tjockt Suprasil 2B glas (Heraeus Quarzglas, ei pvm).



Bilaga 2. Materialdatablad för fönster (Yoder Jr, 2006; 101-102, 324)

TABLE 3.8
Opto-Mechanical Properties of Selected IR-Transmitting Glass and Other Oxides

Material Name (Symbol)	Refractive Index n at λ (μm)	dn/dT at λ (μm) ($\times 10^{-6}/^\circ\text{C}$)	CTE α ($\times 10^{-6}/^\circ\text{C}$)	Young's Modulus E ($\times 10^{10}$ Pa)	Poisson's Ratio ν	Density ρ (g/cm^3)	Knoop Hardness (kg/mm^2)	$K_G = (1-\nu_G^2)/E_G \times 10^{-11}$ (Pa^{-1})
Aluminum oxynitride (ALON)	1.793 at 0.6 1.66 at 4.0		5.8	32.2	0.24	3.71	1970	0.293
Calcium aluminosilicate (Schott IRG11)	1.684 at 0.55 1.635 at 3.3 1.608 at 4.6		8.2 at 293–573 K	10.8	0.284	3.12	608	0.851
Calcium aluminosilicate (Corning 9753)	1.61 at 0.5 1.57 at 2.5		6.0 at 293–573 K	9.86	0.28	2.798 (500 g load)	600	0.935
Calcium aluminosilicate (Schott IRGN6)	1.592 at 0.55 1.562 at 2.3 1.521 at 4.3		6.3 at 293–573 K	10.8	0.284	3.12	608	0.851
Fluoride glass (Ohara HTF1)	1.51 at 1.0 1.49 at 3.0	-8.19	16.1	6.42	0.28	3.88	311	1.436
Fluorophosphate glass (Schott IRG9)	1.488 at 0.55 1.469 at 2.3 1.458 at 3.3		16.1 at 293–573 K	7.7	0.288	3.63	346 (200 g load)	1.191
Germanate (Corning 9754)	1.67 at 0.5 1.63 at 2.5 1.61 at 4.0		6.2 at 293–573 K	8.41	0.290	3.581	560 (100 g load)	1.089
Germanate (Schott IRG2)	1.899 at 0.55 1.841 at 2.3		8.8 at 293–573 K	9.59	0.282	5.00	481 (200 g load)	0.960

TABLE 3.8 (Continued)

Material Name (Symbol)	Refractive Index n at λ (μm)	dn/dT at λ (μm) ($\times 10^{-6}/^\circ\text{C}$)	CTE α ($\times 10^{-6}/^\circ\text{C}$)	Young's Modulus E ($\times 10^{10}$ Pa)	Poisson's Ratio ν	Density ρ (g/cm^3)	Knoop Hardness (kg/mm^2)	$K_G = (1-\nu_G^2)/E_G \times 10^{-11}$ (Pa^{-1})
Lanthanum dense flint (Schott IRG3)	1.851 at 0.55 1.796 at 2.3 1.776 at 3.3		8.1 at 293–573 K	9.99	0.287	4.47	541 (200 g load)	0.918
Lead silicate (Schott IRG7)	1.573 at 0.55 1.534 at 2.3		9.6 at 293–573 K	5.97	0.216	3.06	379	1.597
Sapphire ^a (Al_2O_3)	1.684 at 3.8 1.586 at 5.8	13.7	5.6 (\parallel) 5.0 (\perp) -	40.0	0.27	3.97	1370 (1000 g load)	0.232
Fused silica (Corning 7940)	1.561 at 0.19 1.460 at 0.55 1.433 at 2.3 1.412 at 3.3	10–11.2 at 0.5–2.5	0.6 at 73 K 0.58 at 273–473 K	7.3	0.17	2.202 (200 g load)	500	1.333

TABLE 6.1
Typical Minimum Values for Fracture Strength S_f of Infrared Window Materials^a

Material	S_f (MPa)	S_f (lb./in. ²)
MgF ₂ (single crystal)	142	2.05×10 ⁴
MgF ₂ (polycrystalline)	67	9.71×10 ³
Sapphire (single crystal)	300	4.35×10 ⁴
ZnS	100	1.45×10 ⁴
Diamond (CVD)	100	1.45×10 ⁴
ALON	300	4.35×10 ⁴
Silicon	120	1.74×10 ⁴
CaF ₂	100	1.45×10 ⁴
Germanium	90	1.30×10 ⁴
Fused silica	60	8.70×10 ³
ZnSe	50	7.25×10 ³








^aThese values are approximate. They depend upon the quality of the surface finish, fabrication method, material purity, type of test, and size of the sample. Source: Adapted from Harris, D.C., *Materials for Infrared Windows and Domes, Properties and Performance*, SPIE Press, Bellingham, 1999.

Bilaga 3. Allmän översikt och funktion för olika tätningar (Mägi & Melkersson, 2006; 285-287)

Tabell 6.1: *Roterande rörelse*

Tätningar lämpliga för ROTERANDE RÖRELSE








Nedanstående värden avser normalutföranden. Mera högvärdiga material och utföranden finns vanligtvis att tillgå. Kontroll måste göras mot materialtabeller och leverantörens anvisningar.

HASTIGHET	MEDIUM SOM SKALL AVTÄTAS					ARBETS-TEMPERATUR	MEDIETS TRYCK	TÄTNINGSTYP	Funktionsbeskr. se sid	Leve- ran- törs- översikt se sid	TYPEXEMPEL
	Max pe- riferi- hastig- het	Smörjande vätskor	Ej smörjande vätskor	Damm, lätt, torr smuts	Svår, fuktig smuts						
m/s						°C Min Max	MPa (1 MPa = 10 bar)				
12	●	●	●	○	●	-40 +110	0,05 (50 kPa)	Radialtätningar Nitrilgummi	22	64	
12-18	●	●	●	●	●	-40 +100	0,05 (50 kPa)	Axialtätningar Nitrilgummi	26	66	
25	●	●	●	●	●	-90 +500	7	Packboxar Varierande material	28	66	
20 20	●	●	●	○	●	-40 +120 -40 +120	1 (5) 1 (5)	Glidringtätningar (Plasttät. roterande) Kol-stål el. keramik Hårdmetall	32	67	
10 0,5 0,5 5	○	○	●	●	○	-40 +100 -30 +100 -100 +200 -30 +70	0 0 0 0	Ringar Filt Nitrilgummi PTFE Läder	35	68	
50	●	●	●	●	●	-200 +600	0	Spalt- och labyrint- tätningar Varierande material	37	69	
0,2	●	○	○	○	○	-30 +100	10	O-ringar Nitrilgummi	41	72	

● Lämplig ● Mindre lämplig ○ Olämplig

Tabell 6.1 forts...: *Stillestånd*Tätningar lämpliga för **STILLESTÅND** (Statisk tätning)

Nedanstående värden avser normalutföranden. Mera högvärdiga material och utföranden finns vanligtvis att tillgå. Kontroll måste göras mot materialtabeller och leverantörers anvisningar.

MEDIUM SOM SKALL AVTÄTAS							ARBETS-TEMPERATUR		MEDIETS TRYCK	TÄTNINGSTYP	Funktionsbeskr.	Leverantörsöversikt	TYPEXEMPEL
Vatten	Vattenånga	Oljor	Alkalier	Syror	Damm	Gaser	Min	Max	Max tryckskillnad över tätningen MPa (1 MPa = 10 bar)		se sid	se sid	
●	●	●	●	○	●	●	-40	+450	10	<u>Plangäckningar</u>	38	70	
●	●	●	●	○	●	●	-190	+200	10	Asbest-gummi			
●	○	●	○	○	●	●	-30	+90	1	Asbest-PTFE			
●	○	●	○	○	●	○	-30	+120	1	Kloroprengummi			
●	○	●	○	○	●	●	-200	+600	15	Kork, -gummi			
●	○	●	○	○	●	●	-100	+200	2	Metall-asbets			
○	○	●	○	○	●	●	-30	+100	1,5	PTFE			
●	●	●	●	●	●	●	-200	+750	330	Växtfiber			
●	●	●	●	●	●	●	-200	+900	200	Metall-O-ringar			
●	○	●	○	○	●	●	-30	+100	50	<u>O-ringar</u>	41	72	
●	●	●	○	○	●	●	-30	+100	70	<u>Bricktätningar</u>	43	74	
●	●	●	●	○	●	●	-50	+400	35	<u>Tätningmedel</u>	44	74	
●	●	●	●	●	●	●	-50	+200	35	Stelnande			
●	●	●	●	●	●	●	-100	+200	50	<u>Tejp för gängtätning</u>	45	75	
●	○	○	○	○	●	○	-30	+90	0	<u>Skyddsproppar</u>	46	75	
●	○	●	●	●	●	○	-40	+80	0	Kloroprengummi			
●	○	○	○	○	●	○	-30	+90	0	Polyeten			
●	○	○	○	○	●	○	-20	+50	0	<u>Bälgar</u>	21	63	
●	●	●	●	●	●	●	-200	+600	7,5	Kloroprengummi			
●	○	●	○	○	●	○	-20	+80	0	Läder			
●	●	●	●	●	●	●	-100	+200	6	Metall			
●	●	●	●	●	●	●				PVC			
●	●	●	●	●	●	●				PTFE			

● Lämplig ○ Mindre lämplig ○ Olämplig

Tabell 6.1 forts...: Fram- och återgående rörelse

Tätningar lämpliga för FRAM- OCH ÅTERGÅENDE RÖRELSE

Nedanstående värden avser normalutföranden. Mera högvärdiga material och utföranden finns vanligtvis att tillgå. Kontroll måste göras mot materialtabeller och leverantörers anvisningar.

HASTIGHET	MEDIUM SOM SKALL AVTÄTAS					ARBETS-TEMPERATUR		MEDIETS TRYCK	TÄTNINGSTYP	Funktionsbeskr. se sid	Leverantörsöversikt se sid	TYPEXEMPEL
	Max	Smörjande vätskor	Ej smörjande vätskor	Damm, lätt, torr smuts	Svår, fuktig smuts	Gaser	Mätt i närheten av tätningsstället					
m/s						°C	MPa (1 MPa = 10 bar)					
						Min	Max					
1	●	●	○	○	○	-30	+100	80	Kompakttätningar Nitrilgummi + väv + plast	8	54	
1	●	●	○	○	○	-30	+100	40	V-tätningar Nitrilgummi + väv	10	55	
1	●	●	○	○	○	-100	+200	30	PTFE			
1	●	●	○	○	○	-30	+100	25	U-manschetter Nitrilgummi	12	56	
0,5	●	●	○	○	○	-30	+70	15	Läder			
1	●	●	○	○	○	-20	+60	40	Uretangummi			
4	●	●	○	○	○	-30	+100	30	Glidhylstätningar	14	58	
3	●	●	○	○	○	-100	+200	20	Kolvringar PTFE	15	58	
1	○	○	●	●	○	-30	+100	0	Avstrykare Nitrilgummi	16	59	
1	○	○	●	●	○	-20	+60	0	Uretangummi			
1	●	●	○	○	○	-30	+100	4	Skål- o hattmanschetter Nitrilgummi	18	60	
0,5	●	●	○	○	○	-30	+70	1	Läder			
	●	●	○	○	○	-30	+100	1	Membran Nitrilgummi (+ väv)	19	62	
	●	●	○	○	○	-100	+200	1	PTFE			
2	●	●	●	●	○	-30	+90	0	Bälgar Kloroprengummi	21	63	
2	●	●	●	●	○	-20	+50	0	Läder			
2	●	●	●	●	○	-200	+600	7,5	Metall			
	●	●	●	●	○	-30	+80	0	PVC			
2	●	●	●	●	○	-100	+200	0,6	PTFE			
3	●	●	○	○	○	-30	+100	10	O-ringar Nitrilgummi	41	72	
25	●	●	●	●	○	-90	+500	7	Packboxar Varierande material	29	66	

● Lämplig ○ Mindre lämplig ○ Olämplig

Bilaga 4. Beräkningar

Beräkningar i Excel

Fönster

Beräkning av fönstertjocklek enligt ekvation (1) och OPD enligt ekvation (2)

	Clamped		Unclamped		Note
	Fused silica	Safir	Fused silica	Safir	
Beteckning					
A_w [mm]	180	180	180	180	Unsupported diameter
K_w	0,75	0,75	1,25	1,25	Support conditions constant (1,25 if unclamped else 0,75)
F_s	4	4	4	4	Safety factor (default =4)
S_f [MPa]	60	300	60	300	Fracture strenght (fused silica)
n	1,46	1,684	1,46	1,684	Refractive index (lambda = 3800 nm)
P_w [MPa]	40	40	40	40	Pressure differential
t_w [mm]	127	57	164	73	Minimum thickness
E_g 10^{10} Pa	7,3	40	7,3	40	Young's modoul
D [mm]	270	270	270	270	Supported diameter
OPD [nm]	1,25	3,46	0,35	0,97	Optical Path Difference

Beräkningar i MathCad

Skruvförband**Beräkning av tryck mot fönsterflänsen**

$$P_{max} := 400 \text{ bar} \quad \text{maximalt kammарtryck}$$

$$d_{op} := 180 \text{ mm} \quad \text{Optisk diameter}$$

$$A_{op} := \frac{\pi \cdot d_{op}^2}{4} = 25446.9 \text{ mm}^2 \quad \text{Fönstrets optiska area}$$

$$F_{fläns} := P_{max} \cdot A_{op} = 1017.876 \text{ kN} \quad \text{Kraften genom fönstret som skall upptas av flänsen}$$

Val av fönsterflänsens bultar enligt VDI 2230

$F_{fläns} = 1017.876 \text{ kN}$ Kraften som skall upptas av skruvförbandet

$N_f := 16$ Väljer lämpligt antal bultar med tanke på utrymme

$\frac{F_{fläns}}{N_f} = 63.617 \text{ kN}$ Kraften per bult

Belastning enligt fall B2,1, excentrisk last. Vilket innebär "2 steg ner"

$D := 24 \text{ mm}$ Väljer bultstorlek M24

$l := D \cdot 4 = 96 \text{ mm}$ Bultlängd enligt tumregel (min 4x D), väljer 110 mm

$t := 31 \text{ mm}$ Gängdjup enligt WFI0033.0005

$e := 12 \text{ mm}$ Frihåll enligt EFI0033.0005

Beräkning av fönsterflänsens hålkonfiguration

$D_{inre} := 270 \text{ mm}$ Flänsens inre diameter

$D_i := \left(\frac{D_{inre}}{2} + D \cdot 1.6 \right) \cdot 2 = 346.8 \text{ mm}$ Bultarnas delningsdiameter, väljer 350 mm

$D_y := \left(\frac{D_i}{2} + D \cdot 1.25 \right) \cdot 2 = 406.8 \text{ mm}$ Flänsens ytterdiameter, väljer 410mm

$D_f := 26 \text{ mm}$ Bulthålens diameter, frihåll enligt WFI0033.0006

Val av gasväxlings och injector modulernas bultar enligt VDI 2230

$F_{fläns} = 1017.876 \text{ kN}$ Kraften en mot förbandet

$N_f := 10$ Väljer lämpligt antal bultar med tanke på utrymme

$\frac{F_{fläns}}{N_f} = 101.788 \text{ kN}$ Kraft per bult

Belastning enligt fall B2,1, excentrisk last. Vilket innebär "2 steg ner"

$D := 30 \text{ mm}$ Väljer bultstorlek M30

$l := D \cdot 4 = 120 \text{ mm}$ Minimi bultlängd enligt tumregel (min 4 x D)

$t := 53 \text{ mm}$ Gängdjup enligt WFI0033.0005

$e := 14 \text{ mm}$ Frigång enligt WFI0033.0005

Beräkning av fönsterflänsens hålkonfiguration

$D_{inre} := 270 \text{ mm}$	Flänsens inre diameter
$D_i := \left(\frac{D_{inre}}{2} + D \cdot 1.6 \right) \cdot 2 = 366 \text{ mm}$	Bultarnas delningsdiameter, väljer 350 mm
$D_y := \left(\frac{D_i}{2} + D \cdot 1.25 \right) \cdot 2 = 441 \text{ mm}$	Flänsens ytterdiameter, väljer 440 mm
$D_f := 33 \text{ mm}$	Bulthålens diameter, frihål enligt WFI0033.0006

Ventiler**Krafter på kolven (avgasventil)**

$D := 24 \text{ mm}$	Ventilens diameter
$A_v := 490 \text{ mm}^2$	Avrundat värde på ventilens area, hämtat från NX
$P_{max} = 400 \text{ bar}$	Maxtryck mot ventilen
$F := A_v \cdot P_{max} = 19.6 \text{ kN}$	Kraft riktad mot kolven, vill öppna ventilen
$D_k := 14 \text{ mm}$	Befintliga kolvens diameter
$A_k := \frac{\pi \cdot D_k^2}{4} = 153.938 \text{ mm}^2$	Kolvarea
$P_{erf} := \frac{F}{A_k} = 1273.24 \text{ bar}$	Erfoderligt hydraultryck
$P_h := 200 \text{ bar}$	hydraulikens arbetstryck (maxtryck för ventilen 350 bar)
$A_{k_min} := \frac{F}{P_h} = 980 \text{ mm}^2$	Minimi kolvarea
$D_k := \sqrt{\frac{4 \cdot A_{k_min}}{\pi}} = 35.324 \text{ mm}$	Minimi kolv diameter

Kontroll av insugs areor

$$A_{kanal} := 369 \text{ mm}^2 \quad \text{Arean för en kanalerna}$$

$$A_{ventil} := 351 \text{ mm}^2 \quad \text{Area för öppen ventil}$$

ok! eftersom ventilens area är större än kanalernas

Kontroll av avgas areor

$$A_{kanal} := 381 \text{ mm}^2 \quad \text{Arean för en kanalerna}$$

$$A_{ventil} := 362 \text{ mm}^2 \quad \text{Area för öppen ventil}$$

ok! eftersom ventilens area är större än kanalernas

Beräkning av bultar för insugsventil enligt VDI 2230

$$A := 1018 \text{ mm}^2 \quad \text{Ventilhusets area}$$

$$P_{max} = 400 \text{ bar} \quad \text{Maxtryck}$$

$$F := P_{max} \cdot A = 40720 \text{ N} \quad \text{Kraften en mot förbandet}$$

$$N_f := 2 \quad \text{Väljer lämpligt antal bultar med tanke på utrymme}$$

$$\frac{F}{N_f} = 20360 \text{ N} \quad \text{Kraft per bult}$$

Belastning enligt fall B2,1, excentrisk last. Vilket innebär "2 steg ner"

$$D := 16 \text{ mm} \quad \text{Väljer bultstorlek M16}$$

Vill ha likadana bultar för båda ventilerna och bräknar därför båda och väljer den som kräver störst bult

Beräkning av bultar för avgasventil enligt VDI 2230

$A := 1662 \text{ mm}^2$	Ventilhusets area
$P_{max} = 400 \text{ bar}$	Maxtryck
$F := P_{max} \cdot A = 66480 \text{ N}$	Kraften en mot förbandet
$N_f := 2$	Väljer lämpligt antal bultar med tanke på utrymme
$\frac{F}{N_f} = 33240 \text{ N}$	Kraft per bult
Belastning enligt fall B2,1, excentrisk last. Vilket innebär "2 steg ner"	
$D := 20 \text{ mm}$	Väljer bultstorlek M20
$l := D \cdot 4 = 80 \text{ mm}$	Minimi bultlängd enligt tumregel (min 4 x D)
$t := 26 \text{ mm}$	gängdjup enligt WFI0033.0005
$e := 10 \text{ mm}$	Frigång enligt WFI0033.0005
$D := 22 \text{ mm}$	Frihål enligt WFI0033.0006

Energien för en insprutning

$\text{kW} := 1000 \text{ W}$	$\text{MJ} := 1000000 \text{ J}$	
$n := \frac{750}{60 \text{ s}} = 12.5 \frac{1}{\text{s}}$		Motorns varvtal
$BSFC := 1.25 \cdot 0.178 \frac{\text{kg}}{\text{kW} \cdot \text{hr}}$		Specifik bränsleförbrukning (enligt W31:ans performance manual, med 25% antagen överdimensionering)
$P_{cylinder} := 610 \text{ kW}$		Axeffekt per cylinder
$\dot{m}_b := BSFC \cdot P_{cylinder} = 0.038 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$		Bränsleförbrukning
$m_b := \frac{\dot{m}_b}{\frac{n}{2}} = 6.032 \text{ gm}$		Bränslemassa per insprutning
$N_{hal} := 10$		Antal hål i dysan
$m_{b_sprej} := \frac{m_b}{N_{hal}} = 0.603 \text{ gm}$		Bränslemassa per sprej
$\rho_b := 0.83 \frac{\text{kg}}{\text{L}}$		Uppskattad densitet för diesel
$V_b := \frac{m_b}{\rho_b} = 7.268 \text{ mL}$		Bränslevolym per insprutning

$$V_{b_sprej} := \frac{m_{b_sprej}}{\rho_b} = 0.727 \text{ mL}$$

Bränslevolym per sprej

$$V_{b_drenerad} := V_{b_sprej} \cdot 9 \cdot 10 = 65.41 \text{ mL}$$

Bränslevolym för 9 sprejer drenerade under 10 insprutningssekvenser

$$LHV := 44 \frac{\text{MJ}}{\text{kg}}$$

Antaget effektivt värmevärde för lätt olja

$$q := LHV \cdot m_b = 0.265 \text{ MJ}$$

Tillförd kemisk energi per insprutning

$$q_{sprej} := \frac{q}{10} = 0.027 \text{ MJ}$$

Tillförd kemisk energi per sprej

Temperature och tryck efter kompression (ideal diesel cykel, adiabatisk kompression)

Överslagsberäkning på kompressions temperaturen och trycket för att ungefärligt bestämma de tryck och temperatur förhållanden som bör råda innuti kammaren efter för-förbränningen. I beräkningen görs antagandet att kompressionen sker adiabatiskt, dvs. inga värmeförluster till omgivningen.

$$p_1 := 5 \text{ bar}$$

Antaget absoluttryck i cylindern före kompression

$$t_1 := 300 \text{ K}$$

Antagen temperatur före kompression

$$V_1 := 32460 \text{ cm}^3$$

Max volym, värden tagna från sprejsimulatoren

$$V_2 := 1973 \text{ cm}^3$$

Min volym, värden tagna från sprejsimulatoren

$$r_c := \frac{V_1}{V_2} = 16.452$$

kompressionsförhållande, värden tagna från sprejsimulatoren

$$\kappa := 1.4$$

Adiabatkonstanten enligt Tekniikan Taulukkokirja (2013) s.194

$$p_2 := p_1 \cdot V_1^\kappa = p_2 \cdot V_2^\kappa \xrightarrow{\text{solve, } p_2, \text{ explicit}} \frac{p_1 \cdot V_1^\kappa}{V_2^\kappa}$$

$$p_2 = 252.162 \text{ bar}$$

Beräknat kompressionstryck

$$t_2 := \frac{t_1}{t_2} = \left(\frac{p_1}{p_2} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} \xrightarrow{\text{solve, } t_2, \text{ explicit}} \frac{t_1}{\left(\frac{p_1}{p_2} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}}$$

$$t_2 = 919.623 \text{ K}$$

Beräknad kompressions temperatur

För noggrannare beräkningar borde en motor väljas, varifrån i laboratoriet registrerade mätvärden kan användas

Överslagsberäkning av erforderlig area för limmade fönster

$$D_{fönster} := 180 \text{ mm}$$

Fönstrets tjocklek

$$t_1 := 164 \text{ mm}$$

Beräknad fönster tjocklek
(fused silica, unclamped)

$$A_{mantel} := D_{fönster} \cdot \pi \cdot t_1 = 92739.815 \text{ mm}^2$$

Yta för limmets applicering

$$F_{lim} := F_{fläns} = 1017.876 \text{ kN}$$

Kraften genom fönstret som
limmet skall uppta

$$\sigma_{\tau} := \frac{F_{lim}}{A_{mantel}} = 10.976 \text{ MPa}$$

Skjuvkraften i limmet

$$\sigma_{\tau_tillaten} := 6 \text{ MPa}$$

Max tillåten skjuvspänning i limmet

$$A_{erf} := \frac{F_{lim}}{\sigma_{\tau_tillaten}} = (1.696 \cdot 10^5) \text{ mm}^2$$

Erforderlig mantelarea

$$t_{erf} := \frac{A_{erf}}{\pi \cdot D_{fönster}} = 300 \text{ mm}$$

Erforderlig fönstertjocklek