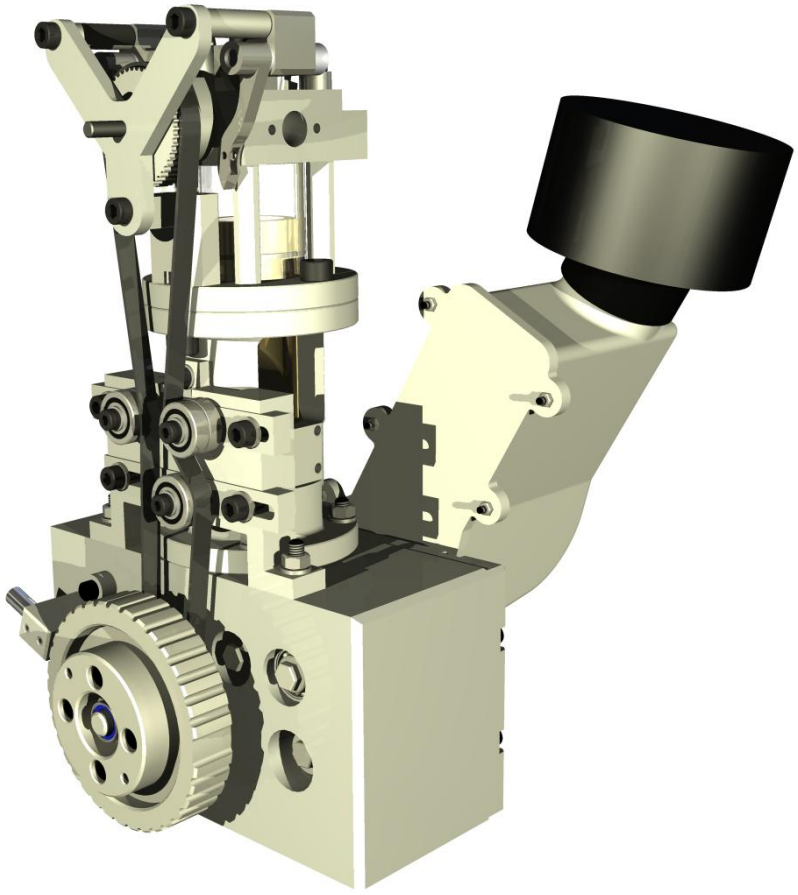
CHALMERS



Utveckling av optikmotor för Chalmers Vera team

Kandidatarbete inom civilingenjörsprogrammet i maskinteknik
TMEX02-14-07
Handledare: Anders Johansson

Anders Dahl
Carl Edelberg
Kristoffer Clasén
Max Sundén
Oscar Berglund

Institutionen för Tillämpad Mekanik, avdelningen Förbränning
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA
Göteborg, Sverige 2014

Förord

Vi vill tacka följande personer som bidragit med kunskap och stöd under projektet

Anders Johansson, handledare och upphovsman till projektet
Sven Andersson, examinator
Marcus Lindner, handledare för systerprojektet Vera Simulator
Eugenio De Benito Sienes, operatör för Chalmers AVL-optikmotor

Sammanfattning

Denna rapport syftar till att avhandla ett kandidatarbete inom maskinteknik som genomförts på Chalmers Tekniska Högskola under våren 2014. Arbetet har haft som syfte att utveckla samt konstruera en optikmotor baserad på Chalmers Vera Teams förbränningsmotor av generation sex. Optikmotorn skall stå till Vera-teamets förfogande i syfte att analysera befintlig konstruktion samt ge möjlighet att i framtiden utvärdera nya koncept med avsikt att optimera motorns bränsleeffektivitet.

Optikmotorn har konstruerats från grunden med hjälp av CAD-programvara och en prototyp har därefter tillverkats av projektgruppen i Chalmers Maskintekniks prototypverkstad.

Några förbränningsanalyser har inte förväntats genomföras inom projektets tidsram, utan fokus har legat på utveckling och tillverkning för att ta fram ett koncept för vidare utvärdering och framtida utveckling.

Projektgruppen lyckades slutförda uppgiften att konstruera och tillverka motorn, men på grund av anledningar som presenteras i rapporten fanns tyvärr inte tid för tester av motorn innan projektets avslutande.

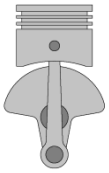
Innehållsförteckning

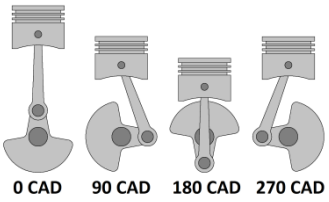
1 Inledning 1
1.1 Bakgrund 1
1.2 Syfte 2
1.3 Uppgift 2
1.4 Frågeställning 2
1.5 Optikmotorns uppbyggnad 3
1.6 Teori 4
1.7 Avgränsningar 6
2 Metod 7
2.1 Förstudie 7
2.2 Projektfaser 11
2.3 Delkomponenter 11
2.4 Tillverkningsbarhet 11
2.5 Generellt om tillverkningsmaterial 12
2.6 Designmetod 12
2.7 Tillverkningsmetod 14
2.8 Provkörning och utvärdering 14
3 Konstruktion 15
3.1 Kolv 15
3.2 Vevhus, vevaxel och balansering 17
3.3 Cylinder 20
3.4 Kamremspännare 28
3.5 Vevhusventilation 29
3.6 Spegel och spegelfäste 31
3.7 Kraftöverföring och startanordning 34
4 Tillverkning 36
4.1 Kolv 36
4.2 Vevhus, vevaxel och balansering 36
4.3 Cylinder 37
4.4 Vevhusventilation 39
4.5 Spegelfäste 39
4.6 Kraftöverföring och startanordning 40
4.7 Montering 40

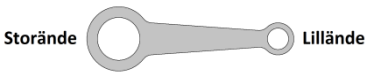
5 Utprovning 41
5.1 Dynamometer 41
5.2 Testrigg 41
6 Resultat 43
6.1 Komponenter 43
6.2 Motor 46
6.3 Provkörning 47
7 Diskussion 48
8 Slutsats 50
9 Källförteckning 50
10 Bilagor 51

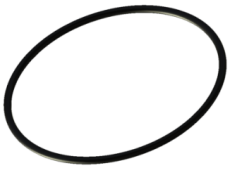
Förkortningar

BDC	Bottom Dead Center *(Sv. Undre dödläge/dödpunkt/vändpunkt)* Den punkt där kolven vänder i sitt nedersta läge.
Borrdiameter	Cylinderns och kolvens nominella diameter.
CAD	Crank Angle Degrees *(Sv. Vevaxelgrader)* Vanlig positionsangivelse för motorer. Nollpunkten definieras vanligen i TDC och räknas positiv i motorns rotationsriktning.
CAD	Computer Aided Design.
Lillände	Den ände av vevstaken där kolven sitter (och som vanligtvis är mindre).
O-ring	Tätning som består av en gummiring med cirkulärt tvärsnitt.
Slaglängd	Den vertikala sträcka som kolven färdas under en arbetstakt. Skillnaden i höjd mellan TDC och BDC.
Snabbstål	Höglegerat stål som används som verktyg vid skärande bearbetning
Storände	Den ände av vevstaken som sitter på vevaxeln (och som vanligtvis är större).
TDC	Top Dead Center *(Sv. Övre dödläge/dödpunkt/vändpunkt)* Den punkt där kolven vänder i sitt översta läge.
TIG	Tungsten Inert Gas, en svetsmetod där elektroden inte förbrukas.
Vevskinka	Motvikten på vevaxeln.

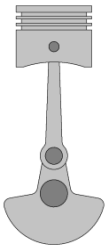












1 Inledning

Detta kapitel syftar till att ge en introduktion till projektet, dess bakgrund och utmaningar, samt en kort sammanställning av grundläggande teori inom området.

1.1 Bakgrund

Chalmers Vera Team är ett lag som tävlar i Shell Eco Marathon Europe, en tävling där studentlag från hela Europa utmanar varandra i att bygga så effektiva landgående fordon som möjligt. Under tävling körs fordonen på en avsatt bana och efter tävling mäts hur mycket energi som förbrukats. Den förbrukade energin och tillryggalagda sträckan omvandlas sedan och de tävlande lagen rangordnas efter hur långt deras fordon färdas på en energimängd motsvarande en liter bensin.

Chalmers Vera Team har sedan flera år utvecklat och konstruerat sina egna motorer och den senaste motorn benämns generation sex. Motorn är en bensindriven encylindrig fyrtaktsmotor på 46,6 cm^2. I syfte att ytterligare effektivisera motorn vill Chalmers Vera Team ha tillgång till en optikmotor för att utföra analyser av förbränningen. Detta kandidatarbete har därför som avsikt att förse Chalmers Vera Team med en optikmotor som baseras på den motor som används i tävlingsfordonet.

Anledningen till att en optikmotor är åtråvärd för teamet är för att en optikmotor ger stora möjligheter att kunna optimera motorns förbränning. Själva förbränningen i en förbränningsmotor är det mest grundläggande för dess funktion och det som till största del avgör motorns prestanda. Det är därför av stort intresse att skapa en så effektiv förbränning som möjligt med avseende på exempelvis motoreffekt, emissioner och bränsleförbrukning. Processen innehåller dock många element, exempelvis avancerad strömningsmekanik, som även var för sig är mycket komplexa och därmed svåra att beräkna och simulera. Mellan dessa olika element finns också en komplex samverkan vilket i kombination med de breda användningskrav som ställs på en modern motor gör förbränningsprocessen i sin helhet mycket komplicerad.

Optikmotorer har länge använts som ett viktigt verktyg för att angripa flera av de ovan nämnda problemen. Genom att studera den faktiska förbränningsprocessen får man definitiva svar på exempelvis hur gasblandningen rör sig i cylindern och hur flamfronten utbreder sig i förbränningsutrymmet. Optisk tillgänglighet till förbränningsrummet ger också möjlighet att kontinuerligt under själva förbränningen mäta exempelvis temperatur och partikelförekomst i olika delar av förbränningsrummet. Förutom kunskaper om en specifik motor kan en optikmotor även användas för att verifiera modeller för datorsimulering.

För att mätdata skall vara relevanta krävs att förbränningen i optikmotorn i så hög grad som möjligt överensstämmer med förbränningen i den metallmotor den skall efterlikna. Detta betyder bland annat att cylinderdiameter, slaglängd samt vevstakslängd ska vara lika. En optikmotor konstrueras vanligen med ett fönster i kolvtoppen samt en cylinder i glas. Med hjälp av höghastighetskamera möjliggörs då filmning av förbränningen i motorn. Glaset tillverkas vanligen av syntetiskt kvarts vilket har låg värmeutvidgning samt goda optiska egenskaper.

Det finns dock en del problem med konventionella optikmotorer och två av de största är att de ofta bara går att köra på låg belastning och att deras värmeledningsegenskaper ofta skiljer sig markant från de metallmotorer de skall efterlikna. Jämförbar värmeledning är förstås mycket viktigt eftersom merparten av den energi man tillsätter en förbränningsmotor går förlorad i värmeförluster. Utöver detta har temperaturen i förbränningsrummet en mycket stor inverkan på förbränningen. Eftersom en förbränningsmotor i regel är som mest effektiv omkring 75 % av det maximala effektuttaget är det också önskvärt att kunna köra en optikmotor på hög belastning.

1.2 Syfte

Syftet med projektet är att designa och tillverka en optikmotor som sedan ska kunna användas av Vera Teamet för vidareutveckling av deras egna motor. Förhoppningen är att optikmotorn ska kunna förbättra Vera Teamets egna motor markant och ge dem högre konkurrenskraft i tävlingarna. Arbetet syftar också till att skapa en kunskapsgrund och en basmotor som kan användas vid vidareutveckling och arbete med optikmotorer på Chalmers.

1.3 Uppgift

Projektgruppen har haft som uppgift att konstruera och tillverka en optikmotor. Optikmotorn ska konstrueras på ett liknande sätt som konventionella optikmotorer, vilket leder fram till följande grundläggande krav som ska uppfyllas av motorn:

- Optikmotorn ska replikera förbränningsutrymmet i Vera motorn av generation 6
- Motorn ska ha möjlighet att montera ordinarie Vera topplock
- Optisk tillgänglighet från sidan vilken ska täcka hela kolvens slaglängd, vilket motsvarar en full-längds glascylinder
- Optisk tillgänglighet genom kolv

Där möjlighet ges ska försök göras till att utveckla motorn ytterligare gentemot Chalmers AVL motor, exempelvis i fråga om materialval och design.

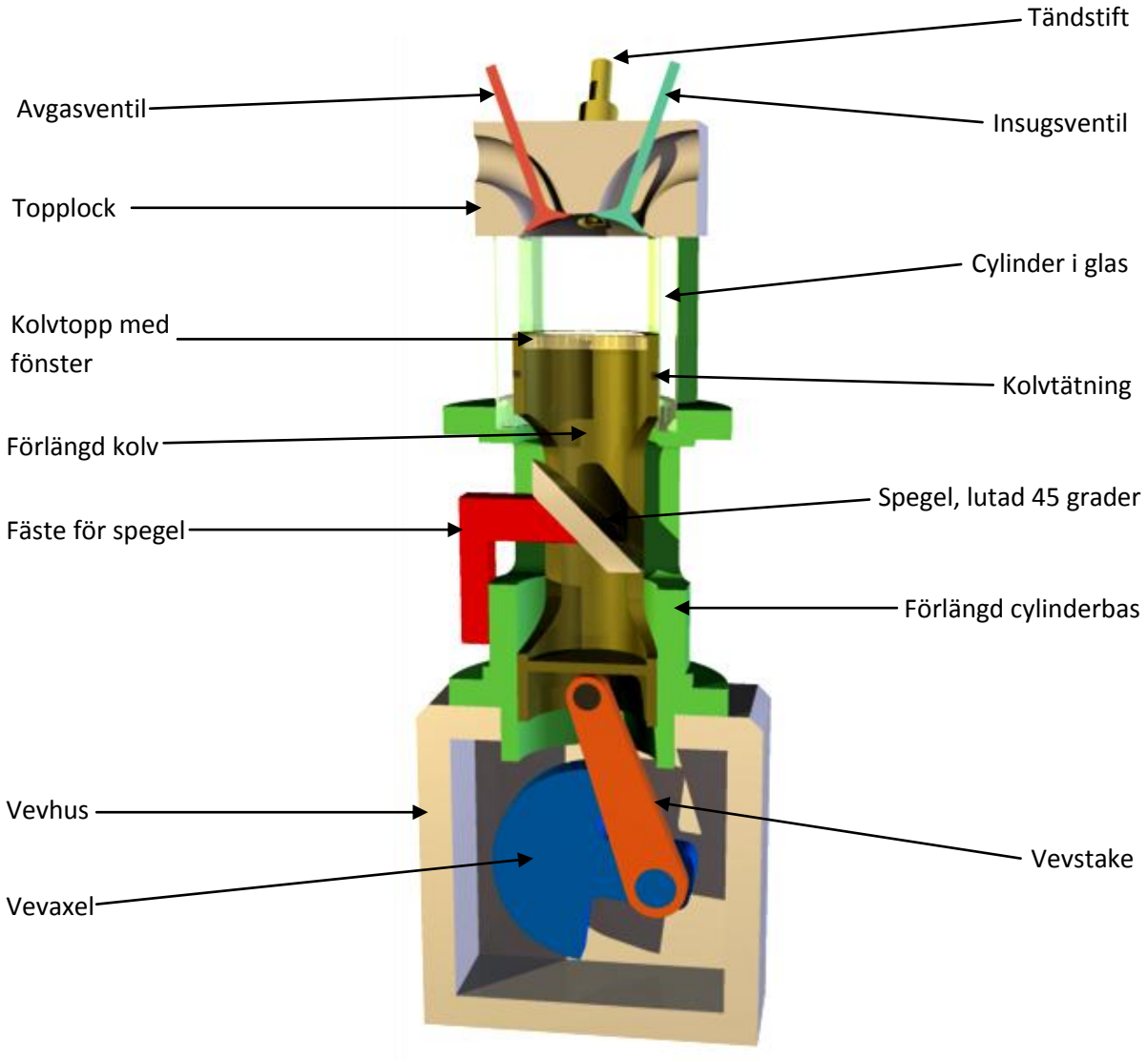
1.4 Frågeställning

Uppgiften som ska utföras har givit upphov till ett antal olika centrala frågeställningar som behöver lösas för att erhålla ett gott resultat.

- Vilket transparent material är lämpligast att använda i kolv och cylinder för att erhålla så likartade egenskaper som möjligt gentemot originalmotorn, i form av värmeöverföring och hållbarhet?
- Vilka material och vilken design ska väljas i cylinderbas och kolv för att erhålla minsta möjliga avvikelse i kompression med avseende på elastisk deformation?
- Hur ska cylinder designas för att kunna justera kompressionen?
- Hur ska kolven tätas för att vevhusolja inte ska läcka upp och smutsa ner spegeln?
- Hur ska motorn balanseras för att erhålla en så jämn gång som möjligt för att möjliggöra hög kvalitet på höghastighetsfilmningarna?
- Hur ska vevhuset ventileras för att minimera övertryck samt undertryck i vevhuset?
- Hur ska motorn riggas, startas och bromsas vid prover?
- Hur ska motorn generellt designas för att göra den tillverkningsbar i maskinprogrammets prototypverkstad, enkel att montera och enkel att arbeta med?

1.5 Optikmotorns uppbyggnad

En optikmotor är i grunden lik en konventionell optikmotor med ett vevhus där vevaxel och vevstake sitter. Motorn har sedan en kolv som löper i en cylinder och ett konventionellt topplock. De största skillnaderna ligger i cylindern och kolven, vilka måste anpassas för de optiska ändamålen.



Figur 1 - Genomskärning av en illustrerad optikmotor med full längd på glascylindern

För att skapa optisk tillgänglighet till förbränningsrummet ersätter man cylinderloppet med en glascylinder. På så vis kan man filma förbränningsrummet från sidan. Glascylinderkonstruktionen finns i olika utföranden. Tillverkaren AVL producerar en konstruktion med en kort glascylinder där man bara kan se översta delen av förbränningsrummet, ca 20mm. Andra konstruktioner, t.ex. Lotus optikmotorer, använder sig av en glascylinder som är lika lång som slaglängden vilket gör att man ser hela förbränningsrummet (Lotus Cars, 2014), i fortsättningen benämnd som full-längds cylinder. När man använder sig av en lång glascylinder behöver kolven ha en mjuk tätning som ersätter konventionella kolvringar för att inte repa glaset.

Att filma från sidan ger en god bild av strömningen genom ventilerna och det ger en viss bild av flamfronten, vilket man bland annat kan se på höghastighetsfilm filmad i Chalmers egen AVL optikmotor.

För att få en mer heltäckande bild av flamfronten kan man även filma vertikalt, och då helst från undersidan av kolven. Med hjälp av filmningen underifrån får man en tydlig bild av hur flamfronten breder ut sig över kolven och man kan upptäcka cold/ hotspots i förbränningen. För att åstadkomma detta förlänger man kolven och gör en oval öppning i sidan, en så kallad Bowditch kolv konstruktion (Hung, Chen, Xu, Yang, & Zhuang, 2013). I öppningen kan man föra in en spegel som är vinklad 45 grader. Detta i kombinaion med ett fönster i kolvtoppen gör att man får en bild av förbränningsrummet från undersidan genom att filma i sidled mot spegeln. När kolven förlängs behöver även cylindern förlängas, vilket görs med en cylinderbas som förses med öppningar och fästen för spegeln.

1.6 Teori

Målet med en optikmotor är att efterlikna den motsvarande konventionella motorns fysik i form av värmeledning, rörlig massa och kompression för att mätresultaten i optikmotorn ska kunna representera originalmotorn så bra som möjligt. På optikmotorer uppstår dock en del problem när de ska användas för analyser. Två stora problemen är att de oftast bara kan köras på låga laster samt att deras värmeledningsförmåga skiljer sig markant från originalmotorn som de ska efterlikna.

1.6.1 Värme och kvarts

Värmeledningen är mycket viktig att ta hänsyn till eftersom en stor del av den energi man tillsätter en förbränningsmotor går förlorad i värmeförluster. Dessutom har förbränningsrummets temperatur stor inverkan på förbränningen och emissionsnivåerna.

J. Kashdan och B. Thirouard har gjort en studie på hur en dieseldriven optikmotor skiljer sig mot sin originalmotor där man kan se att glasets närvaro i förbränningsrummet tydligt ändrar förbränningens karaktär (Kashdan & Thirouard, 2011) . Både cylinder och kolvfönster tillverkas ofta av kvarts, ett material som har låga värmeledningsegenskaper. Kvartz har t.ex. en ledningsförmåga som endast uppgår till 1,2% av aluminium (Kashdan & Thirouard, 2011, s. 763). Aluminium är oftast förstahandsvalet när man gör en konventionell kolv. Detta gör att yttemperaturen på en kolv med kvartsglasfönster blir högre än motsvarande aluminiumkolv. En varm kolv snabbar upp förbränningen och om den sker tillräckligt snabbt kan så kallad knackning uppstå, där gaserna antänds för tidigt och ger upphov till ett övertryck som skadar motorn.

Kvarts har låg värmeutvidgning, 0.59mm /(1000*K*m), jämfört med stål som har ca 12mm/(1000*K*m), vilket gör det relativt okänsligt för värme jämfört med många andra material och glastyper (Wikipedia, 2014). Problemet är dock att kvarts leder värmen så dåligt att det skapas en spänningsgradient från insidan av en glascylinder, vilket gör att glaset kan spricka (Johansson, 2014). Därför är en tunnväggig cylinder fördelaktig mot värme då den är mindre känslig mot expansion, men en tjockväggig cylinder klarar högre cylindertryck. I vissa fall begränsas cylinderns ytterdiameter av topplocksbultarna, vars placering styrs av hålmönstret i det topplock som ska testas. Speciella topplock enbart för optikmotordrift kan dock tillverkas med en annan hålbild om ekonomin tillåter, men man förlorar möjligheten att kunna testa ett ordinarie topplock som ska användas till drift.

En metod för att minska värmeproblemen är att använda sig av skip firing (Kashdan & Thirouard, 2011). Metoden går ut på att man stänger av motorn vid vissa cykler för att låta den svalna, för att sedan återuppta förbränningen. Exempelvis kan man låta motorn tända fem cykler i rad, varpå gnista och bränsle uteblir i fem cykler i rad för att kyla.

1.6.2 Elastisk deformation

Ett ytterligare problem som uppstår i en optikmotor är att kolven komprimeras mer jämfört med en standardkolv då en optikkolv är relativt lång och får låg styvhet p.g.a. sidoöppningarna. När kolven komprimeras minskar kompressionen i förbränningsrummet och förbränningen avviker från den önskade (Kashdan & Thirouard, 2011). Därav är det av största vikt att göra cylindern och kolven så styva som möjligt för att avhjälpa detta problem. Kolven kommer oundvikligen att komprimeras mer än önskat p.g.a. dess ökade längd vilket gör att det är viktigt med möjlighet att kunna justera kompressionen i motorn för att kunna kompensera för de oundvikliga avvikelserna.

1.6.3 Balansering

På grund av krafter som uppstår under förbränningen samt att motorns rörliga delar ger upphov till tröghetskrafter när de är i rörelse uppstår alltid vibrationer under drift.

En optikmotorkolv av Bowditch-typ är som regel betydligt tyngre än en konventionell kolv och då tröghetskraft är en funktion av acceleration och massa ställs högre krav på balanseringen för att uppnå en mjukgående motor. Den tyngre kolven ställer även större hållfasthetskrav på främst kolvbult, vevstake, vevstaksbult och vevaxel, vilket i regel leder till högre massa även på dessa komponenter. Därmed skapas ytterligare obalans som under drift orsaker vibrationer.

För att ge så goda förutsättningar som möjligt för höghastighetsfilmning är det önskvärt att minimera dessa vibrationer. Enligt grundläggande fysiska lagar kan en kraft alltid balanseras ut genom att introducera en kraft som är lika stor, men motriktad. På så vis är det möjligt att genom olika konstruktioner aktivt dämpa oönskade vibrationer och i vissa fall helt balansera ut dem.

Av ovanstående framgår även att det är önskvärt att minimera massan på de rörliga komponenterna, då detta minskar behovet av balansering. Detta kan motivera val av mer kostsamma material till exempelvis kolven.

1.6.4 Belastning

Förbränningsmotorer är i regel effektivast vid ca 75% belastning, vilket gör att en optikmotor som endast tål låga laster blir en begränsning. Därav är det mycket önskvärt att kunna konstruera en optikmotor som klarar full belastning. En tydlig trend på senare tid inom motorbranschen har varit så kallad downsizing. Downsizing går ut på att man minskar motorns storlek och låter den arbeta hårdare för att få ut samma effekt som en större motor. På så vis får man en effektivare motor som arbetar närmare 75% av sin kapacitet. Därav blir det allt viktigare med optikmotorer som klarar av att efterlikna dessa förhållanden. IFPEN uppger att deras optikmotorer klarar upp mot 150 bar, vilket i teorin möjliggör full last på motorn (Optical Diagnostics, 2014). Detta begränsas dock av värmen som utvecklas och isoleras av kvartsglaset. Vid för hög värme riskerar kolvtätningen att smälta, glaset att explodera samt motorn spika.

1.7 Avgränsningar

Projektet har genomförts under vårterminen 2014 som ett kandidatarbete om 15 högskolepoäng. Endast begränsad optimering har utförts på grund av projektets stora omfattning och begränsade tid. De känsligaste komponenterna har analyserats medan övriga komponenter kommer att överdimensioneras enligt ingenjörsmässiga antaganden. Fokus har lagts på att få motorn att fungera under första halvan av terminen för att ge rum för testning av motorn under andra halvan av terminen.

Utvecklandet av optikmotorn har inte omfattat topplocket och dess olika komponenter. Motorn ska endast användas för stationär drift i testrigg och därför har ingen hänsyn tagits till fordonet som originalmotorn används i. Därav är inte motorns vikt eller yttre dimensioner av betydelse.

Några faktiska förbränningsanalyser förväntas inte genomföras. Projektets fokus har legat på att ta fram en fungerande motor som kan användas för analyser i framtiden.

2 Metod

Detta kapitel avhandlar metoder som använts under konstruktion, tillverkning och testning. I efterföljande kapitel beskrivs konstruktionförloppet, tillverkning och utprovning i detalj.

2.1 Förstudie

Projektgruppen besatt sedan tidigare goda kunskaper om förbränningsmotorer. Däremot saknades helt erfarenhet av optikmotorer. För att skapa en kunskapsgrund om optikmotorer genomfördes därför en förstudie.

2.1.1 Litteratur

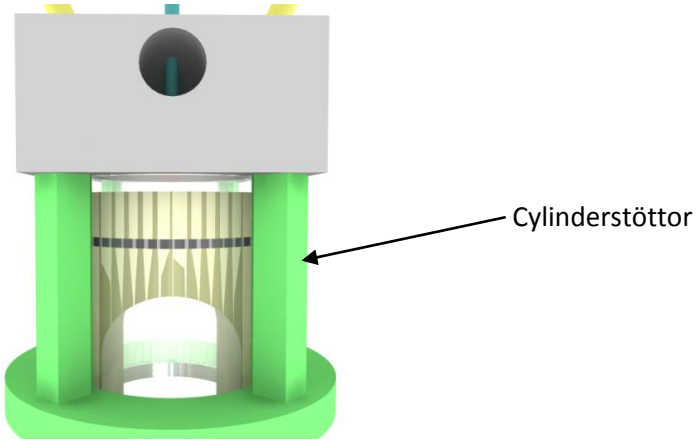
Projektgruppens handledare tillhandahöll en avhandling av Kashdan och Thiourard som gjort en ingående studie på deras dieseldrivna optikmotor (Kashdan & Thirouard, 2011). De har gjort omfattande tester som visar avvikelser i kompression, materialegenskapernas inverkan, bränsleinverkan med mera vilket varit till stor nytta för att spaka en teoretisk kunskapsgrund om problematiken med optikmotorer. Konstruktionsmässig information var dock begränsad till enkla beskrivningar och illustrationer.

2.1.2 Referenser

För att hitta referenser att ha som jämförelse vid den kommande designprocessen gjordes en sökning efter tillverkare av optikmotorer. Resultatet av sökning var att det finns ytterst få tillverkare. De två tillverkarna som hittats var AVL, som levererat Chalmers optikmotor, samt Lotus. Det förekommer även vissa fordons- och motortillverkare som har tagit fram sina egna optikmotorer för eget bruk. Slutsatsen av sökningen blev att tillgänglig information om optikmotorer var låg och att det fanns få som faktiskt tillverkar dessa. En trend som visat sig bland optikmotorer som hittats var att i princip alla använder Bowditch-kolven i sin konstruktion.

2.1.3 Studiebesök hos förbränningsavdelningen

För att få bättre förståelse för optikmotorns uppbyggnad fick projektgruppen göra ett studiebesök och ställa frågor till en av operatörerna av förbränningsavdelningens AVL optikmotor. Från AVL motorn kunde mycket inspiration hämtas inför konstruktionen av en ny optikmotor. Operatören De Benito berättade bland annat att glascylindern måste limmas mot topplocket och kontakt mot cylinderbasen av metall måste elimineras med hjälp av t.ex. o-ringar, för att minimera sprickinitiering (De Benito Sienes, 2014). Stöttor, eller hylsor, sitter kring topplocksskruvarna mellan topplock och cylinderbas för att ta upp all last, varpå glascylindern blir helt obelastad och hålls endast på plats av o-ringen i botten och limmet mot topplocket. I AVL-motorn används kvartsglas i både cylinder och kolvfönster.



Figur 2 - Illustrering av stöttor i en optikmotor

AVL motorn använder Bowditch-designen på kolven för att möjliggöra filmning genom kolven. AVL motorn använder sig även av dubbla motriktade balansaxlar för att uppnå bästa möjliga balansering. Balansaxlarna är monterade externt utanför vevhuset och drivs av en dubbeltandad kuggrem.

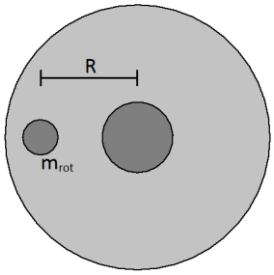
2.1.4 Balansering

Då balansering är en viktig del av optikmotorns funktion för att erhålla goda resultat vid filmning gjordes en undersökning av litteratur för att skapa kunskap om området. Litteratur som använts till förstudien var kompendiet Piston Engine Mechanics (Denbratt & Andersson, 1999).

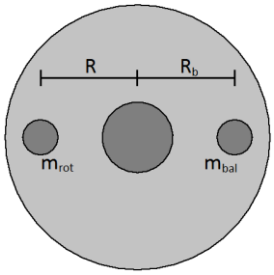
På grund av krafter som uppstår under förbränningen samt att motorns rörliga delar ger upphov till tröghetskrafter när de är i rörelse uppstår alltid vibrationer under drift i en förbränningsmotor. Tröghetskrafterna är en funktion av acceleration och massa hos det objekt som accelereras och kan delas in i två kategorier; roterande och oscillerande.

2.1.4.1 Roterande krafter

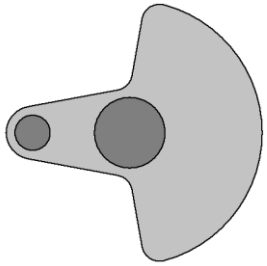
Vevaxeln, vevstaksbulten och vevstakens storände utför en rent roterande rörelse kring vevaxelns rotationscentrum och ger då upphov till roterande tröghetskrafter. Principen för balansering av de roterande krafterna förklaras kortfattat nedan.



Figur 3



Figur 4

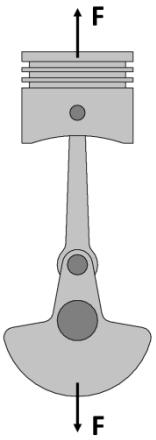


Figur 5

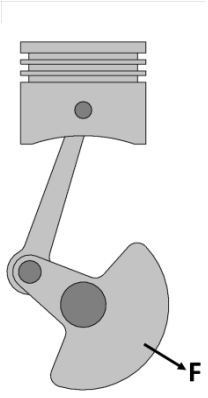
I Figur 3 illustreras vevaxeln som en cylindrisk skiva och den roterande obalansen som orsakas av vevstaksbult och vevstakens storände representeras av den excentriskt placerade massan m_{rot}. Obalansen (centrifugalkraften) kan då beräknas som $m_{rot}\omega^2 R$, där ω är rotationshastigheten och R är avståndet mellan vevaxelns rotationscentrum och massan m_{rot} (halva motorns slaglängd). För att motverka obalansen kan en massa placeras på motstående sida rotationsaxeln, vilket illustreras i Figur 4 med den balanserande massan m_{bal} på avståndet R_b från vevaxelns rotationscentrum. Balans uppnås då $m_{rot}\omega^2 R = m_{bal}\omega^2 R_b$ vilket, eftersom ω är densamma för de båda massorna, kan förkortas till $m_{rot}R = m_{bal}R_b$. Ur formlerna kan utläsas att det är önskvärt att minimera massan på de roterande delarna, då detta ger upphov till lägre krafter. Istället för att addera massa på den lättare sidan av vevaxeln är det därför vanligare att istället ta bort massa på den tyngre sidan, vilket ger den för vevaxlar karakteristiska formen som illustreras i Figur 5.

2.1.4.2 Oscillerande krafter

Kolv, kolvringar, kolvbult och vevstakens lillände utför en rent translaterande rörelse upp och ner i cylindern och ger då upphov till oscillerande tröghetskrafter. Vid TDC eller BDC kan dessa krafter balanseras ut med hjälp av motvikt på vevaxeln enligt Figur 6**.**



Figur 6



Figur 7

Figur 6 visar kolven i TDC. Den oscillerande massan ger upphov till en vertikal kraft F som kan balanseras ut med hjälp av motvikt på vevaxeln. På grund av att vevstaken inte är upprätt under vevaxelns rotation är kolvens hastighetsförändring dock inte likformig för den övre och undre halvan av rotationen (TDC ±90° respektive BDC ±90°). Då hastighetsförändringen, och därmed tröghetskraften är större vid TDC än vid BDC är det inte möjligt att fullständigt balansera den oscillerande kraften enbart med motvikt på vevaxeln.

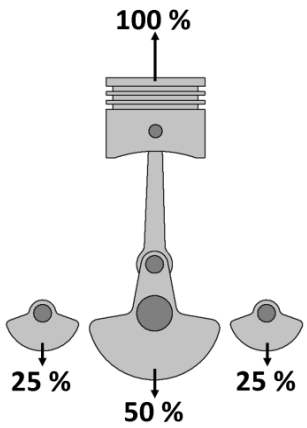
Figur 7 visar den punkt där kolven uppnått sin maximala hastighet. Då kolvens acceleration är noll följer att även dess tröghetskraft är lika med noll. Den excentriska massan på vevaxeln kommer emellertid att ge upphov till en utåtriktad kraft (centrifugalkraft) under hela rotationen. Att addera vikt på vevaxeln för att motverka den oscillerande obalansen kommer således samtidigt att ge ökad roterande obalans.

2.1.4.3 Balansfaktor

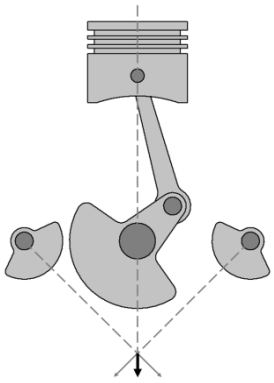
En motor som enbart balanseras med hjälp av motvikt på vevaxeln kommer i enlighet med ovanstående tvinga fram en kompromiss vad gäller vibrationer. Balansfaktor är ett tekniskt begrepp för att beskriva denna kompromiss.

Om motorn endast balanseras med avseende på de roterande krafterna och de oscillerande lämnas obalanserade sägs motorn ha balansfaktor 0. Motsatsen med helt dämpade oscillerande vibrationer, men istället stor roterande obalans, benämns balansfaktor 1 (100 %). Balansfaktor 0,5 innebär således att de oscillerande krafterna dämpas med 50 %, men att de ersätts med roterande obalans.

2.1.4.4 Balansaxlar



Figur 8



Figur 9

Figur 8 och Figur 9 visar principen för hur balansaxlar kan användas för att balansera oscillerande vibrationer. I Figur 8 illustreras hur den totala balanseringsvikten kan delas upp mellan balansaxlar och vevaxel. Genom symmetrisk placering kring vevaxeln samt att en balansaxel roterar medurs och den andra moturs kommer verkningslinjerna för balansaxlarnas centrifugalkraft alltid att skära varandra i en punkt som ligger på den oscillerande kraftens verkningslinje (förutom i TDC och BDC), vilket illustreras i Figur 9. På så vis kommer deras vertikala komposanter alltid att adderas för att motverka kolvens oscillerande kraft, medan deras horisontella komposanter alltid tar ut varandra.

2.2 Projektfaser

Efter förstudien inleddes planeringen av projektet. En arbetsstrategi valdes för att definiera hur projektet skulle genomföras. Lämpligast för detta projekt ansågs den etablerade principen "design-build-test", vilken är en grundläggande metod i CDIO-inspirerade ingenjörsutbildningar (Malmqvist, Young, Hallström, Kuttenkeuler, & Svensson, 2004). Genom att designa, tillverka och testa produkten kan man skapa ett koncept och sedan utvärdera det för att nå fram till ett tydligt resultat. Således delas projektet upp i tre huvudfaser:

- Design
- Tillverkning
- Provning

Då en förbränningsmotor, och särskilt en optikmotor, är en avancerad konstruktion ansåg projektgruppen att det var viktigt att ta fram en prototyp och utvärdera. Därför har projektgruppen lagt stor fokus på att producera en motor till mitten av andra läsperioden för att få utrymme för testning. På grund av motorns komplexitet är det svårt att beräkna och designa en felfri produkt, utan praktiska prov får utvisa resultatet och eventuella åtgärder implementeras för att säkerställa att produkten blir funktionsduglig.

2.3 Delkomponenter

Konstruktionen av optikmotorn inleddes med att dela upp motorn i delkomponenter. En förbränningsmotor av ottotyp består av ett antal olika standardiserade huvuddelar. För att hantera projektet och dela upp arbetsbördan bröts därför optikmotorn ned i dessa delkomponenter/ delområden och gruppdeltagarna tilldelades varsitt område att ansvara över genom hela framställningsprocessen. Motorn bröts ned till följande komponenter:

- Cylinder
- Kamremspänning
- Kolv
- Vevhus
- Vevparti och balansering
- Vevhusventilation
- Kringutrustning

Varje gruppmedlem fick som ansvar att konstruera och tillverka de komponenter som ingår i det delområde som medlemmen fick tilldelad.

2.4 Tillverkningsbarhet

För att tillverka en prototyp av motorn fanns maskinprogrammets prototypverkstad till hands. Där fanns resurser så som fräs, svarv, svets samt plåtbearbetningsutrustning. För att prototypen skulle vara möjlig att tillverka behövde delarna anpassas till verkstadens maskiner. För att underlätta tillverkningen var det även viktigt att göra komponenterna så enkla som möjligt.

Vissa komponenter som krävdes för att tillverka motorn kunde inte tillverkas i prototypverkstaden. Komponenter som fästelement, tätningar och alla delar av glas var tvungna att beställas av externa tillverkare.

2.5 Generellt om tillverkningsmaterial

Till de komponenter som skulle tillverkas behövde materialval göras. Enligt krav och begränsningar behövde inte vikt på stationära komponenter beaktas vilket öppnade upp för möjligheten att använda exempelvis stål, där aluminium normalt hade varit ett förstahandval p.g.a. viktbesparing. Generellt valdes att använda de vanligast förekommande metallerna för maskinkomponenter, aluminium samt stål, då dessa är enkla att införskaffa och bearbeta. Aluminium valdes till komponenter som inte behövde särskild styrka, vilket gör dessa lättbearbetade. Där högre krav ställdes på styrka och styvhet valdes stål. Även andra material förekom vid behov. Se kapitel 0, s. 15 för mer ingående information om materialval.

2.6 Designmetod

I följande text redogörs för generella metoder, strategier och koncept vilka används för att skapa en modell av optikmotorn. Kapitlet följs sedan av en detaljerad beskrivning av konstruktionsförloppet.

2.6.1 Uppbyggnad

Motorn som skulle konstrueras var tvungen att följa de ställda kraven i uppgiftsformuleringen, replikering av Vera motorns förbränningsrum, kompatibel med ordinarie topplock, insyn från sidan samt insyn genom kolven. Utifrån dessa kriterier kunde ett grundkoncept väljas. Gruppen valde att se till en beprövad konstruktion, anpassa den till Vera motorn och eventuellt utveckla designen istället för att lägga tid på att ta fram en helt egen design. Detta beslut motiverades med den givna tidsramen då en grundläggande konceptgenerering ansågs ta för mycket tid. Därför kom optikmotorn att baseras på Bowditch-designen tillsammans med en glascylinder vilket blev optikmotorns grundkoncept.

2.6.1.1 Specifikationer av konstruktion

Med en bestämd grundkonstruktion kunde specifikationer för motorn definieras till följande. Motorn bör ha:

- En glascylinder i full längd
- En kolv av Bowditch-design eller liknande
- En cylinderbas att montera glascylinder och spegel på och som ger insyn till spegeln
- Ett gränsnitt som passar mot Veras topplock med en kvadratisk hålbild på 40x40mm
- En cylinderdiameter på 39mm, givet från Vera motorn
- En slaglängd på 39mm, givet från Vera motorn
- En vevstakslängd på 80mm, givet från Vera motorn

2.6.1.2 Alternativa koncept

Alternativa lösningar utvärderades för att finna alternativ till de koncept som hittats. Ett alternativ till att använda Bowditch-kolv och vinklad spegel skulle kunna vara att montera en kamera inuti kolven. Denna variant valdes dock bort p.g.a. att man då inte kan utföra lasermätningar, kolven blir tung av kamerans vikt och det blir en större utmaning att hitta en lämplig kamera samt installera denna i kolven

Några alternativ till att använda sig av en glascylinder för att erhålla full insyn från sidan kunde inte hittas. Att exempelvis göra sektioner av cylinder i glas och metall ansågs vara olämpligt på grund av ökad komplexitet, expansionsproblemen som uppstår och tillverkningsproblem.

2.6.2 Specialkomponenter

För att kunna konstruera motorn behövdes kännedom om de komponenter som inte skulle tillverkas av gruppen själva. Ett flertal av komponenterna som krävdes för att montera samman optikmotorn behövde beställas från externa leverantörer som hade fler resurser än vad som fanns att tillgå i prototyplabbet. Standardkomponenter som skruvar och brickor var enkla att få fram medan specialkomponenter beställdes av specialiserade tillverkare.

2.6.2.1 Glaskomponenter

Inga av glaskomponenterna kunde tillverkas internt och behövde därför beställas. Glaskomponenterna det rörde sig om var fönstret till glaskolven samt glascylindern. Därför behövde leverantörer och komponenter hittas för att kunna anpassa de hemtillverkade delarna.

2.6.2.2 Kolvringar

Eftersom motorn blev försedd med en glascylinder behövdes speciella kolvringar då konventionella kolvringar i metall skulle ha repat glaset. En utmaning blev då att finna en kolvring som klarade både tryck, värme samt den höga hastighet och frekvens som kolven rörde sig med utan att den repade glaset.

2.6.2.3 Spegel

Ytterligare en komponent som måste köpas in var spegeln. Spegeln behövde ha väldigt god optisk kvalité och en geometri som ryms inuti kolven.

2.6.2.4 Arbetsstruktur

Arbetet med specialkomponenter strukturerades upp på samma sätt som i design. Det betydde att om en specialkomponent ingick i ett område så blev den områdesansvariga ansvarig för att ta fram en leverantör och beställa komponenten.

2.6.3 CAD-metod

För att framställa en motorkonstruktion användes en CAD-programvara, Autodesk Inventor. Med hjälp av CAD kunde hela konstruktionen framställas digitalt och utvärderas innan själva tillverkningen inleddes.

Konstruktionsprocessen påbörjades trots frånvaron av olika kända specialkomponenter som glascylinder och tätningar då CAD-modellen kunde anpassas i ett senare stadie av konstruktionsprocessen. CAD-arbetet genomfördes med hjälp av en iterativ process. Då projektgruppen saknade kunskap om CAD-metoder valde gruppen att följa handledarens råd om att använda sig av en iterativ process. Med en iterativ process menas att man skapar alla delar var för sig, monterar dessa, finner problem som måste lösas och åtgärdar dem. Man upprepar sedan processen tills modellen passar ihop och anses uppfylla ställda krav.

I första steget av CAD-processen skapades ett grovt utkast på motorkonstruktionens delkomponenter, varpå delarna monterades ihop i en assembly och utvärderades av gruppen. Nödvändiga förändringar och effektiviseringar gjordes sedan av ägaren av respektive delkomponent. Sedan assemblerades komponenterna åter och en ny utvärdering genomfördes. På så vis kunde gruppmedlemmarna effektivt arbeta individuellt med sina komponenter. Itereringarna fortsatte tills en funktionsduglig lösning av hela konstruktionen hade uppnåtts. Målen för itereringarna var att alla interface mellan komponenterna skulle matcha samt att kolv och cylinder fick minsta möjliga höjd för att minimera kolvens vikt.

Totalt genomfördes sju itereringar innan alla problem med modellen var lösta. I det femte steget lades fästelement in. Fästelementen är strategiskt viktigt då man enkelt kan sammanställa vad som behöver inhandlas, samt att de tillverkade komponenterna behöver anpassas efter standardiserade fästelement. Vid den sista itereringen skulle alla komponenter, inklusive fästelement och specialkomponenter vara infogade.

2.7 Tillverkningsmetod

För att kunna provköra och leverera en färdig optikmotor behövde denna tillverkas. För att tillverka motorn användes maskinprogrammets prototypverkstad. I denna verkstad fanns maskiner i form av fräsar, svarvar, svetsutrustning samt plåtbearbetningsutrustning till hands för att framställa de komponenter som projektgruppen planerat att tillverka själva. Mer om hur själva tillverkningsprocessen gått till kan ses under kapitel 0, s. 35.

2.8 Provkörning och utvärdering

För att testa motorns funktion och utvärdera denna behövde provkörningar genomföras. Dessa ämnades genomföras med hjälp av utrustning som tillhandahölls av förbränningsavdelningen. Utrustningen som behövdes var en dynamometer och en testrigg att montera motorn på. Testerna skulle sedan utföras i en av förbränningsavdelningens testceller. Mer om provkörningens genomförande kan ses under kapitel 0, s. 40.

3 Konstruktion

I detta kapitel beskrivs hur konstruktionen av de olika komponenterna har gått till väga i detalj.

3.1 Kolv

Kolven är en av de viktigaste komponenterna för optikmotorns specifika funktion, att observera förbränningen från undersidan. Optikmotorns kolv ställer vissa speciella hållfastheskrav då den måste vara avsevärt mycket längre än en konventionell kolv samt att den måste tillåta att man filmar genom kolvtoppen underifrån. För att konstruera kolven användes Bowditch-designen som utgångspunkt. Kolvkroppen tillverkas av metall och kolvtoppen förses med ett glasfönster för att erhålla optisk tillgänglighet till förbränningsrummet.

3.1.1 Temperatur

Under förbränningen uppgår temperaturen på gaserna i förbränningsrummet till ca 350 grader Celsius. Detta medför även att komponenter i kontakt med förbränningen efter en tid uppnår höga temperaturer. En avgörande faktor för förbränningens karaktäristik är temperaturen i de ytor som har kontakt med det bränsle som skall förbrännas. I en konventionell motor leds värmen bort förhållandevis snabbt genom cylinder, kolv och topplock. I optikmotorns fall begränsas denna värmetransport på grund av glaset i kolvtoppen som har mycket låg värmeledningsförmåga jämfört med det aluminium som ofta används till kolvar. Problemet med ytorna i förbränningsrummet med lägre värmeledningsförmåga är att de får en högre yttemperatur. Ökad yttemperatur i förbränningsrummet leder till vissa oönskade effekter, bland annat knackningar (Johansson, 2014). Därav var det önskvärt att finna ett annat material än det kvarts som ofta används till optikmotorkolvar.

3.1.2 Glasfönster

Glaset i kolvtoppen behövde kunna hantera de höga tryck och temperaturer som uppstår vid förbränning samt ha så god ljusgenomsläppning som möjligt. AVL använder sig av ett kolvtoppsglas tillverkat av syntetisk kvarts (De Benito Sienes, 2014). Kvarts var ett alternativ när kolvtoppsglaset skulle designas men på grund av dess låga värmeledningsförmåga ville projektgruppen utvärdera andra alternativ. Ett av de få material med bättre egenskaper som kunde finnas på marknaden var safirglas, en transparent keram som framställs av syntetisk safir bestående av aluminiumoxid (Edmund Optics, 2014). Safirglas var både starkt och hade optiska egenskaper från UV till mitten av IR-spektrat enligt Edmund Optics. Dessutom hade safirglaset en värmeledningskapacitet på 35-40 W/(m*K) (jämför med kvarts 1,5 W/(m*K) och gjutjärn 27-46 W/(m*K)) (Optical Diagnostics, 2014). Safirglas hade även fördelen att det är mycket reptåligt på grund av dess hårdhet. Då safir föreföll som ett mycket lockande alternativ till kvarts söktes det efter leverantörer. Förfrågan skickades till ett flertal företag, där danska Mirit Glas visade sig kunna leverera den bästa lösningen.

3.1.3 Geometriska krav

Kolvens geometri måste tillåta att förbränningen kan filmas underifrån. Detta innebar att kolven måste vara ihålig och med en innerdiameter som tillåter montering av en spegel genom vilken man filmar. Observationshålet i kolvtoppen skulle vara så stort som möjligt för att ge största möjliga observationsfält av förbränningsrummet.

3.1.4 Tätning

Kolven har som uppgift att absorbera energin i de expanderande gaserna i förbränningsrummet för att omvandla denna energi till rörelseenergi. Därför måste kolven och cylindern sluta tätt för att

denna expanderande gas inte ska läcka. I konventionella kolvar används kolvringar av metall. Detta var dock inget alternativ då optikmotorns cylinder skulle tillverkas av glas och kolvringar i metall hade repat glaset. Därför söktes alternativa lösningar till tätningar. På marknaden förekom olika varianter av teflontätningar som används till hydraulcylindrar och liknande. En leverantör, Trelleborg AB, kontaktades för rådfrågning varpå det visade sig att trelleborg kunde leverera en kolvring av teflon som skulle passa i den önskade applikationen. Det visade sig finnas två sorters tätningar, en med en tätningsring med en bakomliggande O-ring, samt en solid tätningsring. Båda tätningar visade sig klara de uppskattade temperaturer som skulle uppstå samt kolvens maximala hastighet i cylindern. Dock uppstod poblem i och med att kolven vänder riktning under sin cykel vilket ger upphov till en frekvens. Tätningslösningen med O-ring klarade inte av frekvensen som uppstod vid maximalt varvtal på 6000 varv/min som optikmotorn skulle klara. Däremot klarade den solida ringen frekvenskravet varpå denna valdes.

Utöver tätningen mot glascylindern behövdes även en tätning på kolvens nederdel för att inte olja skulle tryckas upp från vevhuset. Då kolvens nederdel skulle löpa i en metallcylinder valdes att använda en vanlig kolvring av metall, en så kallad skrapring, för att åstadkomma denna tätning. En teflonring hade troligen slitits ut i förtid då ytjämnheten på en metallcylindern är lägre än hos en glascylinder.

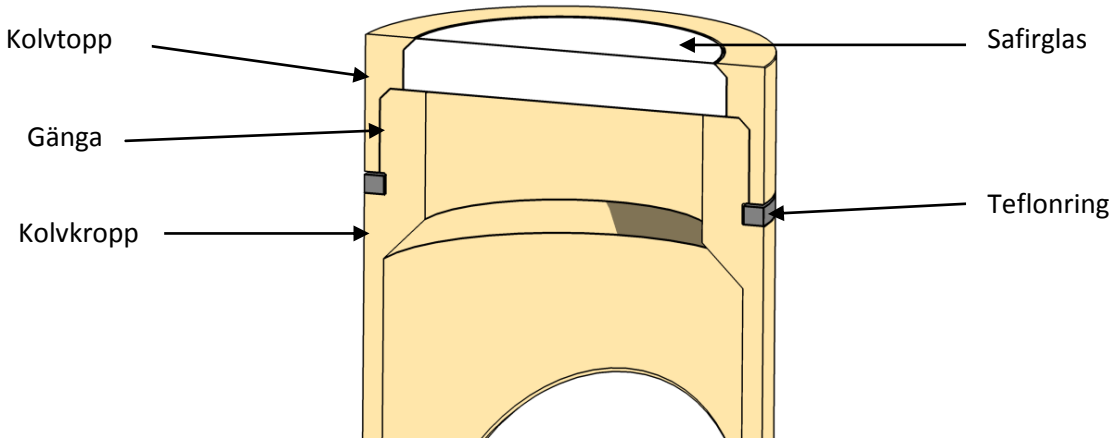
3.1.5 Materialval

Kolvkroppens komplicerade geometri begränsar valet av material. Förutom de geometriska kraven måste kolven dimensioneras för att minimera elastisk deformation samt minimera massa. De material som granskades var aluminiumlegering 70/75, stållegering CrMo och titanlegering GR5. Det beslutades att titanlegeringen var det bästa alternativet baserat på styvhet/massa vilket gjorde att den önskade geometrin kunde följas utan för stor elastisk deformation. Ytterligare en faktor som påverkade beslutet att använda titan var dess värmeledningsförmåga och värmeexpansion. Titans temperaturegenskaper liknar de av safir vid utvidgning (Coefficient of Linerar Thermal Expansion) . Detta medför likartad värmeexpansion över hela kolvtoppen vilket minimerade risken för spänningar mellan glaset och övriga kolven.

3.1.6 Uppbyggnad

För att konstruera kolvens kropp utvärderades olika alternativ. Ett första alternativ var att svarva kolvkroppen ur ett stycke, för att sedan gänga dit kolvtoppen vilken spänner fast glaset. Denna metod valdes dock bort då den invändiga svarvningen hade blivit väldigt krävande. Istället valdes att använda samma koncept, men med en separat kolvbotten där kolvbotten görs i ett stycke och svetsas fast på övriga kolvkroppen.

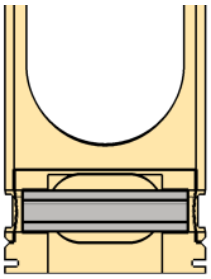
På kolvbotten gjordes ett kolvringspår för kolvringen som skulle täta mot nederdelen av cylindern. Till den övre kolvringen gjordes ett spår mellan den pågängade kolvtoppen och kolvkroppen, vilket gjorde att man skulle kunna trä på och av kolvringen utan att töja denna när kolvtoppen skruvats av. Kolvtoppen skulle även ha som uppgift att spänna fast glaset. Glasets undersida var tänkt att vila på kolvkroppens överdel, och en ring med 45-graders kant i kolvtoppen skulle sedan trycka på glasets ovansida och pressa fast det.



Figur 10 - Genomskärning av kolvens överdel

Då kolvringen som köptes från Trelleborg AB hade lågt radiellt mått kunde dess spår göras grunt, varpå innerdiametern kunde göras 27mm i diameter.

Underdelen av kolven designades så den kunde pressas in i kolvkroppen och sedan svetsas runt om. Detta möjliggjorde att den invändiga svarvningen kunde göras från båda hållen.



Figur 11 - Genomskärning av nederdelen av kolven

På kolvkroppens sidor behövde två ovala öppningar för spegeln designas. Dessa behövde dels vara så stora som möjligt för att möjliggöra bästa insynsmöjligheter, men samtidigt så små som möjligt för att inte göra kolvkroppen vek. Slutligen bestämdes att öppningarna gjordes med en diameter på 30mm. Längden på de ovala öppningarna behövde vara lika långa som slaglängden från centrum till centrum av ändradierna, det vill säga 39mm.

3.2 Vevhus, vevaxel och balansering

Då vevparti, vevhus och balansaxlar är mycket tätt sammankopplade beslutades redan vid ett tidigt skede att de skulle vara ett gemensamt ansvarsområde. Under hela utvecklingsfasen konstruerades dessa olika komponenter parallellt. För bilder på vevhuset och övriga delar, se kapitel 6.1.2, s. 43.

3.2.1 Vevhus

Vevhusets främsta funktioner är att innesluta vevaxeln samt mellan- och balansaxlar, fixera de lagringar som krävs för axlarnas rotation, fungera som bas för cylindern samt innesluta den olja som krävs för smörjning och kylning av lager och mekaniska kontaktpunkter som till exempel kuggflanker.

Vevhusets inre bredd och höjd begränsas främst av det utrymme som krävs för vevaxel, de båda balansaxlarna samt deras mellanaxlar. Samtliga dessa komponenter konstruerades parallellt med varandra för att underlätta arbetet.

Djupet på vevhuset bestämdes utifrån storleken på cylinderbasen, för att kunna ge maximal stödyta åt cylindern. Slutligen fastställdes yttermåtten genom önskad godstjocklek i väggarna, antingen för att ge tillräckligt med material kring skruvhål, tillräckligt gängdjup i skruvhål, eller tillräckligt djup för inpressning av lagerelement.

Botten av vevhuset V-formades med den lägsta punkten i mitten, direkt under vevaxeln för att rymma motorolja. Här placerades även en avtappningsplugg för att enkelt kunna tömma vevhuset på olja vid service. På vevhusets ovansida placerades även en plugg för påfyllning av olja. I täckplåten sitter ett synglas monterat för att okulärt kunna avläsa oljenivå och bedöma oljans föroreningsgrad.

Då stora mängder gods skulle fräsas bort för att bilda de utrymmen i vilka vevaxel, balansaxlar och lagringselement skulle monteras valdes aluminium som konstruktionsmaterial, då det har mycket god bearbetbarhet och skulle tillåta en mindre tidskrävande tillverkningsprocess än exempelvis stål. Aluminium behöver inte heller ytbehandlas för att motstå korrosion.

3.2.2 Vevparti och balansaxlar

Då motorns förbränningsegenskaper syftar till att efterlikna den befintliga Vera-motorn i så stor utsträckning som möjligt valdes vid ett tidigt skede att låsa vissa parametrar, exempelvis borrdiameter och slaglängd. Då slaglängden styrs av vevaxeln är det en av de viktigaste parametrarna för vevaxelns konstruktion. Även vevstakens längd valdes att vara identisk med Vera-motorn, då förhållandet mellan vevstakens längd och slaglängden påverkar kolvens rörelse och därmed har inverkan på förbränningsförloppet. Vevstakens längd är tillsammans med slaglängden avgörande för hur stor vevaxelns ytterdiameter kan vara utan att riskera kontakt mellan vevaxel och kolv vid den nedåtgående rörelsen. Utifrån dessa premisser kunde maximalt tillåten ytterdiameter på vevaxeln bestämmas till 80 mm. I enlighet med Vera-motorn, samt för att underlätta tillverkningen valdes en lösning där vevaxeln endast är lagrad i en ände och endast har en motvikt. Detta begränsar längden på vevaxeln, på så vis att den inte kan utnyttja hela djupet i vevhuset. Då balansaxlarna inte delar denna begränsning, utan kan utnyttja hela vevhusets djup, bedömdes att deras ytterdiameter kunde göras betydligt mindre än vevaxelns, men ändå ha tillräcklig excentrisk massa. Balansaxlarnas maximala yttermått sattes till halva vevaxelns maximala yttermått; det vill säga 40 mm.

Såväl vevaxel som balansaxlar fixeras radiellt genom presspassning i vevhusets lager. Även axiell låsning av axlarna är nödvändig, för att säkerställa att de ej glider ur lagringarnas innerringar, med haveri som följd. Vevaxeln låses med hjälp av bricka och mutter i änden på axeltappen. På så vis sätts vevaxeldrevet samt svänghjulet via en bricka i press mot vevaxellagrets innerring. Balansaxlarna låses med hjälp av skruv och bricka mot lagringens innerring.

Då axlarna är monterade i kullager måste mothåll anbringas vid montering av de axiella låsningarna, för att motverka att axlarna roterar. Därav infördes två hål i balansaxlarna där ett verktyg för fixering av axlarna kunde anbringas under monteringsmomentet.

Såväl vevaxel som balansaxlar valdes att konstrueras i stål då det har låg kostnad och goda bearbetningsegenskaper. Då balanseringen sker med hjälp av excentrisk massa är även hög densitet

en fördel. Stål har dessutom god nötningsresistens, något som kan vara viktigt då axlarna skall monteras i lagerringar av stål, i vissa fall med glidpassning. Korrosionsbeständigheten är låg, men då axlarna monteras skyddade i ett vevhus med oljebad bedöms inte detta orsaka några problem.

Då balanseringen av motorn inte kan göras slutgiltigt förrän massan på de ingående komponenterna är känd gjordes en uppskattning, baserad på Vera-motorns komponenters vikt. Vevstaksbult, kolvbult och vevstake hade beslutats vara identiska, men kolvens och kolvringarnas vikt måste uppskattas. Vid denna tidpunkt fanns endast en grov CAD-modell av kolven att tillgå, men med den som utgångspunkt gjordes bedömningen att den slutgiltiga kolvens vikt inte borde överstiga 250 gram.

Vad gäller vevstaken beslutades att använda en identisk med Vera-motorns, då den konstruktionen inte ansågs vara någon begränsning. I Vera-motorn är vevstaken emellertid tillverkad i aluminium, vilket bedömdes kunna vara ett problem då optikmotorns tyngre kolv skulle utsätta vevstaken för högre belastningar. Då det vid detta skede inte fanns tillräckligt med data för att besluta huruvida vevstaken skulle tillverkas i aluminium eller stål, valdes det tyngre alternativet som grund för uppskattningen av balanseringsbehovet.

Sammantaget ledde dessa antaganden till en medveten överskattning av balanseringsbehovet, för att skapa en utgångspunkt för det fortsatta arbetet.

Det skulle dock visa sig i ett senare skede att ett missförstånd gällande balanseringen lett till att den erforderliga massan på balansaxlarna kraftigt underskattats. Balansaxlarnas ytterdiameter var sedan tidigare låst till 40 mm för att inte inkräkta på vevaxelns utrymme. För balansaxlarna hade valts en identisk lösning som för vevaxeln, med lagring endast i en ände. För att uppnå tillräcklig massa fick balansaxlarna dock konstrueras om på så vis att det upptog hela vevhusets djup. På grund av axlarnas längd var det då otillräckligt med lagring endast i ena änden. Vevhuset hade redan beslutats tillverkas i två delar, där den ena var en tunn täckplåt endast för att sluta tätt. Balansaxlarnas behov av extra lagring löstes genom att öka godstjockleken på täckplåten så att lager kunde pressas i för styrning av axlarna.

Balansaxlarnas massa var emellertid ändå inte tillräcklig, utan en ökning av diametern var nödvändig. Således tvingades diametern på vevaxeln minskas och till följd av detta fick dess tjocklek istället ökas för att bibehålla dess massa. Till följd av detta försköts vevstaken bort från centrum av cylinderns mittlinje, men förändringen ansågs inte orsaka några betydande problem.

3.2.3 Drivning av balansaxlar

För drivning av balansaxlarna diskuterades tre olika alternativ; kuggremsdrift, kedjedrift och direkt kuggdrift. Dessa alternativ är de vanligast förekommande på andra förbränningsmotorer och bedömdes därmed vara väl beprövade. Då avstånden mellan de axlar som skulle drivas var mycket korta beslutades att använda direkt kuggdrift då rem och kedja ansågs mer utrymmeskrävande och mer komplicerat över korta avstånd. En kuggväxel är dessutom i princip underhållsfri, medan både kuggrem och kedja på grund av mekaniskt slitage eller töjning kräver återkommande justering.

Då det är viktigt att balansaxlarna är placerade helt symmetriskt kring cylinderns mittlinje, se 2.1.4.4 s. 10, samt att den ena balansaxeln skall rotera åt motsatt håll gentemot den andra balansaxeln och vevaxeln används ett system med mellanaxlar. På grund av högt inköpspris, samt att verktyg för

fräsning av kuggprofiler fanns tillgängliga, togs beslutet att tillverka samtliga komponenter till balansaxeldrivningen själva istället för att köpa exempelvis färdiga drev och axlar.

Diameter och kuggantal för de kuggkransar som skulle användas till balansaxlar och vevaxel valdes efter balansaxlarnas ytterdiameter. Lämpliga kuggkransar för mellanaxlarna valdes därefter baserat på axelavståndet mellan vevaxel och balansaxlar, samt för att inte erhålla utväxling mellan vevaxel och balansaxlarna. För att underlätta tillverkningen valdes att göra lösa kuggkransar som sedan svetsades fast på axlarna. Konstruktionen utformades på så vis att identiska kuggkransar kunde används på de båda balansaxlarna, vevaxeln samt en av mellanaxlarna. På de övriga två mellanaxlarna används identiska drev, vilket innebar att endast två olika typer av kuggkransar behövde tillverkas.

Kuggkransarna valdes att konstrueras i stål, främst för dess goda nötningsegenskaper men även för att de skulle gå att svetsa fast i stålaxlarna. Även andra fastsättningsmetoder övervägdes, såsom fixering med låsskruv, men de ansågs onödigt komplicerade då hade inneburit mer komplicerad tillverkning, ökat antal komponenter, högre kostnad samt högre vikt.

3.2.4 Lagringselement

På flera ställen i motorn används olika typer av lager för att tillåta rörelse mellan komponenter. Mellan vevaxel och vevhus valdes att använda samma typ av kullager som i Vera-motorn, då de bedömdes vara fullt tillräckliga även för den ökade belastningen som optikmotorns tyngre rörliga delar innebar. Analogt med detta resonemang beslutades även att använda samma typ av nållager mellan vevbult och vevstake, samt mellan vevstake och kolvbult.

För lagring av de mellanaxlar som driver balansaxlarna, samt själva balansaxlarna, behövde emellertid nya lagerkonstruktioner tas fram. Med hjälp av produktkatalog från SKF, samt däri rekommenderade beräkningsmetoder gjordes beräkningar av lagerkomplexen (SKF, 2005).

3.3 Cylinder

Cylindern ansluts med ett interface till topplocket, vevhuset, spegeln och den ska även innesluta kolven. Två egenskaper som var viktiga att optimera med cylindern var att göra den styv för att minimera elastisk deformation, samt att göra den låg för att kolven ska kunna krympas maximalt för att spara dess vikt.

Enligt valt grundkoncept skulle motorn baseras på en Bowditch-kolv. För att innesluta en Bowditch-kolv och ge sidoinsyn behövde cylinderpaketet bestå huvudsakligen av en cylinderbas och en glascylinder. Utöver detta behövdes även en konstruktion som sköter inspänningen av glascylindern.

3.3.1 Glascylinderns fastsättning

Enligt rekommendationerna från operatören av Chalmers AVL optikmotor, De Benito Sienes, bör glascylindern limmas mot topplocket, samt avlastas från axiella spänningar från åtdragning av topplock. För att enkelt montera Veras topplock behöver detta skruvas fast genom befintliga skruvhål i topplocket. AVL-motorn använder sig av stöttor/ hylsor som sitter kring topplocksskruvarna jäms med glascylindern. Dessa absorberar all last som uppstår vid åtdragning. Se Figur 2 - Illustrering av stöttor i en optikmotor, s. 8 för mer bakgrundsinformation angående konstruktionen. Tyvärr gör denna lösning att skruvar och stöttor inkräktar på insynsfältets bredd genom glascylindern. Genom att minimera stöttornas bredd kunde dock deras inverkan minimeras.

Lotus använde sig av en annan konstruktion, där de använde sig av specialtillverkade topplock där topplocksskruvarna kunde placeras längre ifrån cylindern (Lotus Cars, 2014). Detta var dock inget alterntiv då Veras originaltopplock skulle kunna monteras, varpå lösningen i AVL motorn valdes. Beskrivning av stöttornas design finns beskriven i 3.3.3, s. 22.

3.3.2 Adapterplatta

3.3.2.1 Motiverings till adapterplatta

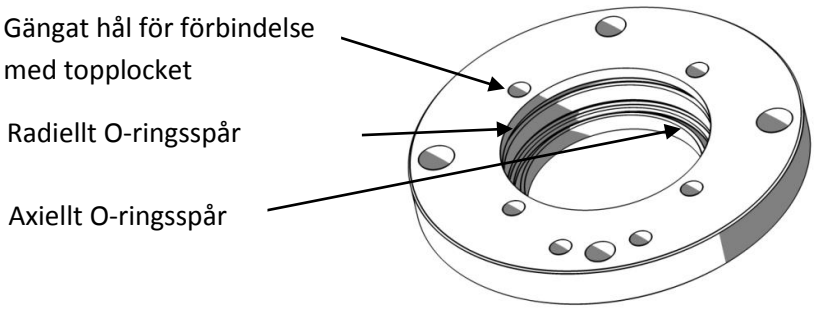
Då glascylindern borde limmas mot topplocket enligt De Benito kunde det vara fördelaktigt att inte montera glascylindern direkt mellan cylinderbasen och topplocket. För att bibehålla en säker inspänning av glascylindern men ändå kunna separera topplock och glascylinder från övriga motorn utan att behöva lyfta av hela cylinderbasen skulle glascylindern behöva spännas mot topplocket av en adapterplatta, varpå adapterplattan ansluts till cylinderbasen. På så vis kan man lyfta av glascylindern från motorn med minimal risk för att förstöra glaset och limningen mot topplocket. Detta gör att man enkelt kan utföra underhåll av kolven som t.ex. kolvringsbyte, rengöring/ byte av fönstret i kolvtoppen samt invändig rengöring av glascylindern. Därför togs beslutet att konstruera en adapterplatta som innehåller interface mot glascylindern, mot cylinderstöttorna och mot topplocket uppåt samt en undersida som passar ihop med cylinderbasen.

3.3.2.2 Interface mot glascylindern

I adaptern görs ett hål där glascylindern kan föras ned. Hålet gjordes 0,2 mm i övermått för att undvika kontakt mellan glascylindern och adapterplattan. I Adapterns hål för glascylindern placerades ett radiellt o-ringsspår samt ett axiellt o-ringsspår så att glascylindern kan vila på o-ringar och undvika metallkontakt, se Figur 12. Detta efter De Benitos rekommendationer från erfarenheter av Chalmers AVL motor. Lim hade även kunnat användas i adapterplattan, liksom man limmar glascylindern mot topplocket, men valet föll på O-ringar. O-ringarna ger en fjädrande effekt som gör att ett visst tryck genom glaset bibehålls och håller denna på plats, även när metallkomponenterna som topplocksskruvar och stöttor expanderar av värme. Lim riskerar att försvagas om det inte är elastiskt nog samt försvårar demontering.

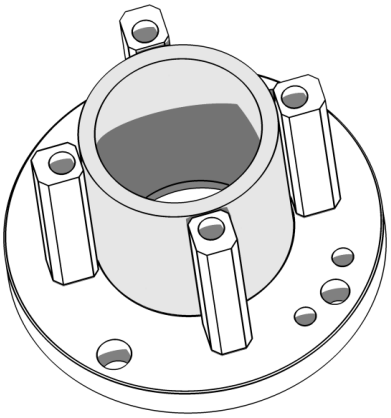
3.3.2.3 Inspänning av glascylindern

Till att spänna ihop topplocket och adapterplattan valdes en skruvlösning. Optimalt hade varit att dra skruvar genom topplocket och hela vägen ner till vevhuset för att få en förspänning genom konstruktionen. Problemet var att skruvarna riskerade att inkräkta på utrymmet för sidoöppningarna i cylinderbasen. Att borra så långa hål var dessutom problematiskt. Man skulle behöva borra hål rakt igenom cylinderbasen, vilket visar sig vara över 100mm. Topplocken är gjorda för M6 skruv och så långa och smala hål är svåra att få raka och kräver specialborr. Dessutom tappar man egenskapen att kunna separera adapterplatta, glascylinder och topplock från cylinderbasen i ett paket om de hålls ihop av samma skruv som fäster paketet vid cylinderbas och vevhus. Därför konstrueras adapterplattan med gängade hål som motsvarar topplockets bultmönster, varpå skruvar förs in genom topplocket och stöttorna och dras i adapterns gängor.

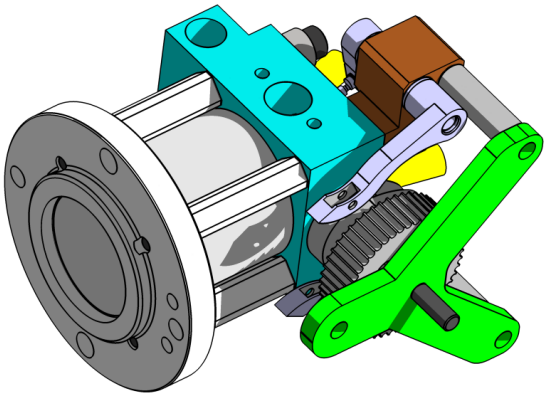


Figur 12 - Adapterplatta

Adapterplattan förbinds sedan med fyra stycken M8 skruvar mot cylinderbasen. Eftersom ingen förspänning erhålls genom konstruktionen var det önskvärt att göra skruvförbanden så starka som möjligt för att minimera rörelser i konstruktionen, därav valet av M8 skruv där M6 troligen hade räckt till i normala fall.



Figur 13 - Adapterplatta, stöttor och glascylinder



Figur 14 - Glascylinder monterad mot topplock

3.3.2.4 Materialval

Materialet i adapterplattan valdes till stål. Då vikt inte var av betydelse och styvhet i flänsen samt hållbarhet i förekommande gängor krävdes föreföll stål som det bästa alternativet.

Adapterplattan designades rotationssymmetrisk för att enkelt kunna svarvas, varpå de olika hålen sedan kunde borras och gängas i en fräsmaskin. Invändiga axiella samt radiella o-ringsspår krävde specialverktyg för att svarva, men dessa är relativt enkla att tillverka själv med snabbstålsämnen. Därför ansågs inte o-ringsspåren som ett problem.

3.3.3 Stöttor

Stöttorna skulle som tidigare nämnts avlasta glascylindern och möjliggöra en fullgod fastspänning av topplocket. Stöttorna behövde vara starka nog att bära upp förspänningslasten som uppstår vid åtdragning av topplocksskruvarna. Samtidigt bör stöttorna vara så smala som möjligt för att inkräkta minimalt på insynsmöjligheterna. För att maximera insynen fasades därför stöttorna av på insidan mot glascylindern för att erhålla ett par extra millimeter i bredd, se Figur 13. Stöttorna gjordes 10mm breda och så djupa som möjligt, men då toppplocket var förhållandevis litet slutade måttet på 11mm och avfasade kanter för att stöttornas ovansida inte skulle sticka ut utanför topplockets undersida, se Figur 13. Materialet valdes även här till stål, av styvhetsskäl. Stöttorna designades för att borras och fräsas i en fräsmaskin. Stöttorna hade kunnat göras rotationssymmetriska och svarvats, men då

avståndet mellan skruven och glascylindern begränsar godstjockleken mot glascylindern hade en sådan stötta blivit tunn i godset och troligen för vek för ändamålet.

3.3.4 Glascylinder

3.3.4.1 Leverantörer

Till optikmotorn behövde en glascylinder köpas in. Ett mål var att om möjligt finna en svensk leverantör för att förenkla framtida inköp då glascylindern är en förbrukningsvara. Ett flertal företag fick förfrågan, bland andra Glaskomponent AB, Glasteknik aku AB, Scientific-Lab glass Ab samt även danska Mirit glas varav inga av dessa företagen kunde leverera en glascylinder med 39mm innerdiameter utan kostsam specialtillverkning. De flesta företag kunde leverera cylindrar med innerdiameter 38mm eller 40mm, men då en avvikande cylinderdiameter påverkar förbränningsresultaten valdes att fortsätta söka efter en lösning med 39 mm. Slutligen kontaktades Nanoptio, vilka kunde specialtillverka en glascylinder med önskade mått. Deras arbetsprocess var dock även den kostsam samt hade en leveranstid på ca 12 veckor. Processen bestod av dragning, slipning till givna toleranser och polering för att erhålla optiska egenskaper. Genom att se över toleranserna samt de optiska kraven kunde dock en annan tillverkningsmetod hittas. Efter sökande kunde Nanoptio erbjuda en glascylinder som tillverkas med precisionsdragning utan efterbearbetning. Denna process var mycket snabbare, ner mot 4 veckors leveranstid, samt ca en tredjedel av kostnaden gentemot den första tillverkningsmetoden.

3.3.4.2 Dimensioner

Då Nanoptio kunde leverera cylindrar med kundspecifierade dimensioner valdes ytterdiametern på glascylindern till 47mm, vilket ansågs vara den största möjliga dimension som skulle rymmas innanför topplockskruvar och stöttor. Längden på glascylindern valdes till 56mm vilket gjorde att kolvens överdel kunde löpa genom glaset under hela cykeln utan att kolvtätningen behövde passera någon skarv.

3.3.4.3 Materialalternativ

Under sökandet efter leverantörer konstaterades att det fanns tre huvudtyper av glas som lämpar sig för ändamålet med avseende på värme och tryck:

- Borosilikatglas
- Naturellt kvartsglas
- Syntetiskt kvartsglas

Då syntetiskt kvarts ger bästa optiska egenskaperna av dessa alternativ, enligt Nanoptio, så var det första valet. Att hitta en svensk leverantör som kunde tillverka ett 39mm rör av kvarts visade sig dock vara svårt, varpå det billigare alternativet borosilikat undersöktes. Nackdelen med borosilikat var att det hade sämre egenskaper i det ultravioletta ljusspektrat enligt bland andra Glaskomponent AB. Ultravioletta spektrat används ofta vid lasermätning enligt Johansson, men för att kunna testa motorn hade en borosilikatcylinder varit god nog för att senare ersättas av kvarts vid behov av lasermätning. Dock slutade undersökningen med att ingen svensk firma kunde leverera en borosilikatcylinder i rätt dimension.

När Nanoptio fick förfrågan visade de sig ha alternativen syntetisk kvarts samt borosilikat med tillverkningsmetod ett. Då denna tillverkningsmetod uteslöts återstod tillverkningsmetod två, precisionsdragna rör, där naturell kvarts användes. Enligt Nanoptio hade dessa något lägre optisk

kvalité än syntetisk kvarts, men bättre kvalité jämfört med borosilikat i synliga spektrat samt goda egenskaper i ultravioletta spektrat.

Valet föll slutligen på precisionsdraget rör av naturell kvarts p.g.a. priset och leveranstiden, levererat av Nanoptio. Vid framtida behov av högre optisk kvalité finns möjligheten att beställa slipad syntetisk kvarts istället då dessa kan levereras i samma dimensioner.

3.3.5 Cylinderbas

Paketet med topplock, stöttor, glascylinder samt adapterplatta behövde monteras ovanpå en cylinderbas. Cylinderbasen fungerar som en förlängning av cylindern för att kompensera för den förlängda kolven. Generell design och tillverkningsstrategi valdes till att svarva cylinderbasens kontur, för att sedan fräsa detaljer som sidoöppnningar och skruvhål.

3.3.5.1 Godstjocklek i cylindervägg

Ett av målen med cylinderbasen var att få den så styv som möjligt för att minimera dess elastiska expansion av trycket i förbränningsrummet. Styvheten beror på längd och tvärsnittsarea enligt formeln:

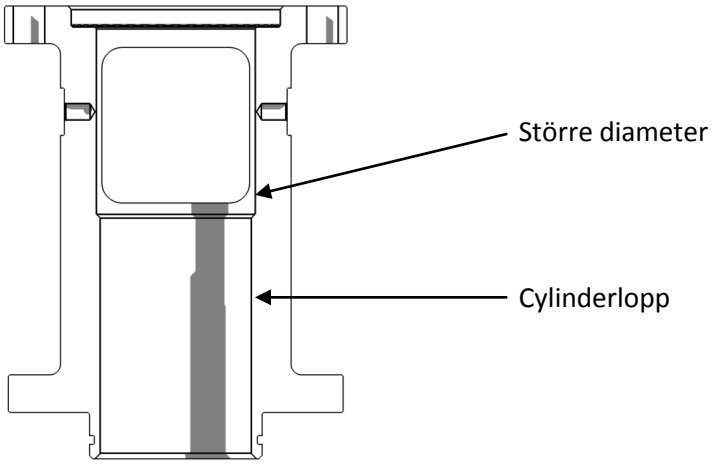
$$c = \frac{E \cdot A}{l}$$

källa gröna lundH.....

Då cylinder, och även kolven, blev längre än konventionella komponenter var högre elastisk deformation oundviklig utan att öka tvärsnittsarean, jämfört med Vera motorn. Då cylinderbasen behövde ha två öppningar på sidan, ena för att föra in spegeln och den andra för insyn, kom tvärsnittsarean att minska på en del av cylindern och styvheten minska ytterligare. Därför väljdes en så tjock cylindervägg som tilläts av interfacen med övriga komponenter. Det som visade sig vara begränsande var anslutningen till vevhuset. I Vera motorn var hålbilden i vevhuset liksom topplocket kvadratiskt med måtten 40x40. Då topplocket skruvas i adapterplattan kunde den nedre hålbilden i cylinderbasen väljas fritt och det utökades därför till 52x52 vilket möjliggjorde en cylindervägg på 10mm. Möjlighet fanns att öka hålbilden ytterligare innan vevhuset satte gränsen. Detta ansågs dock inte nödvändigt. Cylinderväggens tjocklek gav erforderligt gods för att göra konstruktionen stabil kring sidoöppningarna, samt möjlighet att gänga i cylinderväggen för diverse detaljer som behövde anslutas till cylinderbasen från sidan.

3.3.5.2 Cylinderlopp

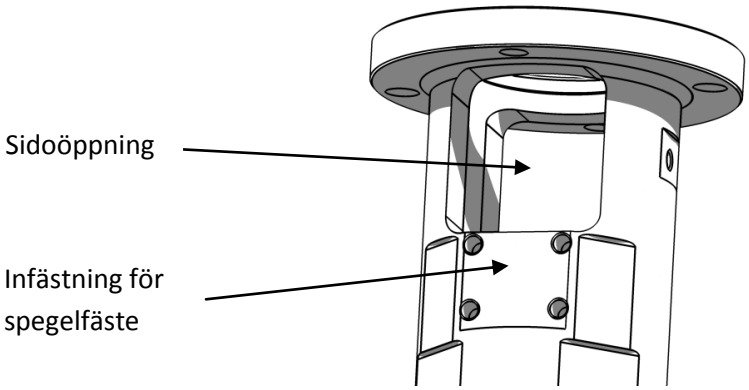
Då en av cylinderns uppgifter är att innesluta kolven behövdes ett cylinderlopp. Cylinderloppet är insidan av cylindern där kolven löper. På optikmotorns konstruktion används glascylindern som en del av cylinderloppet. Glascylindern var dock inte tillräcklig för att styra hela kolven. Kolven utsätts för sidokrafter, orsakade av vevstaken när denna vinklas. En konventionell kolv är låg, oftast inte högre än dess diameter. Optikmotorns kolv blev dock betydligt högre, varpå något behövdes för att styra kolvens nederdel. Dessutom behövdes en yta för kolven att sluta tätt mot för att förhindra att vevhusolja trycks upp kring kolven. Ett cylinderlopp designades vid nederdelen av cylinderbasen där kolven och kolvring kunde löpa. Ovanför loppet gjordes innerdiametern större för att undvika onödig kontakt mellan kolv och cylinder. Kolvens överdel styrdes sedan av glascylindern som tidigare nämnts.



Figur 15 - Snitt av cylinderbasen

3.3.5.3 Sidoöppning

För att kuna fästa spegeln och kunna ha möjlighet att se in krävdes två stycken öppningar i cylinderbasens cylindervägg. Öppningen gjordes så stor som möjligt för att underlätta montering av spegeln, utan att riskera att den försvagar konstruktionen. Öppningen blev i slutändan 40 mm hög och 38 mm bred. För att fästa spegeln gjordes ett plan under öppningen på vilket gängade hål placerades för att kunna skruva fast spegelfästet direkt i cylindern. För att göra cylinderbasen mer flexibel vid montering valdes det att införa samma fästanordning på båda sidor av cylindern. På så vis kan man byta riktning på spegeln utan att behöva vrida hela cylindern. Dessutom finns möjlighet att använda ena sidan som reserv utifall att gängan skadas på andra sidan.



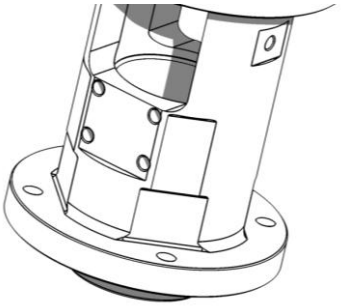
Figur 16 - Sidoöppning och inästning för spegel

3.3.5.4 Interface till vevhus och adapterplatta

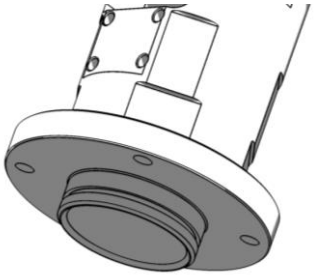
Då cylinderbasen är formad som en cylinder behövs skruvflänsar i var ände för att ansluta denna till vevhus samt adapterplatta. Då vevhuset tillverkas i aluminium fästs cylinderbasen med pinnbultar och muttrar. Muttrar kräver större yta jämfört med en insexskruv då den dels har större diameter och det behövs även plats för att kunna föra på en ringnyckel eller hylsa på muttern. Då inte insexskruv kunde användas vid den nedre flänsen valdes istället att fräsa bort material i cylinderväggen för att ge nödvändig plats för mutter och verktyg, se Figur 17. Detta påverkar den totala styvheten i låg utsträckningen då bara 2mm material behövde tas bort för att erhålla tillräckligt utrymme.

För att centrera cylinderbasen mot vevhuset designas en cylinderkjol, med ett o-ringsspår för tätning mellan vevhus och cylinderbas, som sänks ned i vevhusets öppning. För att låsa rotationen används skruvarna i skruvflänsen. Skruvarna centrerar inte på samma sätt som exempelvis cylindriska pinnar på grund av glapp, men för detta ändamål anses de centrera tillräckligt bra.

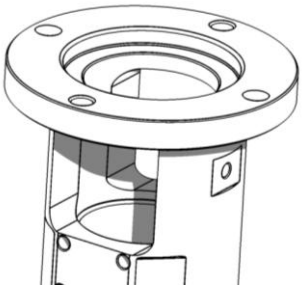
Flänsen i överkant som ansluter till adapterplattan designades på liknande sätt som den nedre flänsen. För att centrera adapterplattan och basen förseddes basen med ett hål där sedan en kort tapp på undersidan av adapterplattan kunde föras in. Ingen tätning krävdes då cylinderbasen inte ska innesluta något övertryck eller oljor.



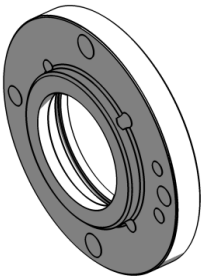
Figur 17 - Nedre skruvfläns



Figur 18 - Cylinderkjol med o-ringsspår

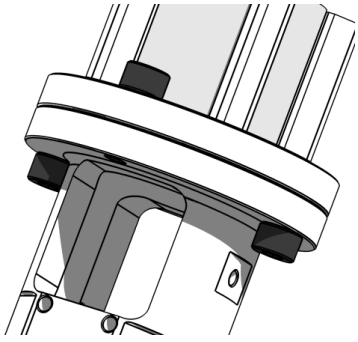


Figur 19 - Övre skruvfläns



Figur 20 - Adapterplattans undersida

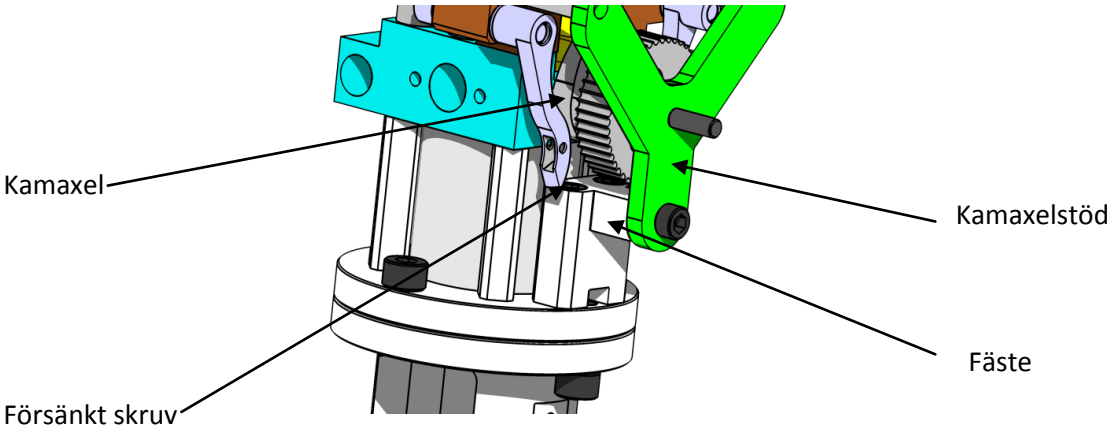
Vid minimering av cylinderbasens höjd kom sidofönstret väldigt nära den övre skruvflänsen, se Figur 16. Grundidén var att skruva i skruvarna som håller ihop cylinderbas samt adapterplatta från undersidan och göra gängor i adapterplattan. Problemet blev att då fönstret hamnade nära flänsen hade två av skruvskallarna stuckit ned framför fönstret. Därför vändes två av skruvarna uppåt varpå två hål fick gängas respektiva borras i vardera fläns.



Figur 21 - Skruvförband mellan adapterplatta och cylinderbas

3.3.5.5 Kamaxelstöd

Veras topplock var försett med en anordning som gav stöd åt kamaxeln. Nederdelen av denna anordning skruvas normalt in i Veras cylinder, men då cylindern på optikmotorn är gjord i glas var denna lösning inte möjlig. Därför fick ett fäste konstrueras för att kunna ansluta stödet. Fästet designades simpelt och anslöts genom att skruva fast den i gängade hål i adapterplattan. De gängade hålen kan ses i Figur 12. I fästet gjordes sedan ett gängat hål där nederdelen av kamaxelstödet kan skruvas fast.



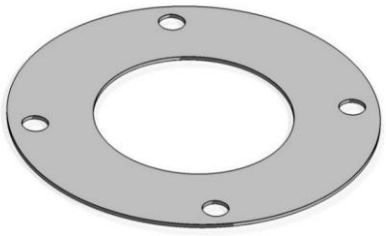
Figur 22 - Kamaxelstöd

3.3.5.6 Shims

För att kunna reglera kompressionen i motorn, vilket innebär att reglera höjden på cylindern och därmed förbränningsutrymmets storlek beslutades att använda shims. Shims används som en bricka som läggs mellan två ytor. Genom att byta mellan olika shims med olika tjocklek erhålls olika avstånd mellan ytorna. Shims valdes då det är en väldigt enkel men precis metod för justering. Noggrannheten på shimsets tjocklek avgör precisionen. Shims är även en stabil metod. Då det är av stor vikt att cylindern är stabil och styv värderades detta högt.

Shimset valdes att placeras mellan vevhuset och cylinderbasen. Alternativet hade varit att placera shimset mellan cylinderbas och adapterplatta, men då denna sammanlänkning är kritisk för att cylinderlopp i cylinderbasen och glascylindern ska centrera för att undvika att kolven kilas fast valdes att undvika detta. Cylinderbasens placering mot vevhuset var däremot relativt okänslig. Nackdelen blir att hela cylinderbasen måste lyftas av vevhuset för att byta shims.

Då ett shims av praktiska skäl inte kan göras hur tunt som helst behövde en bastjocklek väljas. Bastjockleken valdes till 0,5mm, varpå en glipa mellan vevhus och cylinderbas fick byggas in. Detta innebar alltså att ett shims på 0,5mm motsvarar en höjdjustering på 0mm. Ett shims med tjocklek 1mm motsvarade 0,5mm osv.



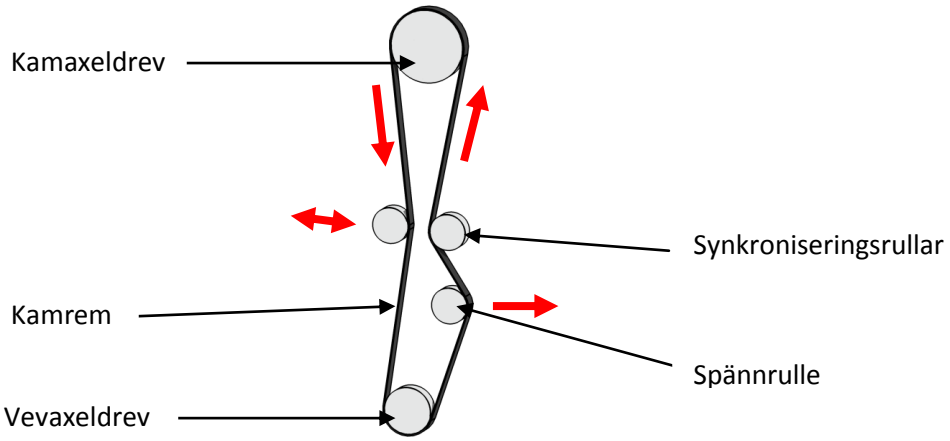
Figur 23 - Shims

Efter diskussion och rådgivning med projektgruppens handledare beslutades att det endast behövde finnas shims i en tjocklek eftersom det var oklart hur stor kompression det var i Veramotorn då. Därför kom det att vara osäkert vilket kompressionstryck som behövdes i Optikmotorn. Skulle det i framtiden krävas mer reglering av trycket så finns möjlighet att då beställa shims från en extern leverantör i olika tjocklekar. Shims tillverkades därför från 1mm svartplåt, vilket gav ett avstånd mellan kolv och topplock på 0,5mm vid övre dödläget.

3.4 Kamremspännare

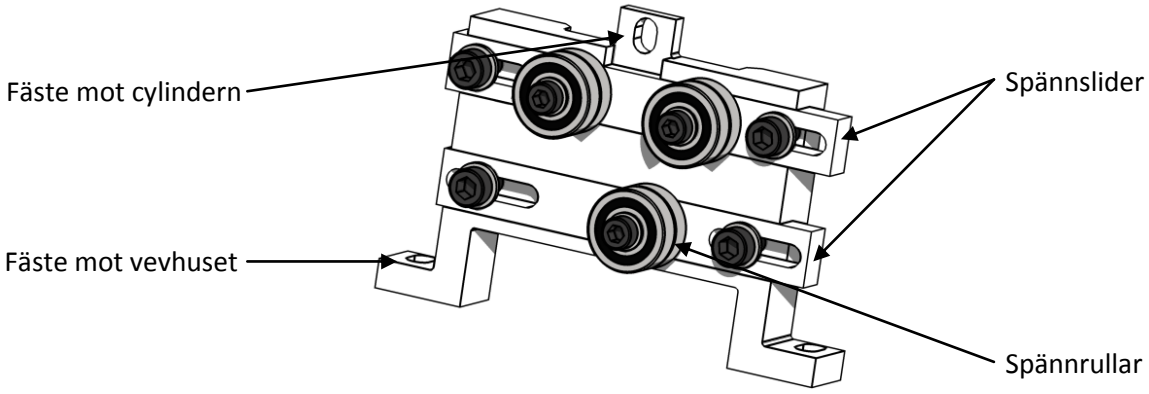
Veras kamaxel drivs av en kamaxelrem. Det är en tandad rem som överför rotation från vevaxeln till kamaxeln. För att garantera remmens funktion behöver den spännas så att den inte kuggar över. Det är av yttersta vikt att kamaxel och vevaxel är helt synkroniserade, annars finns det risk att ventilerna slår i kolven vilket kan leda till ett katastrofalt haveri. Kamremmen kom dessutom att bli extra lång på optikmotorn eftersom cylindern var längre än Veras cylinder.

För att erhålla en flexibel kamremspännare designades den med två stycken skjutbara enheter med spännrullar. Den övre enheten var tänkt att användas för att finjustera synkroniseringen mellan vevaxel och kamaxel, medan den nedre används för att spänna remmen. Synkroniniseringsrullarna flyttas i sidled och spänner på dragsidan eller retursidan av remmen för att justera synkroniseringen.



Figur 24 - Illustrering av kamdrivning

Kamremspännaren skruvades enklast fast mot vevhuset där gott om plats fanns. För att ge spännaren stöd skruvades den även mot cylindern varpå ett gängat hål fick införas i cylinderväggen. Då cylindern skulle vara justerbar i höjdled fick skruvhålet i spännaren göras ovalt för att tillåta olika nivåer på cylindern. Spännsliderna försågs med ovala hål för att kunna skjuta sliderna i sidled och sedan fixera dessa med skruvar. Till rullar användes enradiga spårkullager av små dimensioner. Då en liten ytterdiamater önskades för att göra konstruktionen liten behövdes två stycken lager monteras mot varandra. Detta p.g.a. att kunna stödja kamremmen över hela dess bredd och att så breda kullager med små ytterdiametrar inte fanns att köpa. Baksida och undersida på kamremspännarens kropp behövde fräsas ur för att ge plats åt cylinderbasen och dess nedre skruvfläns.



Figur 25 - Kamremspännare

3.5 Vevhusventilation

För att minska tryckskillnaderna i vevhuset så designades en vevhusventilation. Det medgav att luft från vevhuset lättare kunde flytta på sig utan att olja och oljedimma från vevhuset skvätte ut, som det hade gjort om det hade varit ett öppet lufthål in till vevhuset. Ett tidigt förslag på vevhusventilation bestod av en cylinder fylld med tvättsvamp för att filtrera ut oljan från vevhusgaserna. Det förslaget förkastades dock eftersom det ansågs vara en för osäker lösning då endast en källa hittats på att det eventuellt skulle kunna fungera (Make your own air/oil separator).

Ett annat förslag beaktades som gick ut på att vevhusventilationen bestod av ett uppvinklat rör med ett membran/duk längst upp om rörde sig fram och tillbaka pga. det växlande över- och undertrycket som kolven skapade. Fördelen med det förslaget var att ingen olja eller oljeblandad luft skulle kunna läcka ut eftersom det inte sker något luftutbyte med den omgivande luften. Det förslaget förkastades också eftersom projektgruppen ansåg det vara en för känslig lösning med risk för att membranet sprack.

Istället studerades en vevhusventilation som troligtvis kommer att sitta på en kommande Vera-motor. Förhoppningarna var att en liknande konstruktion skulle kunna filtrera ut oljan bättre med små friktionsförluster. Veras kommande vevhusventilation var formad som ett torn med oljefällor i form av invändiga nedåtriktade flänsar som dels hindrade olja från att skvätta ut från vevhuset och även tvingade luften att gå i en krökt bana för att oljan i luften skulle skiljas från luften. Den utrensade oljan kunde m.h.a. gravitationen rinna tillbaka till vevhuset och användas igen. I toppen av vevhusventilationen satt slutligen ett luftfilter för att ytterligare rensa ur olja som flänsarna inte lyckades rensa ur luften.

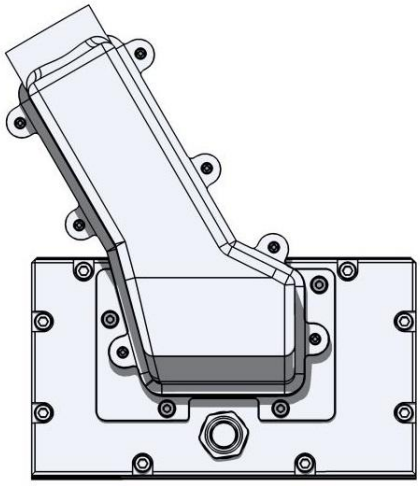
(***här ska en bild in på vevhusventen som Anders J designade***)

Eftersom det är önskvärt att använda ett filter i toppen på vevhusventilationen är det enligt Bernoullis ekvation

$$p_1 + {}^1\!/_2 \cdot \rho V_1^2 + \rho g z_1 = p_2 + {}^1\!/_2 \cdot \rho V_2^2 + \rho g z_2 \text{ (White, 2011)}$$

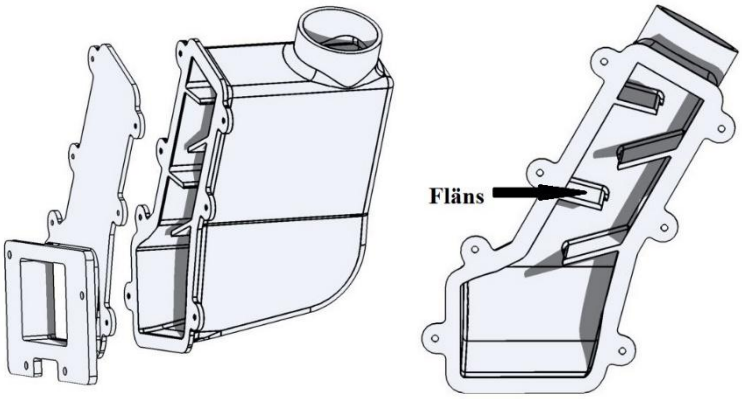
inte önskvärt att ha en tvärsnittsarea, som luften kan flöda igenom, någon annanstans i vevhusventilationen som är mindre än dennas area. Eftersom det då uppstår ett högre tryck innan avsmalningen, då luftens hastighet är långsammare där, blir det ett högre tryck inuti vevhusventilationen. Ett högre tryck i vevhusventilationen hade medfört en större tryckskillnad

mellan luften i vevhuset och det omgivande rummet. Den större tryckskillnaden hade blivit ett motstånd för kolven att jobba sig igenom varje gång den åker nedåt. Det är fallet när kolven är i förbränningsfasen och hade då lätt till mindre verkningsgrad hos motorn. För att enkelt kunna montera och demontera vevhusets täckplåt som vevhusventilationen ansluts mot så designades vevhusventilationen så att den blev tillräckligt smal för att inte täcka någon av skruvarna i täckplåten. Då kunde också täckplåten monteras/demonteras utan att vevhusventilationen togs bort från täckplåten. En effekt av att göra vevhusventilationen smal blev att göra den djup för att kunna bibehålla en stor tvärsnittsarea för luften att röra sig genom.



Figur 26 - Vevhusventilation på vevhusets täckplåt

Då en vevhusventilation inte behöver ta upp någon last, mer än vikten av luftfiltret och sin egenvikt, den kräver en komplex geometri samt tunt gods diskuterade projektgruppen fram att vevhusventilationen enklast tillverkas genom utskrift i plast i en 3D-skrivare. Vevhusventilationen designades därför efter att skrivas ut i en 3D-skrivare.



Figur 27 - Delad vevhusventilation

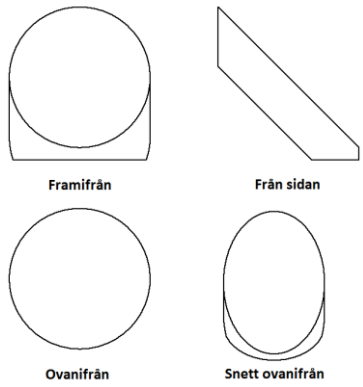
För att möjliggöra utskrift i 3D-skrivaren delades vevhusventilationen i två delar, det medförde även att det blev lättare att rengöra och inspektera insidan. För att täta mellan de två delarna diskuterade projektgruppen att antingen använda o-ringsnöre som löpte i en skåra mellan de två delarna eller flytande packning. Då det var osäkert om det gick att skapa ett tillräckligt stort tryck mellan de två delarna i vevhusventilationen för att trycka ut o-ringen, valdes flytande packning tillsammans med

skruvförband. För att få en jämn yta inuti vevhusventilationen så beslutades att den skulle målas med en grundläggande plastprimer och sedan motorlack.

3.6 Spegel och spegelfäste

3.6.1 Spegel

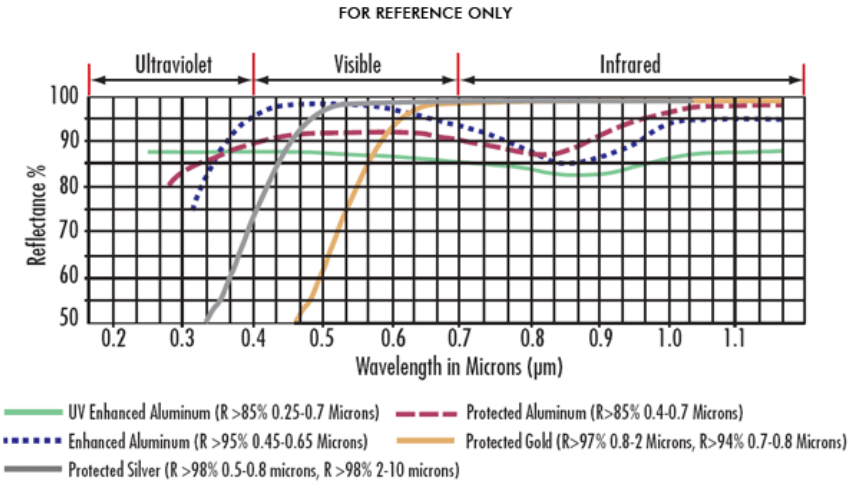
Spegelns uppgift är att reflektera ljuset 90 grader inuti kolven, den måste alltså vara vinklad 45 grader i förhållande till kolvtoppen. Då en cirkel projiceras på ett plan lutat 45 grader i förhållande till cirkeln, fås en elliptisk bild på planet. Omvänt gäller att en spegel med sådan elliptisk form reflekterar en cirkulär bild 90 grader, se Figur 28. Fördelen med denna form är framför allt att den passar i ett cirkulärt hål, vilket kommer att vara fallet inuti kolven.



Figur 28 - Spegelns form. Ovanifrån innebär betraktat från toppen av motorn

Denna typ av elliptisk spegel är en standardkomponent hos många optikleverantörer. För att hålla priset nere prioriterades därför att hitta en standardspegel som passar i applikation. Gruppen bestämde att spegeln inte fick vara mindre än den synliga diametern i kolven (27,1 mm), då detta var en parameter som skulle maximeras. Det bestämdes också att den skulle vara minst 1 mm mindre än kolvens innerdiameter (35 mm). Detta uteslöt Thorlabs som levererat spegeln till AVL-motorn, vilka endast levererade 1” och 1,5” speglar. Även Knightoptics och Altechna undersöktes.

Den spegel som valdes är en elliptisk precisionsspegel från Edmund Optics, art. #32-133, som har diameter 31,75 mm (1,25”) sett ovanifrån. Spegelns reflekterande yta består av aluminium vilken har förbättrats för att öka reflektiviteten i det synliga spektrumet, se Figur 29 (Metallic Mirror Coatings). Spegelns botten består av glas, det reflekterande lager ligger på framsidan av glaset vilket eliminerar skuggbilder då spegeln betraktas från sidan. Detta gör den dock mycket repkänslig varför stor försiktighet måste iakttas vid hantering.



Figur 29 - Reflektivitet som funktion av våglängd. Enhanced Aluminum används i spegeln (Metallic Mirror Coatings)

Enhanced Aluminum ytbeläggningen valdes för att den ger bäst reflektivitet i det synliga spektrumet. Andra intressanta ytbeläggningar som Edmund Optics erbjuder som standard är *UV Enhanced Aluminum*, vilken har god reflektivitet i UV spektrumet, och *Protected Gold,* vilken har god reflektivitet i IR spektrumet. God reflektivitet i UV spektrumet kan vara önskvärt för framtida lasertester, men det ligger utanför detta projekt.

Efter att spegelns geometri var känd så låstes spegeln i CAD-modellen för att spegelfästet skulle kunna dimensioneras.

3.6.2 Spegelfäste

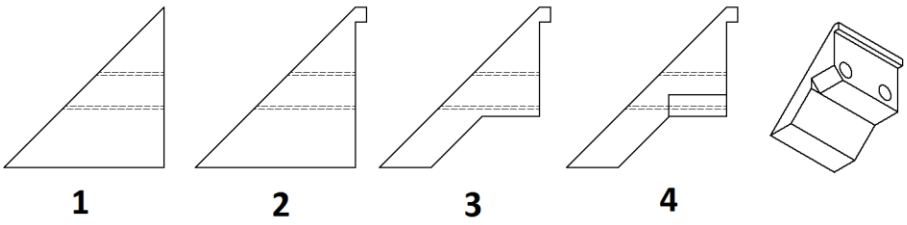
Spegeln måste sitta stabilt och i rätt position inuti kolven. Den måste också kunna monteras och demonteras snabbt utan att kolven tas ur motorn. Ingen del av spegeln eller spelfästet får heller krocka med kolven i monterat läge då motorn går. Den valda spegeln går i sig lätt igenom kolvens fönster vilket är en förutsättning för att den ska kunna monteras.

Det första konceptet på fästanordning var att klämma fast spegeln. Dock så avfärdades detta som en svår lösning eftersom att ett klämfäste kräver att spegeln omsluts, vilket minskar säkerhetsmarginalerna inuti kolven. Det blir även svårt att spänna klämfästet då det sitter inuti motorn. Därför undersöktes istället en lösning där spegeln limmas fast.

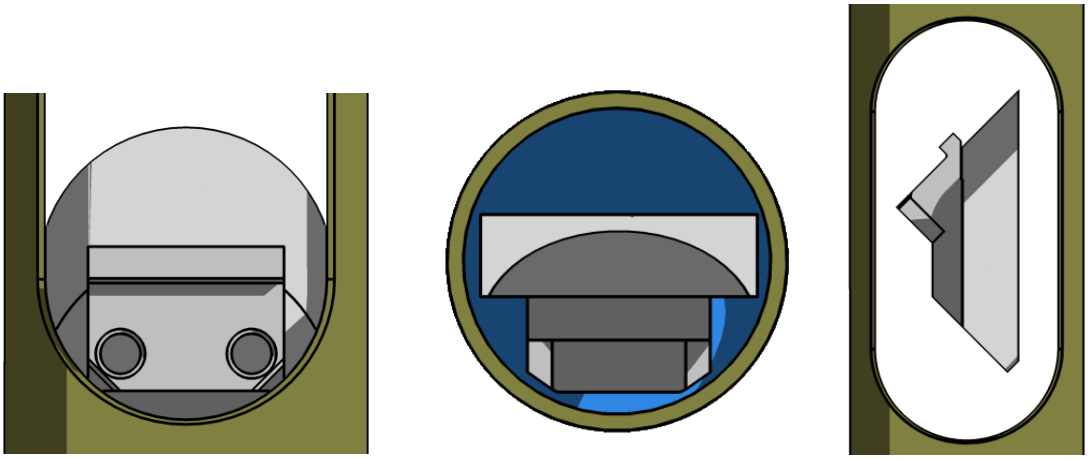
För att spegeln ska gå att byta krävs då att spegeln går igenom kolven tillsammans med den fastlimmade delen. Ett spegelfäste som når ända bak till fästpunkterna på utsidan av cylindern var därför uteslutet, fästanordningen måste gå att dela. Bästa sättet att dela och sätta ihop fästanordningen bedömdes vara med skruvar, vilket är möjligt då en fastlimmad adapter på spegeln går att gänga till skillnad från glaset. En lösning där spegeladaptern skruvas fast genom en konsol, vilken utgör andra halvan av fästanordningen, ansågs därför lämplig. Konsolen sitter i sin tur fast i fästpunkterna på utsidan av cylindern.

En första spegeladapter ritades som en 45 graders kil med två gängade hål i, se Figur 30. Detta var en enkel geometri som kunde uppfylla grundfunktionen – att hålla spegeln. En övre kant som låste fästets vinkel mot konsolen lades till för att styra spegeln rotation. För att spegeln med fastlimmad

adapter skulle gå in på tvären i kolven samt gå att rotera 90 grader till slutposition togs material bort i bakre underkant av kilen, den maximalt tillåtna storleken visualiserades med hjälp av CAD. Då adaptern och konsolen sattes in i CAD-assemblyn visade det sig att undersidan av fästet krockade med underkanten av fönstret i kolven, se vänstra bilden i Figur 31. Därför gjordes faser undertill på både adaptern och konsolen för att bättre efterlikna kolvfönstrets cirkulära ände. Anledningen till att faser valdes är att de är enkla att tillverka med fräs. Stål valdes för adaptern för stabilitet och styrka i gängorna, och aluminium valdes för spegelkonsolen för enklare bearbetning.

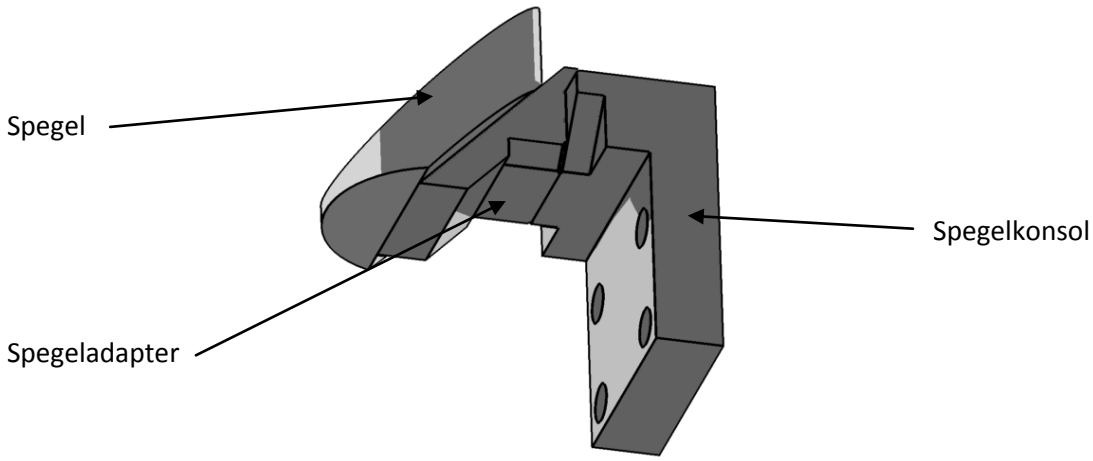


Figur 30 - Illustration av arbetsgång vid konstruktion av spegeladapter, till höger ses den färdiga designen



Figur 31 - Till vänster: Frigång mellan spegelfäste och underkant av kolvfönster, kolv i TDC. Mitten: Rotationsfrihet inuti kolv. Till höger: Frigång vid inskjutning i fönster.

Tvåkomponentslimmet *Loctite Power Epoxy Universal* valdes för att limma ihop spegeln och adaptern på grund av hög styrka, oljebeständighet och vidhäftning mot både glas och metall (Loctite, 2014). För att spegeln skall hamna i rätt position vid fastlimning mot adaptern ska båda delarnas undersidor hållas mot en plan yta. I sidled får spegeln positioneras med hjälp av ett djupskjutmått då små avvikelser i sidled (<0,5 mm) kan tolereras, på grund av att spegeln är bredare än kolvfönstret och att god marginal finns mot insidan av kolven.



Figur 32 - Färdigt spegelfäste

3.7 Kraftöverföring och startanordning

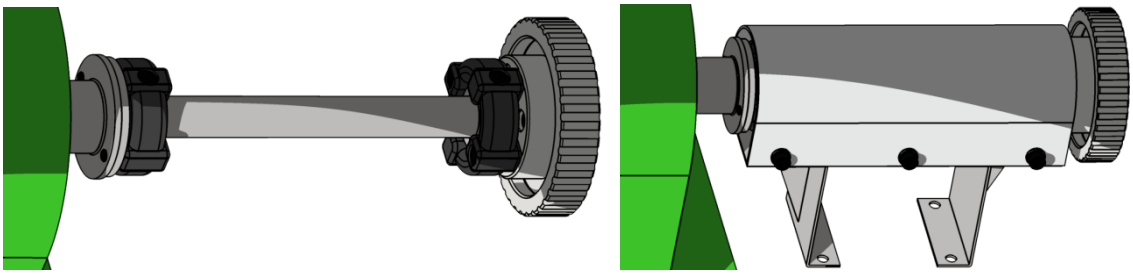
För att provköra motorn tillhandahölls en dynamometer av förbränningsavdelningen. För att kunna använda dynamometern samt starta motorn behövde kraftöverföring samt startanordning konstrueras. Mer om dynamon kan läsas i 5.1, s. 41.

3.7.1 Kraftöverföring

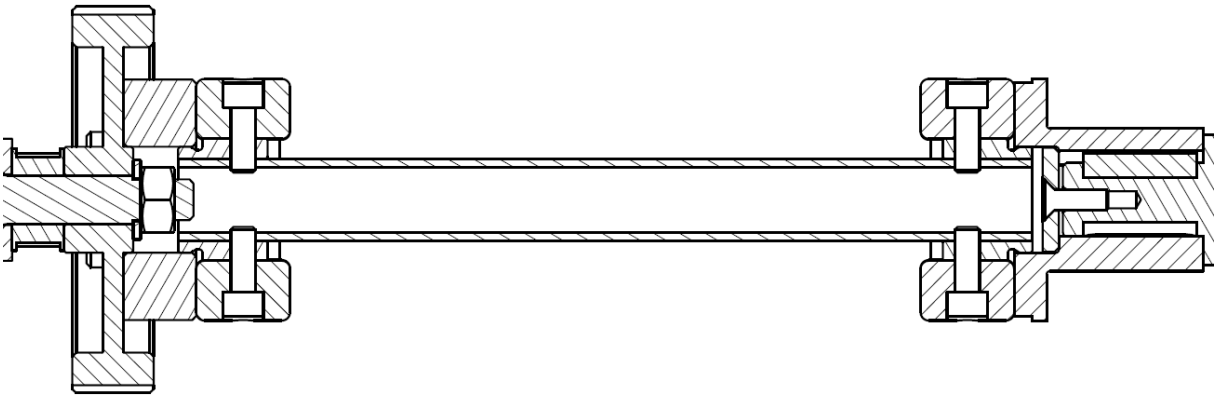
Den tillhandahållna dynamometern har en 18 mm utgående axel med 6 mm plattkilsspår. För att ansluta denna med motorns svänghjul konstruerades två medbringare och en axel. Dessa konstruerades för att utnyttja två gummiknutar som tillhandahållits av institutionen.

Gummiknutarna är av modell *Lovejoy LF1 Base Element*. De klarar 10 Nm momentöverföring nominellt och 25 Nm maximalt, samt tillåter 3 graders felvinkling och ±2 mm förskjutning axiellt vilket förenklar montering. Vid 10 Nm så blir deras axiella förskjutning 6 grader vilket ger viss vridning av kraftöverföringen (Lovejoy Torsional Catalogue 2010, 2010).

Axeln konstruerades för att centrera mot medbringarna och samtidigt tillåta axiell förskjutning. Medbringarna utformades för att ha rätt gränssnitt i båda ändar och samtidigt vara så enkla som möjligt att tillverka. För en översikt av kraftöverföringen se Figur 33 och Figur 34. För att skydda vid eventuellt brott av gummiknutarna konstruerades ett sprängskydd som omsluter axeln och gummiknutarna, se Figur 33.



Figur 33 - Översikt av kraftöverföringen. Med sprängskydd till höger



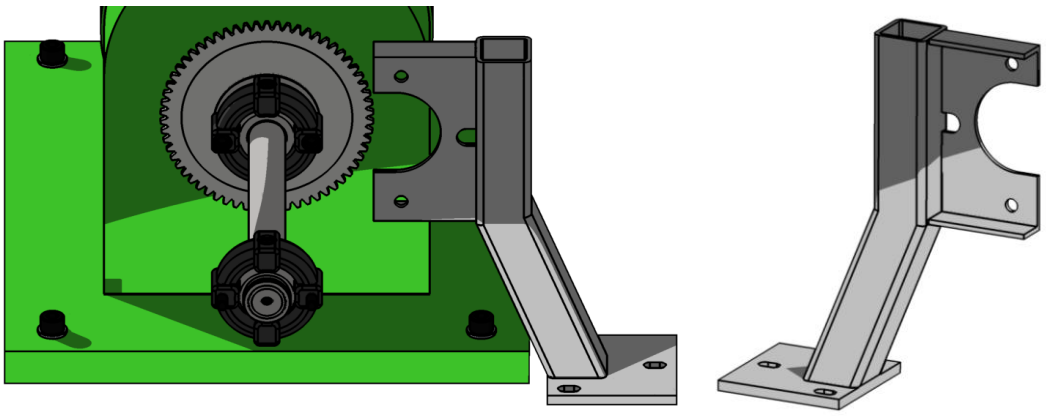
Figur 34 - Kraftöverföringen i genomskärning. Dynamometersidan till höger

3.7.2 Startmotor

En startmotor krävs för att accelerera motorn till ett varvtal där den kan starta. En elektrisk startmotor till en Honda GX390 motor, modellnummer 31210-ZE3-013, tillhandahölls av institutionen. Samma startmotor har använts för att starta Veramotorn och har fungerat bra där, därför bedömdes den vara tillräckligt stark. Startmotorn har en integrerad startkoppling som gör att dess kuggar bara är i ingrepp då startmotorn körs. Att startkopplingen är integrerad sparar mycket tillverkningsarbete jämfört med att köpa startmotor och startkoppling separat och bygga ihop dessa, vilket var ett alternativ som också övervägdes.

Startmotorn ska driva mot en variatorkrans till en 50cc 139QMA mopedmotor som har kuggar med samma modul, denna har också tillhandahållits av institutionen. Det är viktigt att startmotorn drar igång optikmotorn i rätt riktning, för att detta ska ske måste startmotorns och optikmotorns utgående axlar peka i samma riktning. Den bästa platsen för startmotorn bedömdes därför vara längs med axeln mellan motorn och dynamometern, variatorkransen kunde då placeras på medbringaren som sitter på dynamometern, se Figur 35.

Då placeringen av startmotorn var känd kunde ett fäste tas fram. För att fästet skulle bli enkelt att tillverka gjordes en konstruktion som byggde på kapade rör och bockad plåt som sammanfogas med svetsning. Skruvhålen mot bordet gjordes avlånga för att möjliggöra finjustering av avståndet till optikmotorns axel vid montering, se Figur 35.



Figur 35 - Startmotorfästets och variatorkransens placering. Till höger: Startmotorfästet sett från andra sidan.

4 Tillverkning

I följande text redogörs för hur de olika komponenterna har tillverkats av projektgruppen. Från den färdigställda CAD-modellen kunde ritningar genereras som användes vid tillverkningen av komponenterna.

4.1 Kolv

Kolvens olika delar skulle tillverkas av titan grade 5. En solid titanaxel på 40mm diameter användes som råmaterial. För att bearbeta titanet fick snabbstålsverktyg användas. Detta för att snabbstålsverktyg kan slipas vassa, samt bearbeta med låg skärhastighet vilket är önskvärt då titanet annars visade sig bli väldigt varmt p.g.a. sina värmeledningsegenskaper. För att göra de invändiga konturerna behövde materialet borras, vilket visade sig vara en utmaning. Titanet var segt och krävde stora mängder kylvätska för att inte överhetta borren.

Kolvdelarnas konturer svarvades. Sedan frästes sidoöppningarna i kolvkroppen i fräs och kolvbultshålet borrades samt brotschades för att erhålla ett hål med god precision.

4.2 Vevhus, vevaxel och balansering

4.2.1 Vevaxel

Vevaxeln tillverkades med hjälp av svarvning och fräsning av en 100 mm kalldragen stålaxel. Råämnet togs först ner till vevskinkans ytterdiameter och därefter svarvades detaljer såsom lagerytor, anliggningsyta för drev till balansaxeldrivning, distansklackar samt axeltappen där svänghjul och vevaxeldrev till kamdrivningen monteras. Sista operationen i svarv var att tillverka den gänga i axeltappens ände som låser svänghjul och vevaxeldrev, samt säkrar vevaxeln i axiell led. Efter svarvning spändes axeln upp i fräsmaskin för bearbetning av vevskinkans motvikt, hål för vevstaksbult samt kilspår för svänghjul och vevaxeldrev.

Bild på svarvad vev + färdig vev

4.2.2 Balansaxlar

Balansaxlarna svarvades ur 45 mm råämnen av kalldragen stålaxel. Ena lagertappen borrades och gängades för att möjliggöra montering av den skruv som tjänar som axiell låsning av axeln. Därefter spändes axlarna upp i fräsmaskin för att förses med de hål som används som mothåll under monteringen. Det sista bearbetningsmomentet var att fräsa bort material för att skapa den excentriska viktfördelning som ger balansaxeln dess funktion. De tidigare nämnda hål som används som mothåll vid monteringen används även för att fixera axlarna i en jigg under det avslutande fräsmomentet.

Bild på svarvad axel + axel i jigg + färdig axel

4.2.3 Balansaxeldrivning

Mellanaxlarna tillverkades genom svarvning. Axlarna består av en axeltapp som monteras i kullager, samt en anliggningsyta på vilken kuggkransen fixeras.

Kuggkransarna tillverkades genom att ett solitt rundämne svarvades till korrekt inner- och ytterdiameter. Det svarvade rundämnet spändes därefter upp i fräsmaskin varpå kuggprofilerna skars.

Då balansaxlarna och vevaxeln måste monteras synkroniserat konstruerades en jigg för fixering av axlarna. Kuggkransarnas utformning medgav att de löpte fritt på axlarnas anliggningsytor och således kunde roteras i korrekt position för att synkronisera axlarna. Slutligen fixerades kuggkransarna på axlarna med TIG-svetsning och dreven märktes för att underlätta montering.

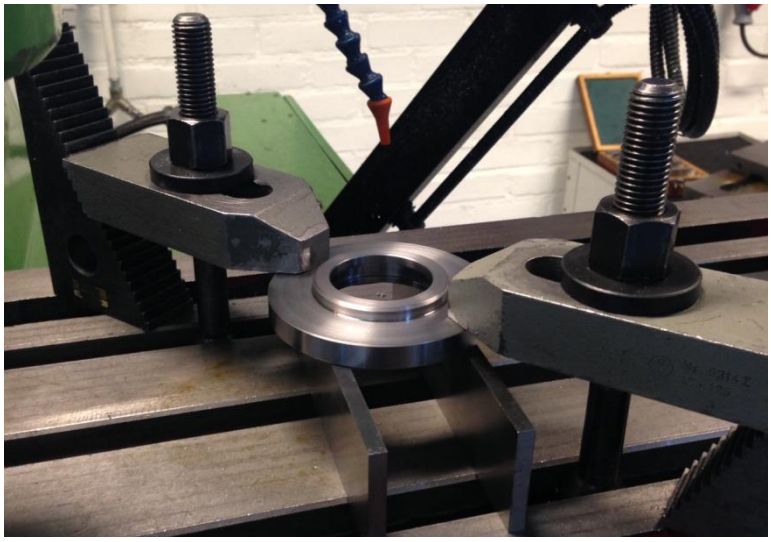
4.2.4 Vevhus

Vevhuset tillverkades ur en 120x120 mm aluminiumstång med hjälp av fräsning. Genom planfräsning av de sex ytterytorna skapades ett rektangulärt block med korrekta yttermått, varpå finbearbetning kunde påbörjas. Då det stora utrymme där vevaxel och balansaxlar skall monteras innebär att blocket tappar avsevärt i stabilitet och försvårar inspänning i fräsmaskinen bearbetades blockets ovan-, under- och baksida först.

4.3 Cylinder

4.3.1 Adapterplatta

Adapterplattan svarvades ur ett 100mm råämne av kalldragen stålaxel. Operationen fick utföras i två tempon, den första med ytterkontur och undersida, varpå detaljen vändes och svarvades invändigt. För att åstadkomma det axiella samt det radella o-ringsspåret fick specialgjorda verktyg tillverkas genom att slipa till snabbstålsämnen. Efter svarvning spändes plattan fast i en fräs för att borra alla hål och gänga.



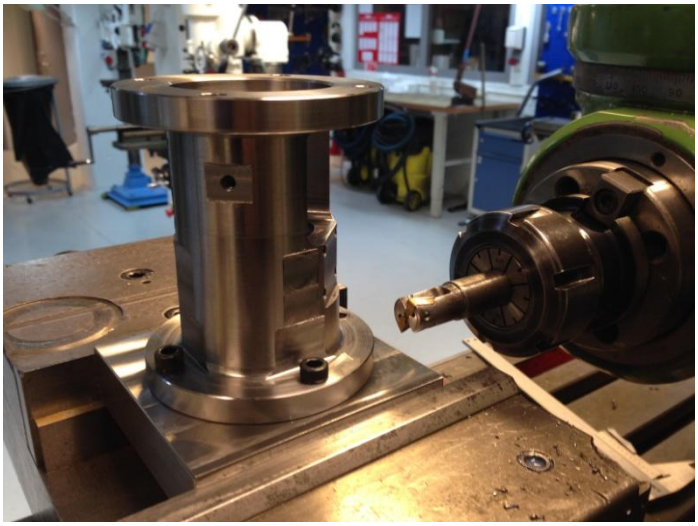
Figur 36 - Adapterplatta fastspänd i fräs med spännjärn för att borra de första hålen

4.3.2 Cylinderbas

Cylinderbasen tillverkades genom svarvning. Basen svarvades ur ett 100mm råämnde av kalldragen stålaxel. Genom att svarva detaljen i två tempon kunde hela konturen göras i ett stycke. Först svarvades nedre delen med cylinderkjol, fläns och midja samt halvvägs invändigt. Sedan vändes cylindern och spändes på den nedre skruvflänsen. Sedan kunde resten av midjan, samt övre skruvfläns, hål för adapterplatta och övrig invändig kontur svarvas. Slutligen slipades och honades cylinderloppet för att erhålla en bra yta som kolv och kolvring kan löpa i.

Efter svarvning spändes cylinderbasen fast i en fräs med spännjärn direkt mot bordet, varpå skruvhålen i den nedre flänsen borrades. Sedan vändes cylinderbasen och monterades i en fixtur i de

borrade hålen. Sedan kunde skruvhålen i den övre flänsen borras, samt sidoöppningar och övriga detaljer.



Figur 37 - Cylinderbas monterad i fixtur för fräsning vid skruvfläns

4.3.3 Stöttor

För att tillverka stöttorna användes en fräsmaskin. Det var av stor betydelse att stöttornas längd blev lika för att topplocket inte ska hamna snett vid montering. Därför frästes ett stycke till den givna längden och alla hål borrades. Sedan sågades stycket itu till fyra bitar och det sista frästes av från stöttorna. Genom att fräsa stöttorna i samma stycke blev längden i stort sett identisk. Inga avvikelser i mått på hundradels millimeter kunde mätas upp efter fräsningen.

4.3.4 Kamaxelfäste

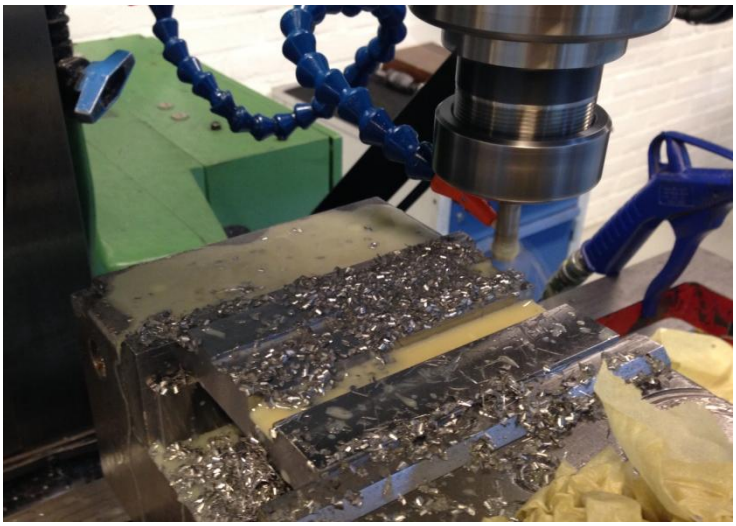
Kamaxelfästet frästes ur ett stycke stål. Föst frästes ytterkonturerna för att sedan borra de två hålen för skruvarna som drar fästet mot adapterplattan och sedan gängades hålet där skruven för kamaxelstödet ska skruvas in.

4.3.5 Shims

Till shims användes 1mm stålplåt. Då beslut togs att enbart göra ett testshims med 1mm tjocklek för att kunna montera och köra motorn gjordes bara ett shims i en tjocklek. Shimset sågades ut eftersom det inte krävdes någon stor precision på dess form. Betydande dimension var shimsets tjocklek, men övriga dimensioner behövde enbart passa kring cylinderkjolen och i hålbilden utan någon större precision. Därför räckte det med att såga ut shimset ur en plåt och borra hålbilden med extra stora hål för att det skulle passa.

4.3.6 Kamremspännare

Kamremspännaren frästes ur en 20mm stålplåt. Spännaren krävde ett flertal uppspänningar för att kunna fräsa alla former.



Figur 38 - Fräsning utav spännslidernas spår i kamremspännaren

Sliderna frästes ur stålstavar. Axlarna där spännrullarna skulle sitta svarvades, pressades i borrade hål i sliderna och svetsades sedan fast på baksidan för att garantera att de inte vandrar ut ur hålen vid belastning.

4.4 Vevhusventilation

Vevhusventilationen skrevs ut med en 3D-skrivare, MakerBot Replicator, som Chalmers prototyplabb tillhandahöll. Skrivaren skrev ut i ABS-plast genom att den la ut många tunna strängar med smält plast och succesivt byggde upp konstruktionen genom ytterligare lager plast på de undre lagren som stelnat. MakerBot Replicator, kunde inte skriva ut plast ovanför markplan utan att det fanns plastmaterial under. Därför skrev skrivaren ibland ut stödmaterial som den sedan kunde skriva den riktiga utskriften på. Det krävdes stödmaterial inuti vevhusventilationen för att skriva ut flänsarna och därför blev projektgruppen tvungen att dela vevhusventilationen i två delar för att kunna plocka ut stödmaterialet ur den utskrivna delen.

4.5 Spegelfäste

4.5.1 Spegeladapter

Spegeladaptern frästes ur en 25x25 mm stålstång. Ett rätblock med mått 21x21,77x24 mm frästes ut ur en avsågad bit. Efter det spändes biten upp med 21x21,77 sidan uppåt. Den 2 mm djupa avsatsen frästes ut och sedan 8,43 mm ytterligare på nästa avsats. Hålen borrades också i samma uppspänning. 2,8 mm faserna frästes efter vridning av skruvstycket 45 grader. Biten togs loss och spändes i kanten av skruvstycket, fräshuvudet vinklades 45 grader och den stora 45 gradersvinkeln gjordes. Slutligen spändes biten fast med den stora 45 gradersvinkeln nedåt och baksidan frästes av 45 grader. Gängorna gjordes för hand med gängtapp och 1 mm faserna gjordes med fil.

4.5.2 Spegelkonsol

Ämnen till spegelkonsolen sågades ut ur en 25 mm tjock aluminiumplatta. Yttermåtten frästes och biten spändes med spegeladapteränden uppåt. 10,4 mm avsatsen frästes och hålen borrades i samma uppspänning, 1 mm graden gjordes med fasfräs. Slutligen vreds skruvstycket 45 grader och 8.3 mm faserna frästes.

4.6 Kraftöverföring och startanordning

4.6.1 Kraftöverföring

Axeln gjordes i tre delar. Ett rör kapades ur 25x1 mm stålrör, och ändarna på röret planades av i svarven. Ändarna på axeln svarvades ur 30 mm stålstång, dessa fick göras något i undermått för att bli rena från glödskal. 20 mm hålet borrades i svarven. Ändarna pressades på axeln och punktsvetsades fast. M6 hålen borrades sedan och gängades i pelarborr.

Medbringaren på bromsen gjordes ur 60 mm stålstång i svarv. 26 mm hålet finsvarvades och 18 mm hålet brotchades för att få rätt storlek. M6 hålen borrades och gängades i pelarborrmaskin och kilspåret dragbrotchades i en hydraulpress.

Medbringaren på motorn svarvades ur 60 mm stålstång. 26 mm hålet finsvarvades. Biten sattes sedan i en delningsdocka i en fräs och fästhålen borrades samt försänktes med granlundsförsänkare.

4.6.2 Startanordning

För att startmotor skulle kunna driva behövdes en startkrans. Tillstartkrans avändes en befintlig krans som tilhandaölls av institutionen, vilket fick anpassas till applikationen. Centrum av variatorkransen fick slipas av eftersom att det satt ett härdat nav i mitten. Den spändes sedan utvändigt med hårda backar i svarven och finsvarvades invändigt upp till 57,45 mm för att passa mot medbringaren. Den pressades sedan på medbringaren och punktsvetsades fast på två punkter med TIG-svets.

Startmotorfästet sågades ut ur 30x30 mm fyrkantsrör i stål. Bottenplattan sågades ur 5 mm plåt. Hål borrades i båda ändarna av spåren i bottenplattan och materialet mellan dem filades bort. Fästplåten för motorn klipptes ut med gradsax och bockades, hål borrades sedan. Slutligen svetsades delarna samman med TIG-svets.

4.7 Montering

Efter att alla komponenter tillverkats och köpts in kunde motorn testmonteras. Först pressades alla olika lager och axlar in i vevhuset. Sedan pressades kolbult in i kolven och vevstake. Vevstaken och kolven krokades på vevtappen på vevaxeln och cylinderbasen sköts sedan ned över kolv och skruvades fast mot vevhuset. Till sist monterades glascylindern mellan adapterplattan och topplocket, och lyftes sedan ned över kolvens överdel och skruvades fast mot cylinderbasen.

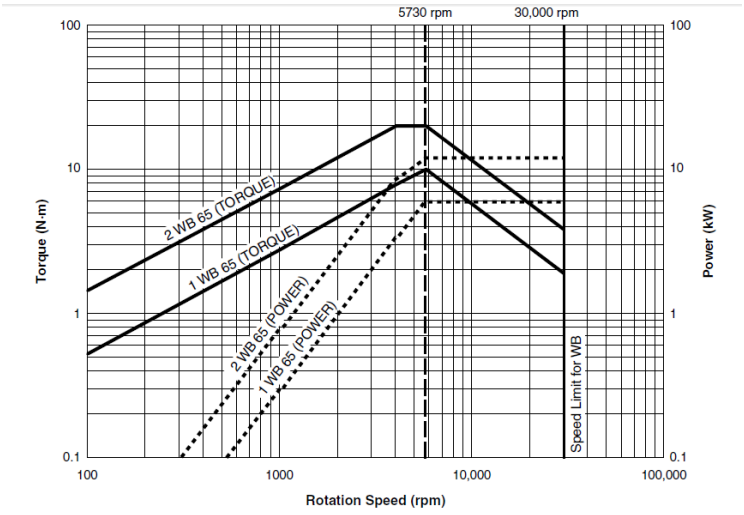
Vid testmonteringen upptäcktes inga defekter eller måttavvikelser, vilket gjorde att alla komponenter passade ihop. Vev och balansaxlar roterade bra i sina lager och kolven löpte i cylinderloppet utan att kärva. Efter en lyckad testmontering kunde motorn sedan demonteras och de olika komponenterna dokumenteras. Sedan skedde slutmontering inför testkörning där motorn monterades med alla tätningar, erforderliga åtdragningsmoment med mera.

5 Utprovning

För att testa den färdigtillverkade motorn tillhandahöll avdelningen för förbränning en dynamometer samt en testrigg. Riggen skulle sedan placeras i en motorcell för testkörning. I detta kapitel avhandlas hur dynamometern fungerar, hur den använts samt hur motorn monterats på riggen. Resultat av provkörning kan ses under 6.3, s. 47.

5.1 Dynamometer

Dynamometern används för att simulera en last på motorn och förhindra övervarvning samtidigt som den mäter vridmomentet. Dynamometern var av modell *Magtrol WB 65 (mod 1)* och fungerade enligt virvelströmsprincip. Det innebär att en pålagd spänning bygger upp ett magnetfält som då det roterar ger upphov till virvelströmmar i en omkringliggande järnkärna. Virvelströmmarna bromsar axeln och värmer samtidigt upp järnkärnan som kyls med kylvatten. Dynamometerns bromsegenskaper visas i Figur 39. Värt att notera är att låg bromsverkan fås vid låga varvtal.



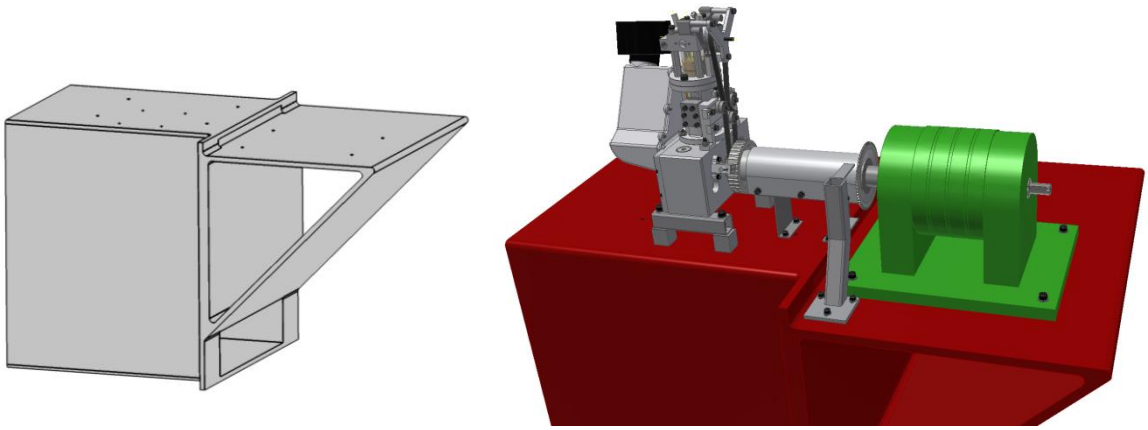
Figur 39- Maximalt vridmoment och bromseffekt som funktion av varvtal (WB/PB 65 data sheet, 2014). 1 WB 65 används i testerna

För reglering av dynamometern användes en *Magtrol DSP6001 Dynamometer Controller .* Kontrollern hade två olika regleringsmöjligheter, ett för konstant varvtal och ett för konstant vridmoment. Konstant vridmoment lämpar sig för att simulera en last, t.ex. fordonsvikt, vid såväl acceleration som statisk drift. Konstant varvtal kunde användas till att simulera olika belastningar på motorn vid givna varvtal.

Dynamometern anslöts till optikmotorn via en axel som finns beskriven i 3.7.1, s 34.

5.2 Testrigg

Förbränningsavdelningen tillhandahöll en rigg som motor och dynamometer kunde monteras på. Riggen bestod av en bänk gjord i grov stålplåt. Dynamon skruvades fast i gängade hål i bänken. Optikmotorn förseddes med gängade hål på undersidan av vevhuset där två profiler skruvades fast, varpå profilerna sedan skruvades fast i bänken i gängade hål. Övriga komponenter som axel och startmotor kunde sedan installeras.



Figur 40 - CAD-modell av testrigg

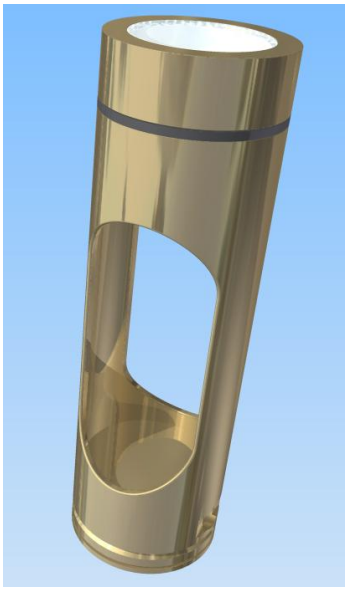
6 Resultat

I detta kapitel följer en redogörelse för hur den slutgiltiga konstruktionen kom att se ut, samt resultatet efter tillverkning, montering och testkörning. Ritningar på vissa väsentliga komponenter finns i bilagan. Komplett ritning finns att tillhandahålla hos förbränningsavdelningen.

6.1 Komponenter

6.1.1 Kolv

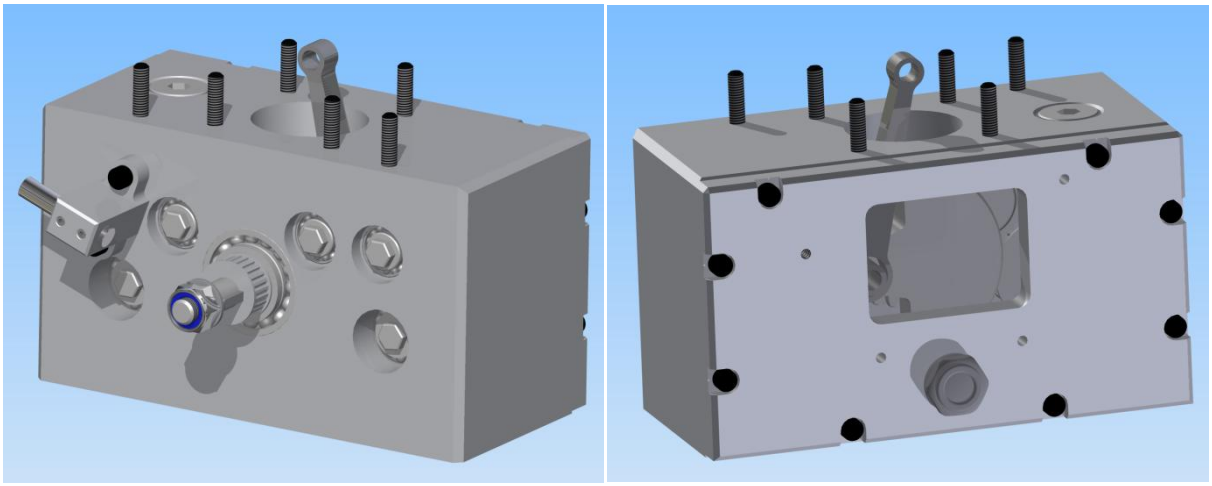
Den slutgiltiga modellen av kolven kan ses i figuren nedan.



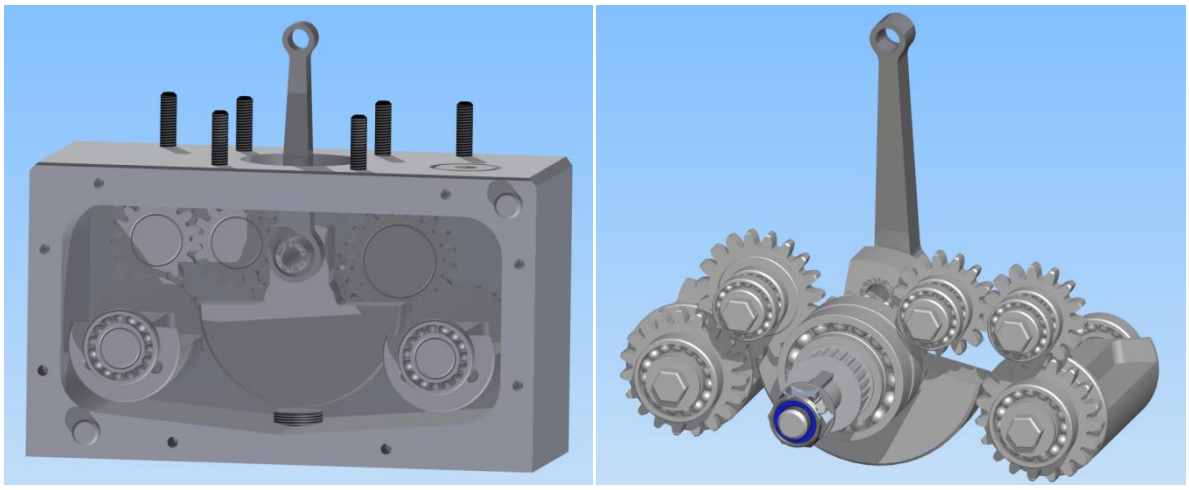
Figur 41 - Kolv

6.1.2 Vevhus, vevaxel och balansering

Den slutliga CAD-modellen av vevhuset och dess innanmäte kan ses nedan.



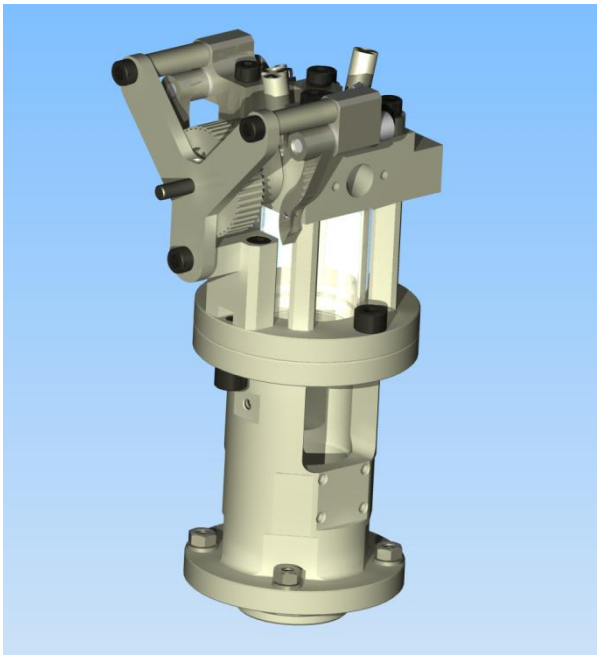
Figur 42 - Vevhusets utsida. Til vänster vevhusets framsida, till höger vevhusets baksida och täckplåt



Figur 43 - Vevhusets insida, vevaxel, vevstake, balansaxlar och balansaxeldrivning

6.1.3 Cylinder

Designandet av cylindern mynnade ut i en konstruktion som kan ses i figuren nedan. Mycket tid lades på att göra konstruktionen kompakt och monterbar. Resultatet är en konstruktion som är enkel att installera på vevhuset. Cylinderbas och överdelen kan separeras smidigt genom att lossa de fyra M8 skruvarna som låser ihop flänsarna.

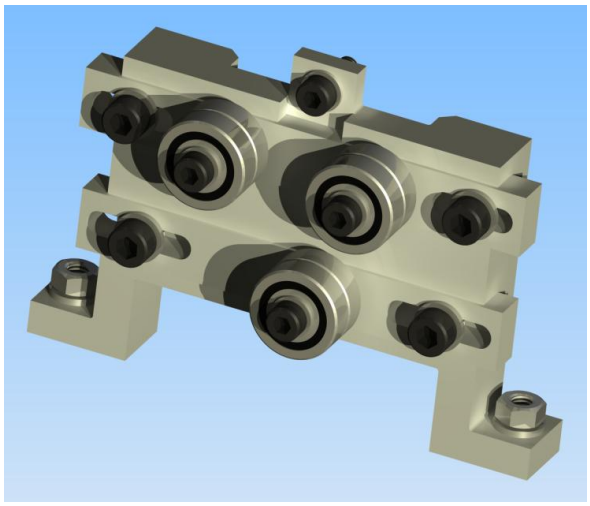


Figur 44 - Färdig CAD-modell av cylinder, med topplocket monterat

Från CAD-modellen genererades ritningar som sedan användes för tillverkningen. Tillverkningen kunde ske utan komplikationer tack vare en genomtänkt konstruktion.

6.1.4 Kamremspännare

Den slutgiltiga designen av kamremspännaren kan ses i figuren nedan. Den slutgiltiga konstruktionen gav en flexibel inställningsmöjlighet av kamremmen.



Figur 45 - Färdig CAD-modell av kamremspännare

Komponenten kunde tillverkas utan problematik efter modellen.

6.1.5 Vevhusventilation

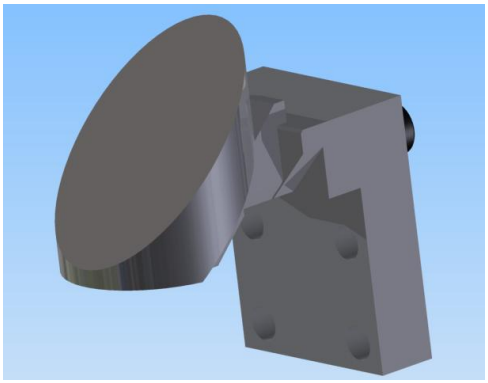
Vevhusventilationen skrevs ut i Chalmers 3D-skrivare MakerBot Replicator och resultatet blev tillfredsställande förutom några sprickor som limmades igen med epoxylim.



Figur 46 - Utskriven vevhusventilation

6.1.6 Spegel

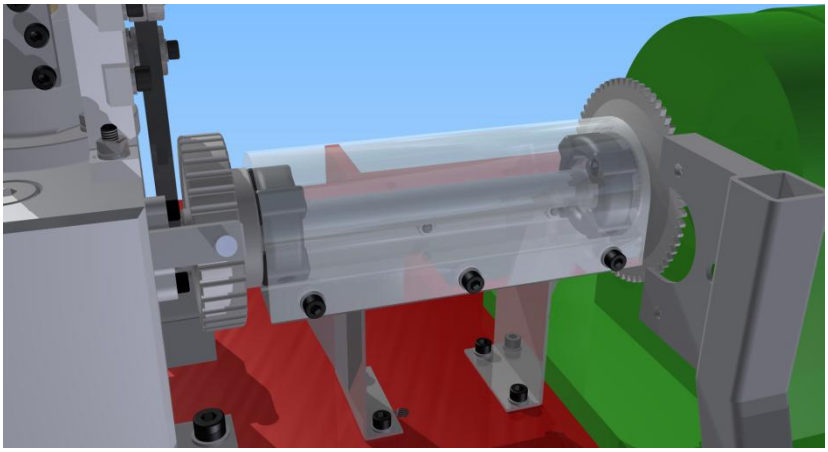
Den slutgiltiga designen på spegeln kan ses i figuren nedan.



Figur 47 - CAD-modell av spegel och spegelhållare

6.1.7 Kraftöverföring och startanordning

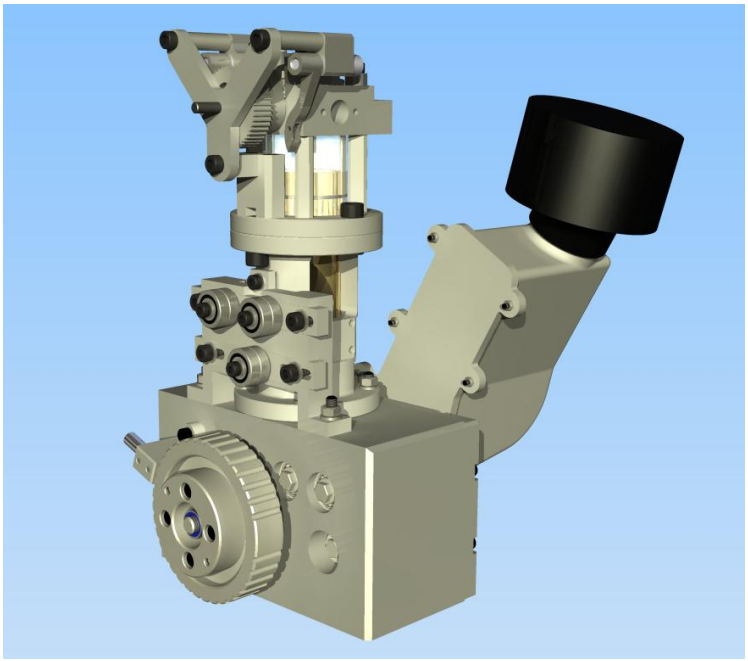
CAD-modellen över den färdiga kraftöverföringen och startmotorfästet kan ses i figuren nedan. För illustreringen har sprängskyddet gjorts genomskinligt för att kunna se axeln. Skyddet tillverkades av stålplåt.



Figur 48 - CAD-modell av kraftöverföring och startmotorfäste monterat på rigg

6.2 Motor

Den färdiga CAD-modellen kan ses i figuren nedan.



Figur 49 - Assembly av optikmotorn

Monteringen av de olika komponenterna resulterade i en komplett motor som efterliknade CAD-modellen.



Figur 50 - Bild av monterad motor

6.3 Provkörning

På grund av förseningar kunde inte provkörning av motorn utföras innan projektets avslutande. Största orsaken till förseningen var att glascylindern levererades så sent som vecka 21. Detta berodde på att sökandet av leverantörer drog ut på tiden. När väl en leverantör hittats kunde cylindern inte levereras inom tidsramen. Även tillverkningen av övriga komponenter hamnade utanför tidsplanen. Vid montering av övriga komponenter verkade dock konstruktionen lovande och en provkörning planerades efter projektavslutningen.

7 Diskussion

Genom hela konstruktions- och tillverkningsprocessen lades stor fokus på att finna svar åt de olika problemformuleringarna. Generellt togs hänsyn till tillverkningsbarheten och monterbarheten för att överhuvudtaget kunna nå fram till målet att skapa en färdig prototyp. Detta uppnåddes då dels alla delar kunde tillverkas samt monteringen av motorn genomfördes utan problem. Då konstruktionen är relativt liten var åtkomst med verktyg ett problem, särskilt vid skruvar och muttrar kring cylindern. Detta löstes med att fräsa av vissa ytor. För att kunna dra dessa skruvar med moment fick en kompromiss införas då man fick tillåta användandet av en kardanknut. Huvudet på den minsta tillgängliga momentnyckeln hade annars kolliderat med cylinderväggen. Nackdelen med en kardanknut monterad på en momentnyckel är att en viss del av momentet går förlorat.

Vid val av glasmaterial till cylindern fick anpassning göras till marknaden. Vid undersökning visade sig safiret, som användes till kolven, vara ett av de mer attraktiva materialen som fanns tillgängligt på marknaden. Dock hade en cylinder tillverkad helt i safir blivit för dyr för projektets budget. Fördelen med denna optikmotor är att den dock är relativt liten, varpå en cylinder i safir möjligen skulle kunna beställas till en rimlig summa i framtiden, jämfört med en optikmotor baserad på en personbilsmotor. Detta förutsätter att en tilverkare hittas som levererar safircylindrar, vilket inte har undersökts. Valet av material i glascylindern föll på naturlig kvarts då detta var det som kunde levereras inom given tidsram och budget. Det naturliga kvartset ger goda egenskaper i de ljusspektrum som efterfrågas men med något lägre kvalité än det syntetiska kvartset.

Till kolvtoppen kunde safirglas väljas då en leverantör av dessa kunde hittas och glasen kunde levereras till ett lämpligt pris och inom given tidsram. Safirets egenskaper har inte kunnat evalueras men med tanke på dess materialegenskaper, främst i form av värmeöverföring, så verkar materialet lovande jämfört med motsvarande glas i kvarts.

För att minimera cylinderbasens töjning vid förbränningstryck tillverkades denna av stål och gjordes robust med tjocka väggar och skruvflänsar. Kolven tillverkades av titan vilket visade sig vara det lämpligaste materialet bland de vanligaste konstruktionssmetallerna. Då motorn inte hunnit testköras kunde inte kompressionsavvikelser mätas varpå deformationer inte kunnat mätas. Kompressionsjusteringen löstes med shimsmetoden vilket visade sig vara ett bra alternativ. Då vevaxeln endast bestod av en enkel sida kunde vevstaken krokas av vevtappen utan vidare, vilket gjorde att cylinderbasen kunde lossas och lyftas upp tillsammans med kolv och vevstake. Med cylinder och kolv ur vägen kunde schimset enkelt bytas, en operation som inte behövde ta längre tid än 5 minuter.

Något som inte har hunnit testas är hur väl infästningen av glaset fungerar. I kolvtoppen användes flytande packning för att undvika metallkontakt till glaset. Hur bra denna är på att ta upp last och om det är tillräckligt för att glaset inte skall spricka återstår att se. Hur väl teflonkolvringen fungerar och hur fort den slits är också något som endast kan undersökas i drift och som är en potentiell problemkälla. Om gas läcker förbi den riskerar spegeln att bli förorenad vilket hade försämrat bildkvaliteten. Hur pass väl den nedre tätningen mellan kolv och cylinder fungerat har heller inte kunnat utvärderas, men tätningen verkade lovande när motorn drogs runt för hand.

Spegeladaptern till spegeln var något krånglig att tillverka. Möjligtvis hade den kunnat konstrueras annorlunda för att minska antalet operationer. Till exempel hade skruvhålen kunnat flyttas högre upp för att minska behovet av faser samt urfräsningen på undersidan gjorts med hjälp av flera

avsatser istället för en vinkel. Om större precision önskas vid limning av spegeln hade ett specialverktyg kunnat tas fram för att centrera spegeln.

Ett par fel upptäcktes efter tillverkning. Till exempel stämde inte motorfästets hålbild och vevhuset var inte heller centrerat på motorfästet. Detta berodde på att motorfästet inte lagts in i senare cad-itereringar, då ändringar på vevhuset hade gjorts. Fästet till startmotorn krockade också med dynamometern vid montering och fick efterjusteras. Felet berodde på att dynamometern inte hade rätt mått i CAD-modellen då den i verkligheten var bredare.

För att få vevhusventilationen att passa ihop med vevhuset skedde flera gånger diskussion med den i gruppen ansvariga för vevhuset. God monterings- och demonteringsbarhet av täckplåten på vevhuset och vevhusventilationen erhölls eftersom det går att ta av täckplåten då vevhusventilationen fortfarande är monterad på den. Tack vare valet att skriva ut vevhusventilationen i en 3D-skrivare gick tillverkningen på endast någon dag. Vevhusventilationens funktion har inte kunnat testas eftersom provkörningen uteblev. Designen verkar lovande med avseende på flöde. Praktiska prov får avslöja huruvida ventilationen klarar att separera oljan från luften.

Då vevhusets yttermått eller vikt inte var någon begränsande faktor fick de revideras ett flertal gånger under utvecklingsprocessen för att tillåta andra ändringar, exempelvis cylinderfotens diameter och det utrymme som balansaxelkonstruktionen kom att kräva. Grundformen förblev i stort oförändrad och tyngdpunkten under utvecklingen var en färdig produkt som skulle vara enkel att tillverka och underhålla. Mycket arbete ägnades åt att säkerställa enkel montering, exempelvis att skruvhål och andra detaljer placerades med god åtkomlighet, även då andra komponenter monterats på vevhuset. Tillverkningen kom emellertid att bli relativt tidskrävande då vevhuset trots enkla geometrier består av en stor mängd element. Axelavstånd och de lagerlägen där kullager skall monteras ställer stora krav på toleranser och ytfinhet vilket är tidskrävande att tillverka.

Vev- och balans- och mellanaxlar kunde tillverkas helt enligt plan. Ett stort fokus under utvecklingsarbetet var att göra så mycket som möjligt rotationssymmetriskt för att medge relativt enkla svarvoperationer samt minimera efterföljande fräsarbeten. Balanseringens funktion återstår att se vid provkörning.

8 Slutsats

Tillverkningen blev försenad vid ett flertal steg men trots detta kunde projektgruppen framställa en komplett prototyp av optikmotorn. Projektet har varit en stor utmaning på grund av dess tidsbegränsning, omfattning och komplexitet. Då tidigare erfarenheter saknats inom flera teoretiska områden såsom balansering, optiska tekniker, provkörning och ventilering har mycket tid lagts på fördjupning inom dessa områdena.

Trots att provkörning innan projektets slut uteblev anser projektgruppen att detta projekt var lyckat. En komplett optikmotor har framställts som vid projektets avslutande är startklar inför en testkörning.

Eftersom en provkörning inte hunnit ske har det varit svårt att dra slutsatser om motorns funktionsduglighet.

9 Källförteckning

Coefficient of Linerar Thermal Expansion. (u.d.). Hämtat från The Engineering Toolbox: http://www.engineeringtoolbox.com/linear-expansion-coefficients-d_95.html 2014

De Benito Sienes, E. (2014). Ph.D student. (K. Clasén, Intervjuare)

Denbratt, I., & Andersson, S. (1999). *Piston Engine Mechanics.* Göteborg: Department of Applied Mechanics, Combustion Division, Chalmers University of Technology.

Edmund Optics. (2014). *Sapphire Windows*. Hämtat från Edmund Optics: http://www.edmundoptics.com/optics/windows-diffusers/ultraviolet-uv-infrared-ir-windows/sapphire-windows/1904 2014

Hung, D. L., Chen, H., Xu, M., Yang, J., & Zhuang, H. (2013). *Experimental Investigation of the Variations of Early Flame Development in a Spark-Ignition Direct-Injection Optical Engine*. Hämtat från ASME Diagtal Collection: http://gasturbinespower.asmedigitalcollection.asme.org/article.aspx?articleid=1852174#Introduction

Johansson, A. (2014). Ph.D student. (K. Clasén, Intervjuare)

Kashdan, J., & Thirouard, B. (2011). *Optical Engines as Representative Tools in the Development of New Combustion Engine Concepts.* IFP Energies nouvelles.

Loctite. (2014). *Loctite Power Epoxy Universal*. Hämtat från Loctite consumer: http://www.loctite-consumer.se/en/products/epoxies/power-epoxy-universal-tube.html 2014

Lotus Cars. (2014). Hämtat från Optical Engine: http://www.lotuscars.com/gb/optical-engine

Lovejoy Torsional Catalogue 2010. (2010). Hämtat från Lovejoy Inc: http://www.lovejoy-inc.com/products/torsional-couplings.aspx 2014

Make your own air/oil separator. (u.d.). Hämtat från http://www.y8s.com/celica_gone/air-oil/ 2014

Malmqvist, J., Young, P. W., Hallström, S., Kuttenkeuler, J., & Svensson, T. (2004). *CDIO, conceive design implement.* Hämtat från Lessons Learned from Design-Build Test-Based Project Courses: http://www.cdio.org/files/document/file/lessonslrnd_db.pdf

Metallic Mirror Coatings. (u.d.). Hämtat från Edmund Optics Worldwide: http://www.edmundoptics.com/technical-resources-center/optics/metallic-mirror-coatings/. 2014

Optical Diagnostics. (2014). Hämtat från IFP energies nouvelles: http://www.ifpenergiesnouvelles.com/developpement-industriel/moteurs/comprehension-de-la-combustion/diagnostics-optiques 2014

SKF. (2005). *SKF General Catalogue.*

WB/PB 65 data sheet. (May 2014). Hämtat från Magtrol: http://www.magtrol.com/datasheets/wbpb65.pdf 2014

White. (2011). Fluid Mechanics.

Wikipedia. (2014). Hämtat från Thermal Expansion: http://en.wikipedia.org/wiki/Thermal_expansion

10 Bilagor

För ritningar, kontakta projektgruppen.