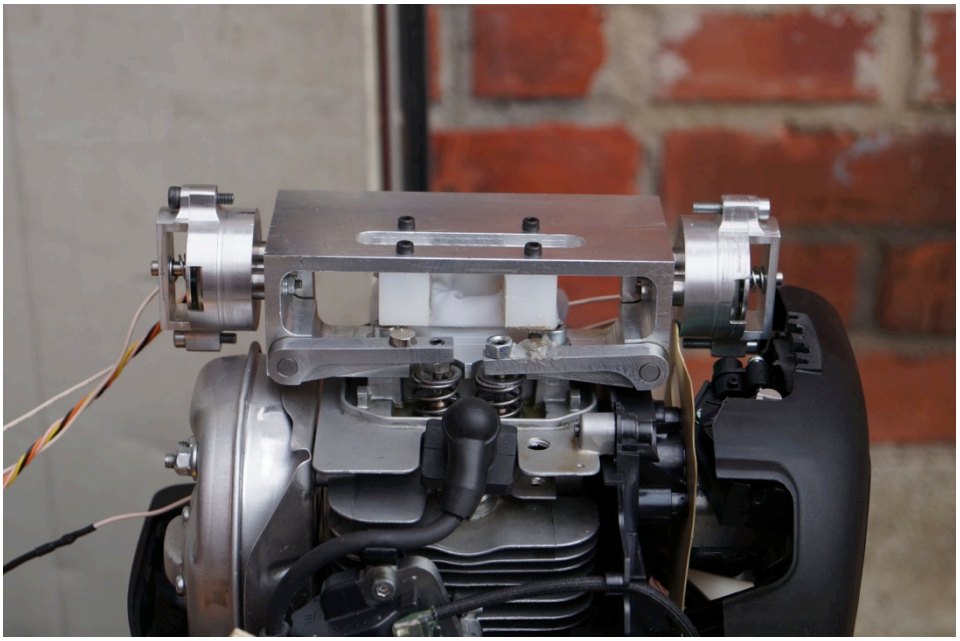
CHALMERS



Utveckling av aktiv ventilstyrning till förbränningsmotor för Chalmers Eco Marathon

Kandidatarbete inom Tillämpad mekanik

ERIK ANDERSSON
VICTOR HERMANSSON
OSCAR KRUSELL
GUSTAV SERNSTAD

Institutionen för Tillämpad mekanik
Avdelningen för förbränning
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA
Göteborg, Sverige 2013
Kandidatarbete/rapport nr 2013:07

KANDIDATARBETE 2013:07

Utveckling av aktiv ventilstyrning till förbränningsmotor för Chalmers Eco Marathon

Kandidatarbete inom Tillämpad mekanik

ERIK ANDERSSON

VICTOR HERMANSSON

OSCAR KRUSELL

GUSTAV SERNSTAD

Institutionen för Tillämpad mekanik
Avdelningen för förbränning
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA
Göteborg, Sverige 2013

Utveckling av aktiv ventilstyrning till förbränningsmotor för Chalmers Eco Marathon
Kandidatarbete inom Tillämpad mekanik

ERIK ANDERSSON
VICTOR HERMANSSON
OSCAR KRUSELL
GUSTAV SERNSTAD

Handledare: Anders Johansson
Examinator: Docent Sven Andersson

© ERIK ANDERSSON, VICTOR HERMANSSON, OSCAR KRUSELL, GUSTAV SERNSTAD, 2013

Kandidatarbete 2013:07
ISSN 1654-4676
Institutionen för Tillämpad mekanik
Avdelningen för förbränning
Chalmers tekniska högskola
SE-412 96 Göteborg
Sverige
Telefon: + 46 (0)31-772 1000

Omslag:
Solenoidaktuerad ventilstyrning monterad på förbränningsmotor.

Chalmers reproservice/Institutionen för Tillämpad mekanik
Göteborg, Sverige 2013

Förord

Kandidatarbetet har utförts vid institutionen Tillämpad mekanik på Chalmers tekniska högskola, i anslutning till projektet Chalmers Eco Marathon. Examinator för arbetet var docent Sven Andersson och handledare Anders Johansson.

Vi har fått stöd och uppmuntran av många i vår omgivning. Vi vill tacka doktorand Anders Johansson för uppföljning, goda råd och en fantastisk förmåga att kunna besvara våra frågor. Anders hjälp med alla praktiska detaljer såsom mätutrustning och verktyg har varit avgörande för arbetets resultat. Ett stort tack förtjänar Jan Bragée och Reine Nohlborg i verkstaden som gjort det möjligt för oss att tillverka alla mekaniska komponenter. Dessutom vill vi tacka docent Sven Andersson för goda råd. Vi vill också skicka en tackhälsning till Urban Carlson på Cargine för ett mycket givande studiebesök som gav inspiration och många tips.

Abstract

The thesis is part of a series of development project whose purpose is to achieve higher fuel efficiency over a larger range of RPM in the engine that is used in Chalmers Eco Marathon, with use of free valve technology. The purpose of this thesis is to develop a technical solution for running an engine with free valves. The work has resulted in an application of free valves on an existing engine. The engine runs without any mechanical connection between valves and crankshaft. The valve curves are not optimized. The demand in this project is that the valves shall open and close in time to make the engine run. Hence the valve curves are similar to the engines existing valve curves with no variation in valve duration. The practical result of the work is a mechatronic system where software controls processors and electronics, which control a mechanical system, which controls the valves. The procedure has been characterized by studies of literature of similar works with free valve technology, calculations and simulations. Later on the work has been characterized by practical tests where partial results, both successful and unsuccessful, have influenced the continued work in the right direction.

Sammanfattning

Arbetet utgör första delen i en utvecklingsserie vars mål är att med hjälp av aktiv ventilstyrning uppnå en högre bränsleeffektivitet över ett större varvtalsområde i den motor som används i Chalmers Eco Marathon. Det här arbetets syfte är att ta fram en teknisk lösning för att kunna köra motorn med fria ventiler. Arbetet har resulterat i en applicering av fria ventiler på en befintlig förbränningsmotor, där motorn fungerar att köra utan mekaniskt samband mellan ventiler och vevaxel.

Det har inte lagts fokus på att optimera ventilkurvorna i det här projektet. Ventilerna ska endast öppna och stänga i rätt tidpunkt för att motorn ska vara körbar. Således efterliknar ventilkurvorna motorns befintliga ventilkurvor med avseende på att de inte varierar beroende på varvtal. Arbetets praktiska resultat är ett mekatroniskt system där programvara styr processor och elektronik som påverkar ett mekaniskt system, som i sin tur påverkar ventilerna. Tillvägagångssättet har inledningsvis präglats av litteraturstudier från liknande arbeten med aktiv ventilstyrning följt av beräkningar och simuleringar för att efterhand ha övergått till övervägande praktiska metoder. Delresultat, såväl misslyckade som lyckade har påverkat det fortsatta arbetet i rätt riktning.

Innehållsförteckning

1 Inledning ... 1

1.1 Bakgrund ... 1
1.1.1 Shell Eco Marathon ... 2
1.2 Syfte ... 2
1.2.1 Projektmål ... 2
1.3 Problemdefinition ... 2
1.4 Tidigare arbeten ... 3
1.4.1 David Bowes ... 3
1.5 Avgränsningar ... 4
2 Teori ... 6

2.1 Förbränningsmotor ... 6
2.1.1 Ventilstyrning ... 7
2.1.2 Aktiv ventilstyrning ... 8
2.2 Solenoider ... 9
2.3 Elektronik och styrsystem ... 11
2.3.1 PWM-styrning ... 11
3 Genomförande ... 12

3.1 Val av solenoider ... 12
3.1.1 Beräkningar av solenoidkraft vid ventilöppning ... 12
3.1.2 Hållkraft och öppningskraft ... 15
3.1.3 Driftscykel ... 15
3.2 Design av mekaniskt ventilstyrningssystem ... 16
3.2.1 Designkriterier för mekaniskt ventilstyrningssystem ... 17
3.3 Design av provningsutrustning ... 18
3.3.1 Designkriterier för provningsutrustning: ... 18
3.4 Spänning till solenoiderna ... 18
3.5 Tidsberäkning för solenoider ... 19
3.5.1 Respons-, öppnings- och stängningstid ... 19
3.5.2 Position för signal om öppning och stängning av ventiler ... 20
3.6 Design av styrsystem ... 21
3.6.1 Kretsar ... 23
3.6.2 Ventillägesgivare ... 24
3.6.3 Positionssensor ... 25
3.6.4 Mikrokontroller ... 25
3.6.5 Program ... **Error! Bookmark not defined.**
3.7 Provning och utvärdering ... 27
4 Resultat ... 28

4.1 Val av solenoider ... 28
4.1.1 Beräkningar av solenoidkraft vid ventilöppning ... 28
4.1.2 Hållkraft ... 30

4.2 Mekaniskt system ... 32
4.2.1 Honda GX-35 motor ... 33
4.2.2 Vipparmar ... 33
4.2.3 Axlar ... 34
4.2.4 Konsol ... 35
4.2.5 Solenoidhållare ... 36
4.2.6 Triggerhjul ... 36
4.3 Spänning och tidsberäkning för solenoider ... 36
4.4 Styrsystem ... 37
4.4.1 Kretsar ... 37
4.4.2 Program ... 38
4.5 Provning och utvärdering ... 42
5 Diskussion ... 44
5.1 Val av solenoider och responstid ... 44
5.2 Mekanisk konstruktion ... 44
5.2.1 Missljud ... 44
5.3 Elektronik och styrsystem ... 45
6 Slutsats och rekommendationer ... 46
7 Litteraturförteckning ... 47

Förkortningslista

BDC - bottom dead center (nedre vändläge)
CAD - computer aided design (datorstödd design)
FEM - finita elementmetoden
FFF – friformsframställning (Rapid prototyping)
PWM - pulse width modulation (pulsbreddsmodulering)
RPM - revolutions per minute (varv per minut)
TDC - top dead center (övre vändläge)

1 Inledning

1.1 Bakgrund

Sommaren 2010 utvecklades och byggdes på Chalmers en bensindriven förbränningsmotor för att användas i Shell Eco Marathon. Motorn är monterad i Vera, vilket är namnet på den bil som Chalmers använder sig av i tävlingen. Motorns gasväxlingssystem, det vill säga hur luft flödar in i cylindern och hur avgaser flödar ut, bygger på konventionell tvåventilsteknik där en kamaxel styr ventiler mekaniskt. Ventilerna sitter i insugs- respektive avgaskanalens mynning till cylindern och sluter tätt mellan cylinder och kanal i stängt läge. Ventilen öppnas genom att förskjutas nedåt, in i cylindern. Då kan färskgaser respektive avgaser flöda in i respektive ut ur cylindern. Ventilen förskjuts genom att en kamlob på kamaxeln verkar på ventilskaftet, antingen direktverkande eller via någon typ av länkage. En mer ingående beskrivning av förbränningsmotorn ges i stycket *"2.1 Förbränningsmotor".*

Detta konventionella system medför att ventilernas lyftkurvor är identiska över motorns hela varvtalsregister, vilket inte är optimalt för motorns effekt och bränsleförbrukning. Det är en kompromiss, som på de flesta motorer innebär att bränsleförbrukningen vid låga varvtal blir hög för att hög effekt ska kunna uppnås vid höga varvtal.

Ett gasväxlingssystem som tillåter att ventilernas lyftkurvor kan variera för olika varvtal har potential att ge vinster både gällande effekt och bränsleförbrukning. Idag finns system som kan växla mellan olika lyftkurvor, exempelvis Vanos från BMW och VTEC från Honda tillgängliga på marknaden. Det existerar dock inget system som kan leverera helt justerbara lyftkurvor.

Det finns olika tänkbara lösningar för att leverera helt justerbara lyftkurvor. Samtliga lösningar bygger på att ventilerna är mekaniskt frikopplade från vevaxeln, vilket inte är fallet i ett konventionellt system där ventilerna styrs genom en mekanisk koppling mellan vevaxel och kamaxel. För aktuering av ventilerna i det frikopplade systemet används istället pneumatik, hydraulik eller elektromekanik i kombination med olika sensorsystem för positionsbestämning.

I det aktuella projektet används ett elektromekaniskt system för aktuering av ventilerna, då förstudier som utförts inom Chalmers ECO Marathon visat att denna lösning är enklast att implementera på vald applikation. Systemet består av solenoider för aktuering av ventilerna i kombination med en elektronisk styrning. En solenoid är en elektrisk manövermagnet som omvandlar elektrisk

energi till mekanisk genom att utnyttja det magnetfält som skapas när en spole lindad runt en järnkärna strömsätts.

1.1.1 Shell Eco Marathon

Shell Eco Marathon är en tävling där studenter från olika tekniska universitet och högskolor tävlar om att köra så långt som möjligt på en liter bensin. Det finns två tävlingsklasser, Prototype och Urban Concept. I varje klass finns sedan indelningar beroende på vilket bränsle bilen använder, till exempel bensin, diesel, väte/bränslecell samt solkraft. Chalmers bidrag i prototypklassen kallas Vera och har under flera år utvecklats på Chalmers. Vera använder en egenkonstruerad bensinmotor för framdrift.

Tävlingen går ut på att varje bil kör ett visst antal varv på en bana, varje varv innehåller ett start-/stoppmoment. Körningen ska slutföras inom en förutbestämd tid. När körningen är avklarad mäts förbrukad bränslemängd och längsta möjliga distans för en liter bränsle räknas ut. Vinnaren är den som kan komma längst på en liter bränsle. Bränsleeffektiviteten hos fordonet är avgörande för lagets resultat i tävlingen (Shell 2013).

Under tävlingen används motorn för att accelerera bilen upp till marschfart, motorn stängs därefter av och bilen rullar sedan utan motorkraft till dess att hastigheten minskat till ett förutbestämt gränsvärde. Därefter startas motorn igen och cykeln upprepas. Motorn körs i cykler med 5-7 sekunders drift, följt av en lång period avstängd. Motorn saknar gasspjäll och är optimerad för att köras med hög belastning under korta perioder.

1.2 Syfte

Detta arbete är början på en utvecklingsserie inom aktiv ventilstyrning där syftet är att uppnå en högre bränsleeffektivitet över ett större varvtalsområde för den nuvarande motorn i Vera. Under det här projektet ligger inte fokus på att uppnå högre bränsleeffektivitet utan att ta fram en teknisk lösning för att kunna styra ventilerna fritt. Därefter tar nästa projekt över för att optimera med avseende på bränsleeffektivitet och för att implementera systemet i Verabilen.

1.2.1 Projektmål

Målet är att ta fram en fungerande prototyp till en aktiv ventilstyrning för en förbränningsmotor. Prototypen ska monteras på en förbränningsmotor och ersätta den nuvarande ventilstyrningen, ventilerna ska öppna och stänga enligt givna signaler beroende på varvtal och fungera under förbränning.

1.3 Problemdefinition

Rapporten behandlar ett mekatroniskt problem som omfattar mekanisk konstruktion av ventilstyrningen samt design av ett elektroniskt styrsystem med egenutvecklad programvara. Problemet kan brytas ned i följande punkter för att

lättare åskådliggöra vilka delproblem som behöver behandlas för att nå projektmålet.

- Beräkna erfordrad kraft för öppning och öppethållning av ventiler.
- Välja aktuatorer baserat på erfordrad kraft, det vill säga val av solenoider.
- Designa och tillverka ett mekaniskt system för ventilstyrning.
- Mäta upp responstid på aktuatorerna givet den mekaniska belastningen.
- Designa och tillverka ett styrsystem innehållandes elektriska komponenter och ett styrprogram.
- Prova och utvärdera systemet samt ge rekommendationer för fortsatt utveckling.

Projektet är uppbyggt utifrån dessa punkter och även rapportens metod och resultatdel följer denna logik. Beräkningarna ger en uppfattning om vilka krafter som erfordras för att accelerera ventilen och hålla den öppen. Utifrån dessa värden framställs en kravspecifikation för inköp av aktuatorer.

Utvecklingen av det mekaniska systemet och elektronik sker parallellt med inledande beräkningar och val av aktuatorer. När mekaniska komponenter och elektronik tillverkats utvärderas systemets responstid för aktuering av ventilerna. Dessa mätdata används sedan i programmeringen av styrsystemet. Slutligen kommer det mekaniska och det elektroniska systemet att implementeras på motorn och det kompletta systemet justeras för att ge en tillfredsställande drift.

1.4 Tidigare arbeten

1.4.1 David Bowes

David Bowes är en kanadensisk elektroingenjör som har arbetat mycket med aktiv ventilstyrning. Bowes arbete har resulterat i ett flertal publikationer, bland annat i form av studentguider för att uppmuntra andra till fortsatt utveckling av aktiv ventilstyrning (Bowes 2005). Bowes använder ett elektromekaniskt system, med solenoider som styr ventilernas öppning och stängning. Systemet har applicerats på små förbränningsmotorer i storleken 12,5 cm^3. Med denna teknik har Bowes lyckats köra ett flertal motorer och framgångsrikt implementerat dessa i olika applikationer. I publikationerna diskuteras ett antal problem med aktiv ventilstyrning, och lösningsförslag till grundläggande problem ges. Bland annat belyses vikten av att ha en så liten rörlig massa i det mekaniska systemet som möjligt samt en kort slaglängd på solenoiderna för att minimera responstiden för systemet. Begreppet responstid behandlas under rubriken *”2.2 Solenoider”*. Låg responstid hos solenoiderna underlättar vid styrning av öppnings- och stängningstider hos ventilerna. Ett annat problem som nämns är

svårigheten att stänga ventilerna mjukt mot ventilsätena, det vill säga retardera ventilhastigheten vid stängning. Hos en traditionell motor med kamaxel är kamloben utformad så att ventilen saktar in precis innan den stänger och därmed stänger mjukt. Med ett solenoidstyrt system utan dämpning sker ingen sådan retardation. Ventilerna och ventilsätena kan ta skada och mekaniskt oljud uppkommer. För att lösa problemet använder Bowes solenoiden som broms för att minska hastigheten när ventilen närmar sig ventilsätet.

"Also required is the ability to accurately control the valve position to achieve the desired valve timing, to soft land the valves to prevent physical damage and to eliminate excessive audio noise. I believe these issues, rather than the cost or reliability of the basic simple system, are keeping solenoid actuated valves out of automotive engines" (Bowes 2005).

1.5 Avgränsningar

Aktuatortekniken som ska användas för att styra ventilerna är elektriska solenoider, vilket bestämdes redan innan projektstarten. Anledningen är att solenoiderna är lätta att implementera mekaniskt och styra jämfört med en lösning som bygger på hydraulik eller pneumatik. Dessutom finns det mycket material att tillgå i form av David Bowes tidigare arbeten med ventilstyrning (Bowes 2005). I denna rapport undersöks därför inte alternativa lösningar för öppning och stängning av ventiler.

Resultatet av detta arbete är endast tänkt att fungera i labbmiljö, ventilstyrningen ska inte i detta inledande skede monteras i Vera. Mer information om Vera finns i stycket *"1.1.1 Shell Eco Marathon".* Motorn som ventilstyrningen monteras på ska enbart köras i en testrigg. Detta innebär att det inte finns några begränsningar gällande storlek, strömförsörjning och kylning av ventilstyrningen vilka annars kan vara begränsande faktorer under verkliga driftsförhållanden. För denna prototyp används extern strömförsörjning vilket medför stor frihet att kunna välja ström och spänning jämfört med montering i Vera där strömförsörjningen är begränsad till batteriet i bilen.

I Verabilen används en motor som har tagits fram på Chalmers (Johansson, Thulin 2010). Möjligheten att använda denna motor är begränsad då endast en komplett motor tillverkats. Denna motor används i tävlingsbilen och möjligheten att tävla med bilen skulle äventyras av ett eventuellt motorhaveri under utvecklingsarbetet av ventilstyrningen. För utvecklingen av den aktiva ventilstyrningen används istället en Honda GX35-motor. Motorn har tidigare använts i Vera och tillgången på reservdelar och kunnande om motorn är därför god. Utformningen av ventilstyrningen är snarlik den som används i Veramotorn med enkel överliggande kamaxel och kamrem som mekanisk koppling mellan vevaxel och kamaxel. Principen för styrtekniken blir således densamma för de

båda motorerna, det är mekaniken som behöver modifieras för att sedan kunna användas på Veramotorn.

2 Teori

Detta avsnitt syftar till att ge en grundläggande förståelse för hur en bensinmotor fungerar och teorin bakom ventilstyrning, både aktiv och dagens teknik. Även viss teori om elektronik som är nödvändig att förstå kommer att behandlas.

2.1 Förbränningsmotor

De två vanligaste förbränningsmotorerna är diesel- och bensinmotorn. En förbränningsmotor omvandlar kemiskt bunden energi, t.ex. i bensin till mekanisk energi. Den mekaniska energin driver runt hjulen på bilen och får den att röra på sig. Kraftkällan i Vera är en bensinmotor som jobbar enligt fyrtaktsprincipen, se figur 2-1. En fyrtaktsmotors arbetscykel består av följande fyra faser:

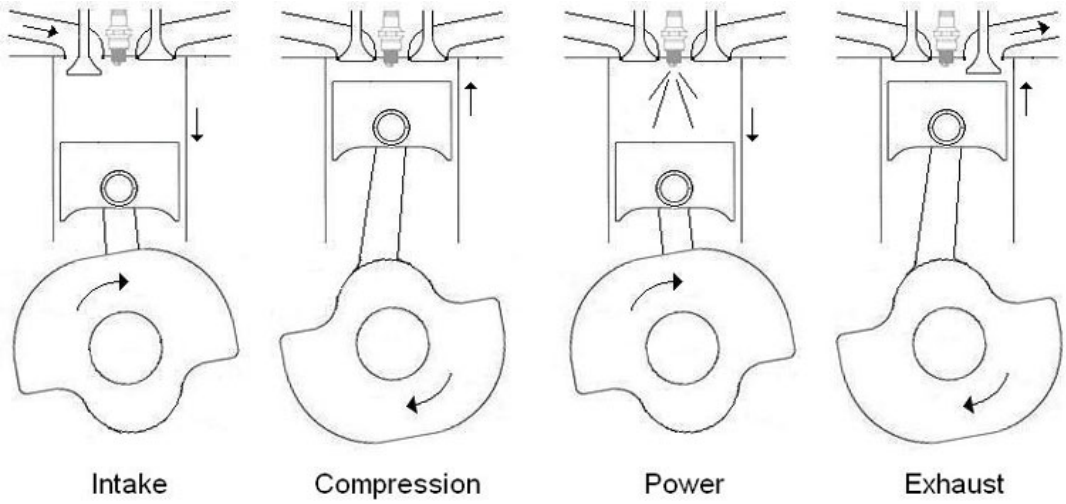
- Insugstakt

  Kolven går från övre vändläge till undre vändläge (TDC till BDC), insugsventilen är öppen och avgasventilen är stängd. Färskgaserna sugs in cylindern genom insugsventilen på grund av undertrycket i cylindern.
- Kompressionstakt

  Kolven går från undre vändläge till övre vändläge, båda ventilerna är stängda. När kolven rör sig uppåt komprimeras färskgaserna.
- Arbetstakt

  De komprimerade färskgaserna antänds av en gnista från ett tändstift, förbränningen ger en tryckökning på grund av värmeutvecklingen som får kolven att röra sig nedåt igen och mekaniskt arbete kan överföras från en utgående axel, vevaxeln, till omgivningen. Under arbetstakten är både insugs- och avgasventilen stängda.
- Avgastakt

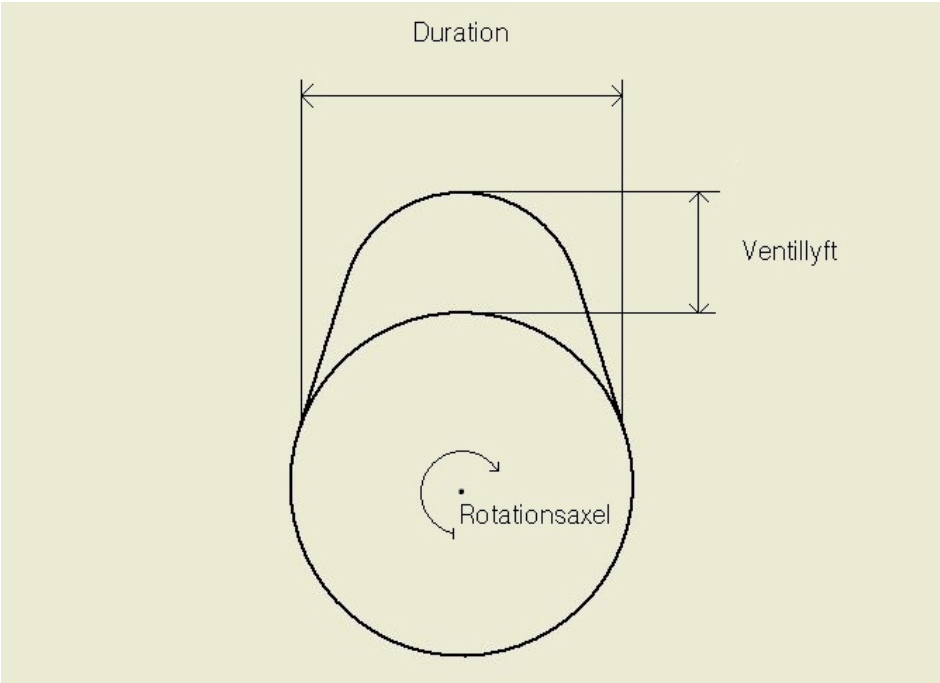
  När kolven når sitt undre vändläge efter arbetstakten börjar den röra sig uppåt igen, avgasventilen öppnas och avgaserna kan strömma ut genom avgasventilen när kolven trycker avgaserna uppåt. När kolven når sitt övre vändläge är alla fyra takter avklarade och motorn kan påbörja en ny cykel med insugstakten.



Figur 2-1 Fyrtaktsmotorns fyra olika takter

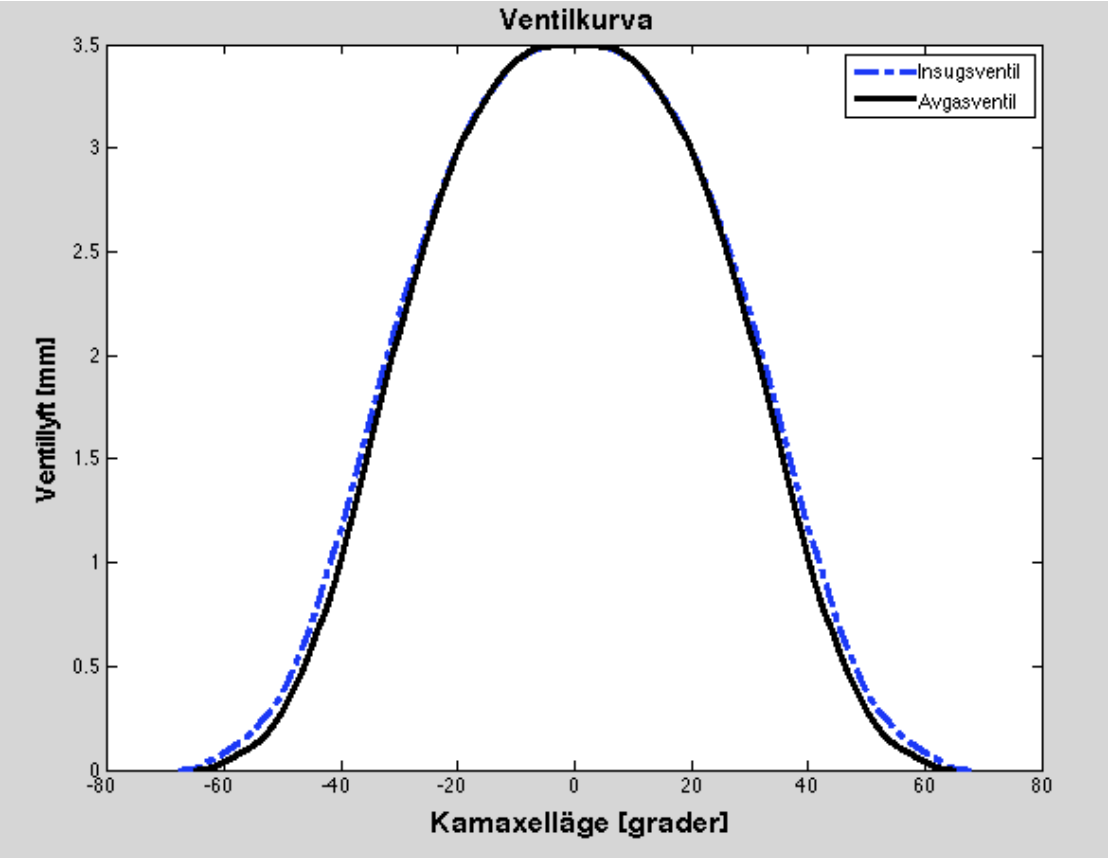
2.1.1 Ventilstyrning

De fyra arbetstakterna kräver två varv eller 720° rotation på vevaxeln. Att ange motorns läge i grader förenklar förståelsen för var i arbetscykeln motorn befinner sig. Vevaxeln är mekaniskt förbunden med en kamaxel som i sin tur styr ventilerna. Utväxlingen mellan vevaxeln och kamaxeln är 2:1 vilket innebär att vinkelhastigheten på kamaxeln är hälften av den på vevaxeln, detta för att möjliggöra att insugs- och avgasventilerna endast är öppna en gång på två vevaxelvarv. På kamaxeln finns en eller flera kamlober som mekaniskt verkar på ventilerna, antingen direkt eller via ett länkage. Det är kamlobens utformning som styr ventilens rörelse, utformningen benämns kamprofil. Figur 2-2 visar hur en kamlob är utformad. Två viktiga faktorer att ta hänsyn till vid utformningen av kamprofilen är ventillyft och duration.



Figur 2-2 Kamaxelprofil

Duration mäts i grader och är ett mått på antalet grader på vevaxeln som ventilen är öppen. Durationen bestämmer alltså hur stor del av en arbetscykel ventilen är öppen. Med ventillyft avses hur långt ventiltallriken befinner sig från ventilsätet vid full öppning. En lyftkurva för en viss kamprofil kan tas fram genom att plotta ventillyftet mot vevaxelgrader eller kamaxelgrader. Figur 2-3 visar hur ventilkurvan ser ut för kamaxeln på Veramotorn. Då kamprofilen inte går att justera under drift medför detta att duration och ventillyft inte kan varieras beroende på varvtal. Kamprofilen är en kompromiss där det i förväg bestämts för vilket varvtal motorn är optimerad.



Figur 2-3 Ventilkurva för Veramotorn

2.1.2 Aktiv ventilstyrning

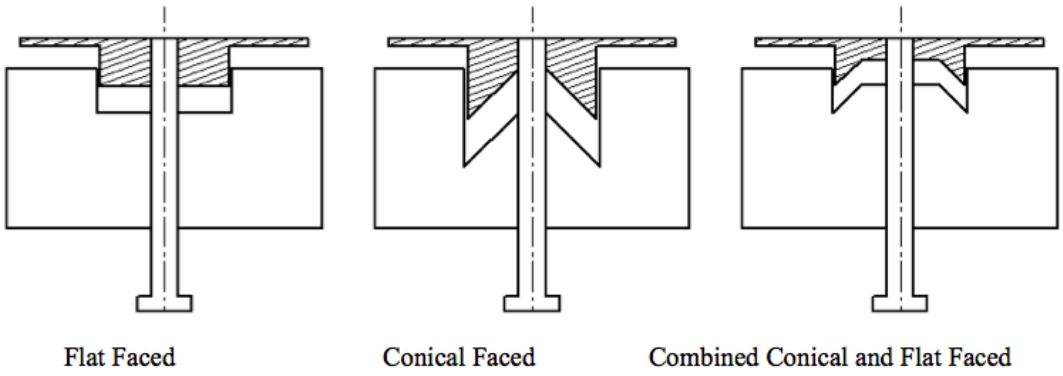
Aktiv ventilstyrning, eller fria ventiler bygger på att ventilerna är mekaniskt frikopplade från vevaxeln. Fördelen med denna teknik är att ventilernas duration kan varieras för att passa rådande driftsförhållanden. Genom att variera ventilernas duration går det att optimera fyllnadsgraden i cylindern. Fyllnadsgraden är ett mått på hur mycket luft i förhållande till cylindervolym som fylls upp i cylindern. Med fasta mekaniska kamaxlar kan inte durationen ändras och motorn blir därför optimerad för ett specifikt varvtal och verkningsgraden blir lägre för det övriga varvtalsområdet.

Med helt fria ventiler går det att uppnå en hög fyllnadsgrad över hela varvtalsregistret på grund av att durationen kan varieras och därmed öka

verkningsgraden. Ventilerna öppnas och stängs med någon typ av aktuator som kontrolleras av en styrenhet. Svårigheten med denna teknik är avsaknaden av mekanisk koppling mellan vevaxel och ventiler vilket kräver ett sofistikerat styrsystem som tillser att ventilöppningen inte hamnar ur fas i förhållande till vevaxelns position. I det fall ventilernas öppning och stängning hamnar ur fas i förhållande till vevaxelns läge finns risk för att motorn inte arbetar optimalt eller i värsta fall skadas.

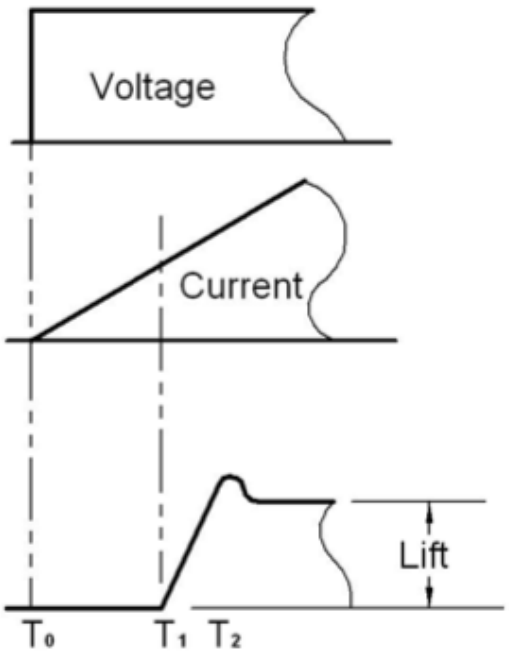
2.2 Solenoider

Solenoider finns i olika varianter och utföranden. En vanlig typ är push-pull-solenoiden, den kan påverka med en tryckande eller dragande kraft. Slaglängden på solenoiden, det vill säga hur långt den kan trycka bestäms av hur stort luftgapet är. Utformningen vid luftgapet kan vara platt, koniskt eller en kombination av dessa, se figur 2-4. En platt utformning ger en större kraft vid korta slaglängder och en konisk utformning ger större kraft vid långa slaglängder.



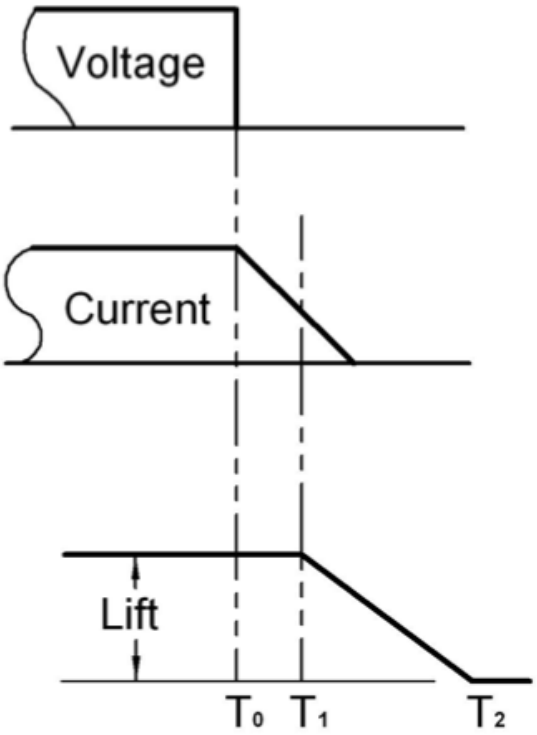
Figur 2-4 Olika utformning av solenoider (Bowes 2005)

Figur 2-5 visar en idealiserad bild över hur en solenoid fungerar. En spänning läggs på över solenoidspolen vid tiden T_0. På grund av spolens induktans är strömmen genom spolen noll vid T_0. Hastigheten med vilken strömmen i spolen ökar beror på pålagd spänning, samt spolens resistans och induktans. Solenoiden aktueras då magnetfältet som genereras av strömmen ger upphov till en tillräckligt hög kraft för att accelerera solenoidens tryckstång, T_1. Tiden mellan T_0 och T_1, det vill säga tiden mellan pålagd spänning och aktuering benämns öppningsresponstid.



Figur 2-5 Idealiserad bild av hur en solenoid fungerar (Bowes 2005)

Figur 2-6 visar vad som händer då spänningen tas bort över solenoiden. Hastigheten med vilken strömmen avtar beror på solenoidens magnetiska egenskaper och utformningen på solenoidens drivkrets. T_0 betecknar när spänningen tas bort och T_1 när solenoidarmaturen trycks tillbaka av den motverkande kraften, i detta fall en ventilfjäder. Tiden mellan T_0 och T_1 benämns stängningsresponstid.

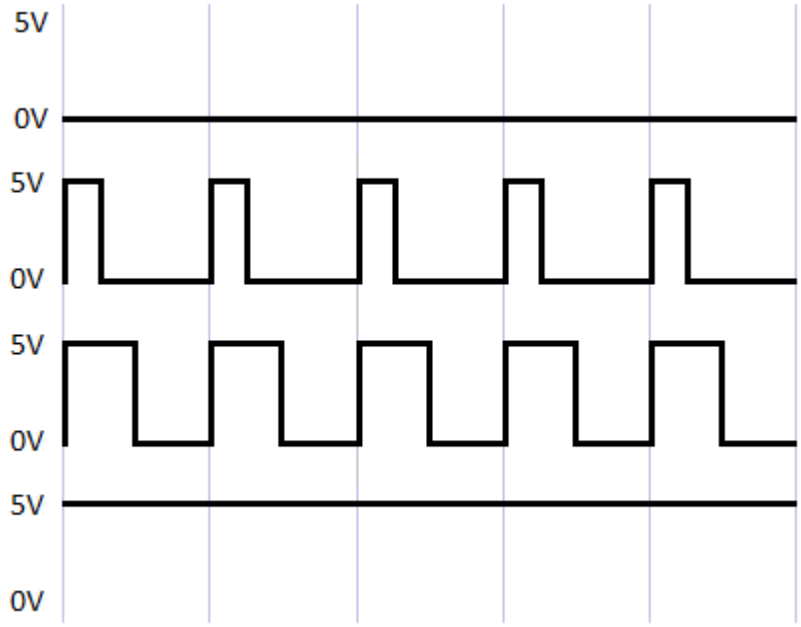


Figur 2-6 Idealiserad bild av hur en solenoid fungerar (Bowes 2005)

2.3 Elektronik och styrsystem

2.3.1 PWM-styrning

PWM-styrning är uppbyggd kring att en spänning slås av och på med en bestämd frekvens. Förhållandet mellan avslaget och påslaget läge bestämmer utsignalens storlek. Om frekvensen är tillräckligt hög kan signalen i praktiken ses som helt analog. På detta sätt kan en mikrokontroller eller annan digital enhet på ett enkelt och väl styrbart sätt skapa en i stort sett analog signal utan någon mellanliggande behandling. Genom att använda PWM i denna applikation kan styrströmmen och därigenom kraften från solenoiden ändras på ett snabbt och enkelt sätt.



Figur 2-7 PWM-signal

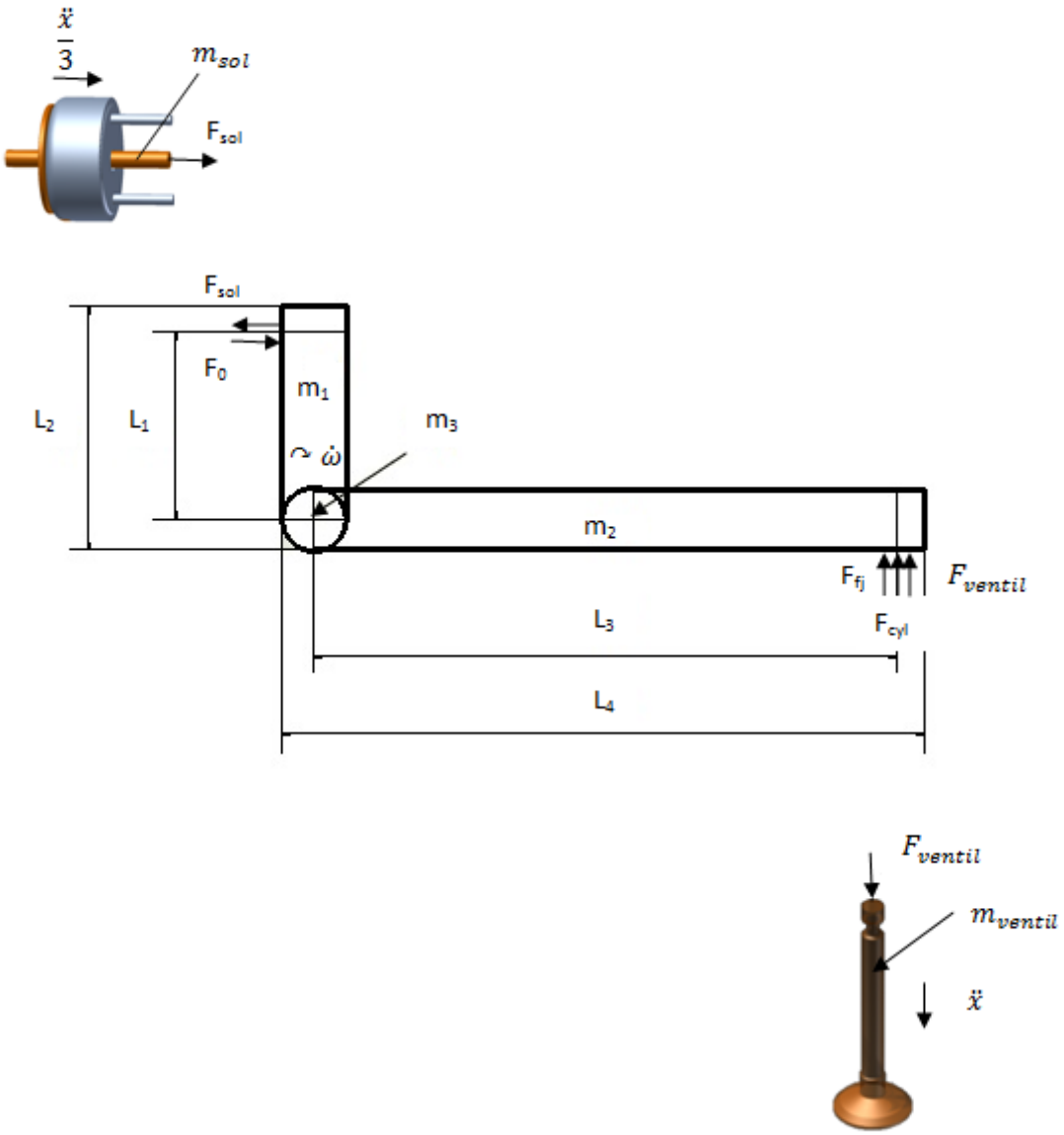
3 Genomförande

3.1 Val av solenoider

Solenoiderna ska kunna utföra två saker; generera tillräcklig kraft för att öppna ventilerna och generera tillräcklig kraft för att hålla ventilerna öppna. En studie av lämpliga solenoider tillgängliga på marknaden visade att kraften hos en solenoid avtar kraftig med slaglängden. Detta står att läsa mer om under rubriken *”3.2 Design av mekaniskt ventilstyrningssystem”* och illustreras i slaglängd- kraftdiagrammet under rubriken *”Solenoid”* i *”Appendix A. Datablad”.* Lämplig slaglängd hos de tänkbara solenoiderna framgick till cirka 1 mm. Kravet på ett ventillyft på 3,5 mm enligt *”1.2.1 Projektmål”* medförde att en utväxling mellan solenoiden och ventilen på 1:3 valdes till att börja med, vilket tillämpades vid beräkningen av solenoidkraften.

3.1.1 Beräkningar av solenoidkraft vid ventilöppning

För att bestämma den kraft som krävs av solenoiden vid ventilöppning gjordes en friläggning av det mekaniska systemet. Mer om det mekaniska systemets utformning hittas under rubriken *”3.2 Design av mekaniskt ventilstyrningssystem”* Den korta vipparmen, den långa vipparmen och axeln som dessa är monterade på frilades som ett system. Ventilen och solenoiden frilades som separata system och deras bidrag adderades till ovan nämnda system.



Figur 3-1 Friläggning av ventil och kraftöverföring

En ekvation för rörelsemängdsmomentet kring rotationsaxeln ställdes upp (Japp 2003, sid. 9).

$$\sum M_0 = I_0\dot{\omega} \qquad \text{ekvation 1}$$

Totala tröghetsmomentet I_0 är summan av den korta vipparmens tröghetsmoment I_1, den långa vipparmens tröghetsmoment I_2 och axelns tröghetsmoment I_3.

$$I_0 = I_1 + I_2 + I_3 \qquad \text{ekvation 2}$$

Genom att approximera vipparmarna som smala raka stänger ges I_1 och I_2 av (Japp 2003, sid. 16) och axelns tröghetsmoment, I_3 , ges av masströghetsmomentet för en cirkulär cylinder, (Japp 2003, sid. 17).

$$I_1 = \frac{1}{3} m_1 L_2^2 \qquad \text{ekvation 3}$$

$$I_2 = \frac{1}{3} m_2 L_4^2 \qquad \text{ekvation 4}$$

$$I_3 = \frac{1}{3} m_3 r^2 \qquad \text{ekvation 5}$$

Vinkelaccelerationen $\dot{\omega}$ är densamma för både den långa och den korta vipparmen. De krafter som verkar på systemet är förspänningskraften i ventilfjädern, F_{fj}, kraften på ventilen som blir av cylindertrycket, F_{cyl}, den kraft som krävs för att accelerera systemets massa, F_0, bidraget från solenoiden, F_{sol} och bidraget från ventilen, F_{ventil}. Insättning i ekvation 1 och utbrytning av den sökta kraften F_0 ger:

$$F_0 = \frac{I_0 \dot{\omega} + F_{sol} L_1 + (F_{ventil} + F_{cyl} + F_{fj}) L_3}{L_1} \qquad \text{ekvation 6}$$

Vinkelaccelerationen $\dot{\omega}$ beräknades utifrån ventilaccelerationen (Japp 2003, sid. 5).

$$\dot{\omega} = \frac{\ddot{x}}{L_3} \qquad \text{ekvation 7}$$

Ventilaccelerationen $\ddot{x}$ beräknades genom att derivera ventilens momentana ändring i position x med avseende på tiden t två gånger. Position och tid hämtades ur en tabell där ventillyftets relation till kamaxelvinkeln angivits *("Appendix C. Tabell ventillyft")* (Johansson, 2013). Tabellen anger lyft i millimeter för varje hel grad på kamaxeln. Tabellen behandlar ett spann från 67,4 grader innan TDC till 67,4 grader efter TDC för insugsventilen och från 65 grader innan TDC till 65 grader efter TDC. Ett program i MATLAB skrevs för att ta fram hastigheten och accelerationen över kurvan framräknad från punkterna *("Appendix D. MATLAB-beräkning ventilacceleration").*

Bidraget från ventilen kan beräknas med Newtons andra lag då dess rörliga massa är känd. Bidraget beräknades genom att multiplicera ventilaccelerationen med ventilens massa.

$$F_{ventil} = m_{ventil} * \ddot{x} \qquad \text{ekvation 8}$$

Bidraget från solenoiden beräknades på samma sätt. Solenoidens acceleration är en tredjedel av ventilens acceleration på grund av hävarmen.

$$F_{sol} = m_{sol} * \frac{\ddot{x}}{3} \qquad \text{ekvation 9}$$

Kraften på ventilen beräknades genom att multiplicera ventilarean med cylinderövertrycket.

$$F_{cyl} = kraft_{VH,AV} = A_{VH} * p_{cylinder} \qquad \text{ekvation 10}$$

Bidraget från fjädern är fjäderns förspänningskraft. Den beräknades med Hookes lag genom att multiplicera fjäderkonstanten k och förspänningens längd $x_{ventil\ stängd}$.

$$F_{fj} = k * x_{ventil\ stängd} \qquad \text{ekvation 11}$$

3.1.2 Hållkraft och öppningskraft

Kraften för att hålla ventilen öppen benämns hållkraft, det är enbart ventilfjäderns kraft som verkar på solenoiden under denna fas. Fjäderkraften beräknades genom att multiplicera fjäderkonstanten, k, som räknades ut teoretiskt för originalfjädrarna, med den komprimerade längden på fjädern. Den komprimerade längden är fjäderns förspänning plus ventillyftet.

För avgasventilen krävs en högre öppningskraft eftersom övertryck råder i cylindern vid öppningen, övertrycket försvinner inte direkt när avgaserna börjar strömma ut men det sjunker snabbt. Kraften som verkar på ventilhuvudet, och försöker stänga ventilen, är övertrycket multiplicerat med arean på ventilhuvudet.

$$kraft_{VH,AV} = A_{VH} * p_{cylinder}\ [N] \qquad \text{ekvation 12}$$

$$kraft_{fjäder} = k * x_{ventil\ öppen}\ [N] \qquad \text{ekvation 13}$$

$$hållkraft_{IV} = kraft_{fjäder}\ [N] \qquad \text{ekvation 14}$$

$$hållkraft_{AV} = kraft_{VH,AV} + kraft_{fjäder}\ [N] \qquad \text{ekvation 15}$$

3.1.3 Driftscykel

Kraften en solenoid kan generera vid en given spänning beror på dess slaglängd, utformning och aktuell driftscykel (eng. duty cycle). Driftcykeln beräknas enligt ekvation 16 och är andelen av total tid som solenoiden är aktiv. Tillverkaren av

solenoiden tillhandahåller datablad där tillgänglig kraft i förhållande till slaglängd för olika driftscykler finns specificerat *("Appendix A. Datablad").* För att undvika överhettning av solenoiden vilket kan skada armaturen, är det viktigt att inte överskrida den spänning som är angiven för en viss driftcykel mer än under korta perioder.

$$driftscykel = \frac{\text{"på" tid}}{\text{"på" tid+"av" tid}} * 100\% \qquad \text{ekvation 16}$$

I denna applikation där solenoiden antingen styr en insugsventil eller en avgasventil kommer driftscykeln att bli ungefär 25 % eftersom ventilen enbart är öppen under en takt av fyra i förbränningscykeln, det vill säga 180° rotation på vevaxeln. I databladet *("Appendix A. Datablad")* finns en kurva utritad för 25 % driftscykel. För att tillse att solenoiden kan leverera tillräckligt med hållkraft lästes kraftvärdet av vid 0 mm slaglängd. Slaglängden på solenoiden är 0 mm när ventilen är fullt öppen då luftgapet ej existerar vid fullt öppen ventil.

3.2 Design av mekaniskt ventilstyrningssystem

Parallellt med att solenoider valdes och beräkningar för ventildynamiken gjordes (se avsnitt *"3.1 Val av solenoider"*) designades ett mekaniskt system för att montera solenoiderna samt möjliggöra kraftöverföring mellan solenoiderna och ventilerna. Samtliga komponenter konstruerades i CAD-programvaran Autodesk Inventor. Fördelen med att först skapa en digital design i en CAD-programvara är att det är möjligt att analysera konstruktionen med avseende på styvhet och hållfasthet med hjälp av finit-elementmetod (FEM).

Konstruktionen utgår från fysiska mätningar på Honda GX35-motorn, beräkningar av de krafter som verkar på systemet (se *"3.1 Val av solenoider"*) samt projektmålen. Designen avser ett system för Honda GX35-motorn vars koncept sedan kan implementeras på Veramotorn.

Designmässigt är en viktig detalj att Honda GX35-motorn saknar ett elektroniskt bränsleinsprutningssystem. Ett elektroniskt insprutningssystem använder sig av givare som kontrollerar var motorn befinner sig i sin arbetscykel. För att lösa detta problem på Honda GX35-motorn konstruerades ett så kallat triggerhjul samt en anordning för att fästa detta på motorns vevaxel. Detta används för att skapa signaler som ger information om motorns läge och hastighet med hjälp av en givare. Informationen används sedan för att styra solenoiderna.

Även solenoidernas egenskaper beaktades vid konstruktionen av ventilstyrningen. Eftersom kraften som solenoiden kan leverera vid en viss spänning avtar med ökande slaglängd så är det viktigt att hålla slaglängden så kort som möjligt. Samtidigt måste rörelsen generera tillräckligt stort ventillyft

enligt projektmålet. För att tillfredsställa båda dessa krav utformades vipparmarna så att de gav en utväxling mellan solenoidens och ventilens rörelse.

Tillverkningen av alla mekaniska delar, bortsett från solenoiderna som köptes in, utfördes i prototyplabbet på Chalmers. Konstruktionen styrdes därför också av de maskiner som fanns att tillgå.

Den mekaniska konstruktionen av ventilstyrningen till Honda GX35-motorn innefattar följande delar(för ritningar se *"Appendix B. Ritningsunderlag"*):

- En konsol som håller solenoider och vipparmar och monteras på motorn.
- Hållare för solenoiderna.
- Vipparmsaxlar för kraftöverföring mellan solenoiderna och ventilerna
- Vipparmar för kraftöverföring som fästs på axeln. Vipparmarna ska ge rätt utväxling mellan solenoidens slaglängd och ventillyftet på 3,5 mm.
- Triggerhjul
- En Honda GX35-motor som modifierats för att kunna montera konsolen.

3.2.1 Designkriterier för mekaniskt ventilstyrningssystem

Konsol

Skall hålla vipparmar och solenoider på plats. Den ska gå att tillverka i de maskiner som finns i prototyplabbet och klara de mekaniska påfrestningar som systemet utsätts för under körning av motorn med avseende på utmattning och styvhet. Den ska vidare vara lätt att montera och demontera på motorn och testriggen och erbjuda möjlighet till justering av solenoidernas slaglängd.

Solenoidhållare

Skall hålla solenoiden på plats och möjliggöra montering av en fjäder för att dämpa solenoidens returrörelse. Fjädern skall även säkerställa att solenoiden återgår till sitt ursprungsläge.

Vipparmsaxlar

Skall klara att överföra kraften från solenoiden till ventilen, det vill säga klara av vridmomentet från vipparmarna.

Vipparmar

Skall vara dimensionerade mot utmattning för givna lastfall samt ha en tillräcklig styvhet för att garantera önskat ventillyft. Massan ska minimeras på de rörliga delarna för att minska tröghetsmomentet för systemet.

Triggerhjul

Skall ha samma utseende som triggerhjulet som används på Veramotorn och skall kunna monteras på Honda GX35-motorn och en elmotor för

testverksamheten. Skall även vara tillverkad av ett magnetiskt material för att kunna användas ihop med en induktiv givare.

Modifierad Honda GX35-motor
Topplocket behöver modifieras och bearbetas för att möjliggöra montering av konsolen.

3.3 Design av provningsutrustning

Under utvecklingsarbetet testades systemen var för sig innan de monterades på motorn. Därför konstruerades en testrigg bestående av en elmotor med triggerhjulet fäst för att simulera motorns rörelse. Ett topplock bearbetades och monterades på en ställning för att utgöra en testrigg för systemet. I testriggen monterades sedan ventilstyrningen och systemet testades i en kontrollerad miljö. Ventilrörelserna och övriga komponenters prestanda kunde sedan utvärderas med hjälp av en höghastighetskamera samt ett oscilloskop.

Den mekaniska konstruktionen av provningsutrustningen innefattade:

- Fästanordningar för triggerhjul, givare och riggar.
- Modifierat topplock till Honda GX35-motorn för test av mekanik.

3.3.1 Designkriterier för provningsutrustning:

Fästanordningar
Möjliggöra fastsättning av triggerhjul på elmotor, samt ta fram en rigg för att sätta fast elmotorn under provning och även kunna montera Honda GX35-motor i under motortestfasen.

Honda GX35-topplock
Det skall gå att montera konsolen med vipparmar och solenoider, det skall även gå att se ventilerna så att det är möjligt att filma dem.

3.4 Spänning till solenoiderna

Efter att den mekaniska ventilstyrningen tillverkats och solenoiderna monterats bestämdes de styrspänningar som krävs för att öppna respektive hålla ventilen öppen. Detta gjordes empiriskt på grund av den stora svårigheten att bestämma dessa teoretiskt. Denna svårighet kommer sig av de komplexa samband som råder över det kompletta systemet. Således är det både enklare och ger ett mer exakt resultat att bestämma styrspänningarna genom verkliga tester. Dessutom kunde ventilrörelsen kontrolleras. Under testerna användes GX35-motorns standardventilfjädrar.

Hållspänningen som krävs för att hålla ventilen öppen bestämdes först. Ventilen trycktes ned för hand till rätt öppningshöjd och en spänning lades på solenoiden. Spänningen ökades successivt tills spänningen ensam var tillräcklig för att hålla

kvar ventilen i öppet läge. För att undvika överhettning av solenoiderna vid kontinuerlig drift bör inte hållspänningen överstiga den specificerade maxspänningen för 25 % driftscykel. Då prototypen kommer köras under kontrollerade förhållanden och under korta tidsperioder kan dock högre spänningar än den specificerade tillåtas här.

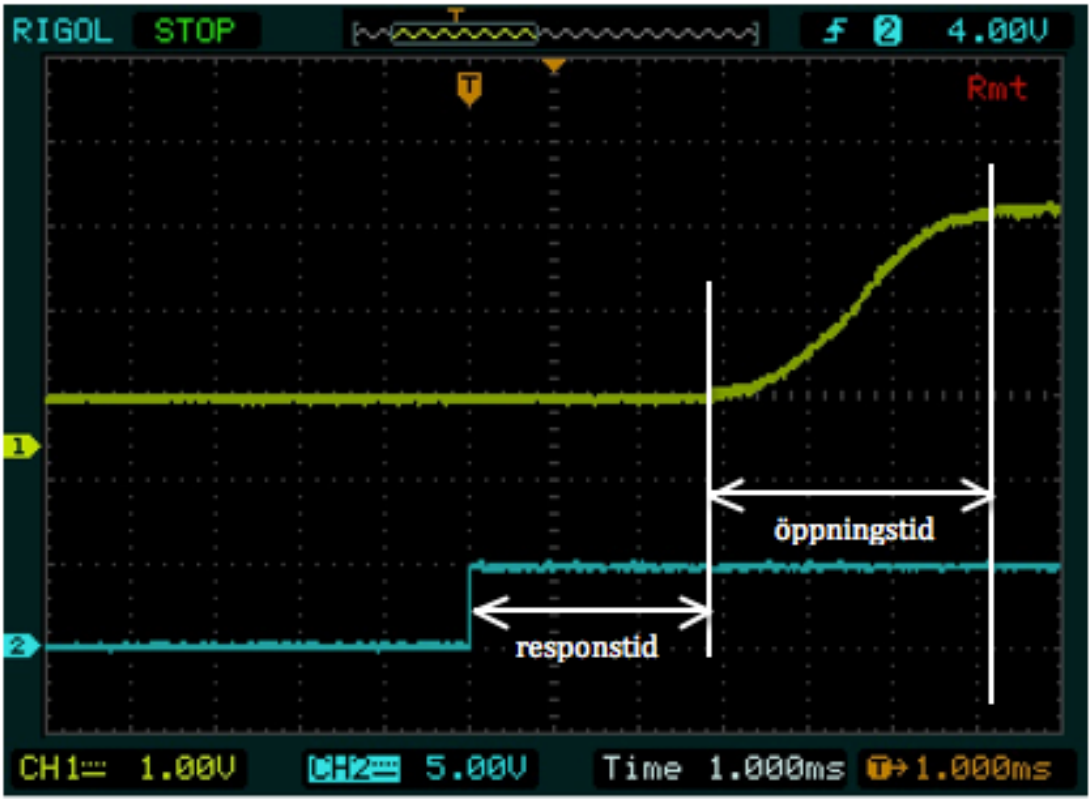
Under ventilöppning krävs en högre spänning för att accelerera ventilen (accelerationsspänning). Då denna spänning endast läggs på under en kort del av driftcykeln kan högre spänningar än hållspänningen för 25 % driftscykel tillåtas. Empiriska studier visar att spänningen kan ökas upp till tio gånger specificerad spänning för 100 % driftscykel om spänningen minskas när solenoiden når sin botten (Bowes 2005). Accelerationsspänningen bestämdes genom att öka spänningen successivt tills önskad responstid uppnåddes.

3.5 Tidsberäkning för solenoider

3.5.1 Respons-, öppnings- och stängningstid

En solenoids responstid är tiden från pålagd spänning till påbörjad aktuering. Responstiden påverkas av pålagd spänning, ventilfjäderns förspänningskraft, cylindertryck och tröghetsmoment. Genom att bestämma responstiden kan korrigeringar av tidpunkten för öppningssignalen göras, vilket är nödvändigt för att öppna ventilen vid rätt tidpunkt.

Uppmätningen av responstid utfördes genom att koppla styrsignalen från mikrokontrollern till ett oscilloskop. På oscilloskopet avlästes tidpunkten då styrsignalen går från låg till hög, vilket innebär att en spänning läggs över solenoidens spole. För att mäta ventilens position användes en givare av halleffekttyp och en magnet monterad på vipparmen till ventilen. Halleffektgivaren ger en varierad spänning beroende på styrkan av det magnetfält som påverkar den. När vipparmen rör sig förflyttas magneten i förhållande till halleffektgivaren, vilket resulterar i en spänningsändring från givaren som kan avläsas i oscilloskopet. På detta sätt kan ventilens position och rörelse bestämmas. Tidsskillnaden mellan styrsignal och tidpunkten då solenoiden aktueras avlästes och responstiden kunde på så sätt bestämmas. Figur 3-2 visar hur responstiden uppmättes.



Figur 3-2 Uppmätning av responstid och öppningstid

När ventilerna stängs måste både responstiden och stängningstiden mätas upp för att bestämma när signalen om stängning ska skickas. Detta gjordes på samma sätt som uppmätningen av öppningsresponstiden. Styrsignalen som går från hög till låg visades i oscilloskopet tillsammans med signalen från halleffektgivaren. När signalen gick från hög till låg avlästes tiden fram till dess att halleffektsignalen visade det värde som motsvarade stängd ventil.

Ett första test gjordes med standardfjädrarna till Honda GX35-motorn, dessa har en beräknad fjäderkonstant på 4,5 N/mm. Samma test som beskrivits ovan gjordes även med mindre styva fjädrar med fjäderkonstanten 2,71 N/mm. Dessa fjädrar kommer från Lesjöfors och benämns som SF-TF 1430 (för datablad se *”Appendix A. Datablad”*). Orsaken till varför mindre styva fjädrar ville utvärderas var för att minska respons- och öppningstiden. Detta är viktigt för att möjliggöra längre öppningstider när motorn går på höga hastigheter och den tillgängliga tiden per varv minskar.

3.5.2 Position för signal om öppning och stängning av ventiler

En motors hastighet anges i RPM, men för att förenkla beräkningarna anges motorns position och hastighet i vevaxelgrader respektive grader per sekund. Från triggerhjulet (se *”3.2 Design av mekaniskt ventilstyrningssystem”* för mer ingående beskrivning), som sitter monterad på vevaxeln kan motorns läge i förhållande till en känd referenspunkt avläsas. Genom att mäta tiden mellan markeringarna på triggerhjulet kan dess vinkelhastighet räknas ut. Dessa

beräkningar är nödvändiga vid programmering av styrsystemet, vars uppgift är att skicka signalen för öppning eller stängning av ventilerna. Om signalen skickas vid fel motorposition kommer det leda till att ventilerna öppnar eller stänger vid fel läge i motorns arbetscykel, och motorn kommer inte att arbeta på ett tillfredställande sätt.

För att omvandla från RPM till vinkelhastighet angivet i °/s används följande formel.

$$\omega = \frac{RPM*360}{60} \left[\frac{^\circ}{s}\right] \qquad \text{ekvation 17}$$

Tiden, i ms, för att rotera ett varv vid ett givet varvtal fås fram genom att använda ekvation 18, där 60 000 är antalet ms som går på en minut. Tiden för öppning och stängning av en ventil måste understiga tiden det tar för vevaxeln att rotera ett halvt varv eftersom en ventil är öppen ett halvt vevaxelvarv.

$$t_{RPM} = \frac{60\,000}{RPM} \; [ms] \qquad \text{ekvation 18}$$

När tiden för att rotera ett varv är känd går det att räkna ut hur många vevaxelgrader som hinner passera för en viss angiven tid, t. Om responstiden är känd går det att sätta in responstiden som t i ekvation 19 och använda t_{RPM} för ett givet varvtal, ut fås då hur många vevaxelgrader före öppningspunkten som öppningssignalen måste skickas. På samma sätt, om responstiden plus stängningstiden är känd, går det att räkna ut vid vilken vevaxelposition som signalen om stängning måste skickas.

$$Vevaxelgrader = 360 * \left(\frac{t}{t_{RPM}}\right) \; [^\circ] \qquad \text{ekvation 19}$$

För att veta om tiden som krävs för att öppna eller stänga är tillräcklig måste öppnings- och stängningstiden läggas ihop för att se att de håller sig inom halva tiden som krävs för att rotera ett varv vid en given hastighet.

$$t_o + t_c \leq \frac{t_{RPM}}{2} \qquad \text{ekvation 20}$$

Öppningstiden kan minskas genom att öka den pålagda öppningsspänningen och därmed få en kraftigare acceleration av ventilen.

3.6 Design av styrsystem

Styrenhetens övergripande uppgift är att öppna och stänga insugs- och avgasventilen vid rätt tillfälle i arbetscykeln. För att göra detta behöver styrenheten information om vevaxelns position och hastighet samt ventilernas

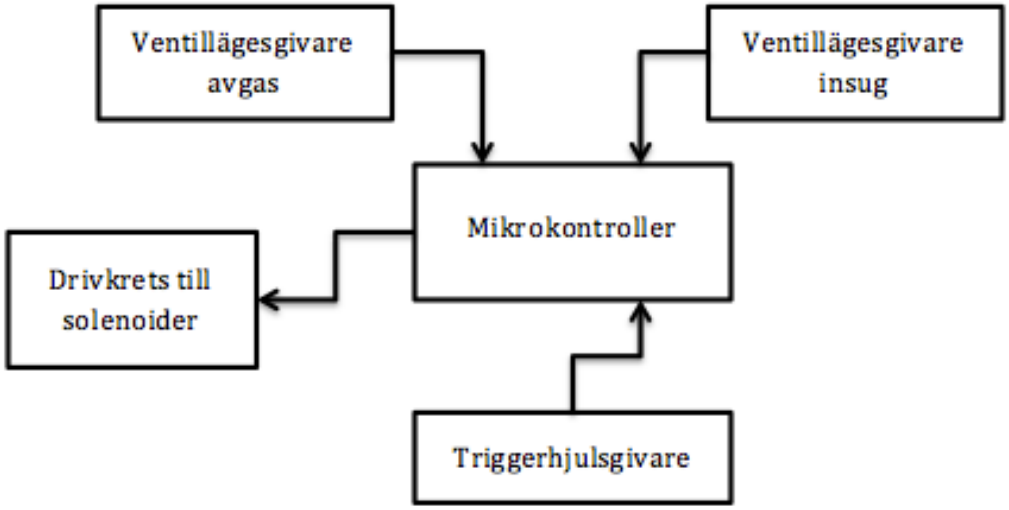
position. På grund av solenoidernas responstid vid av och påslag, måste hänsyn tas till motorns varvtal för att aktuering av solenoiderna ska ske vid rätt tillfällen. Styrenheten kompenserar för responstiden genom att skicka styrsignalen innan utsatt position. Den måste dessutom ta emot och hantera återkopplingen från ventilens position från halleffektsgivaren, för att styra ventilens öppning och stängning.

För att driva solenoiderna behövs drivkretsar som matar solenoiderna med rätt ström och spänning. Designen på drivkretsarna till de två solenoiderna har hämtats från David Bowes arbete (Bowes 2005). Anledningen till detta var att gruppens elektronikkunskaper är relativt begränsade och att Bowes redan tagit fram en beprövad lösning som visat sig fungera utmärkt för liknande tillämpningar. Kravet på drivkretsarna var att strömmen till solenoiderna skulle kunna varieras. Detta för att det behövs en kraftigare ström för att öppna ventilen jämfört med att hålla den öppen. När ventilen sedan ska stängas behöver också en dämpningsström läggas på för att dämpa ventilens landning mot ventilsätet. I denna design av Bowes drivelektronik används PWM-styrning av styrsignalen för att på så sätt variera strömmen till solenoiderna. På så sätt kan en konstant maxspänning ställas in på spänningsaggregatet och sedan kan strömmen varieras med PWM-styrning. Kretskort utifrån ovan nämnda design tillverkades med hjälp av kretskortslaminat med fotoresistbeläggning.

För att kontrollera var ventilen befinner sig behövs en givare som i realtid kan ge information om ventilens läge. Anledningen är att styrenheten behöver informationen för att minska strömmen mot slutet av öppningen och lägga på dämpningsströmmen vid stängning. Kravet på givaren är att den ska återge information med så hög upplösning och noggrannhet att det kontinuerligt går att följa ventilens position under ventilrörelsen och samtidigt kunna överföra denna information på ett sätt som mikrokontrollern kan avläsa.

För att ventilerna ska kunna öppna och stänga vid rätt tillfälle är det kritiskt att mikrokontrollern konstant kan bestämma var motorn befinner sig och med vilken hastighet den roterar. På grund av detta behövdes även en givare för vevaxelns position implementeras. Givarens uppgift är att läsa av triggerhjulet och ge en signal som kan behandlas av styrenheten för att kunna beräkna motorns läge och hastighet.

Som central enhet i systemet används en mikrokontroller som gör alla beräkningar så som beräkning av tidpunkter då signaler om öppning eller stängning ska skickas ut. Det är viktigt att processorn har tillräckligt med kapacitet för att kunna utföra beräkningarna tillräckligt snabbt då det är kritiskt för hur effektivt motorn kommer att arbeta. I figur 3-3 visas schematiskt hur systemet byggdes upp.

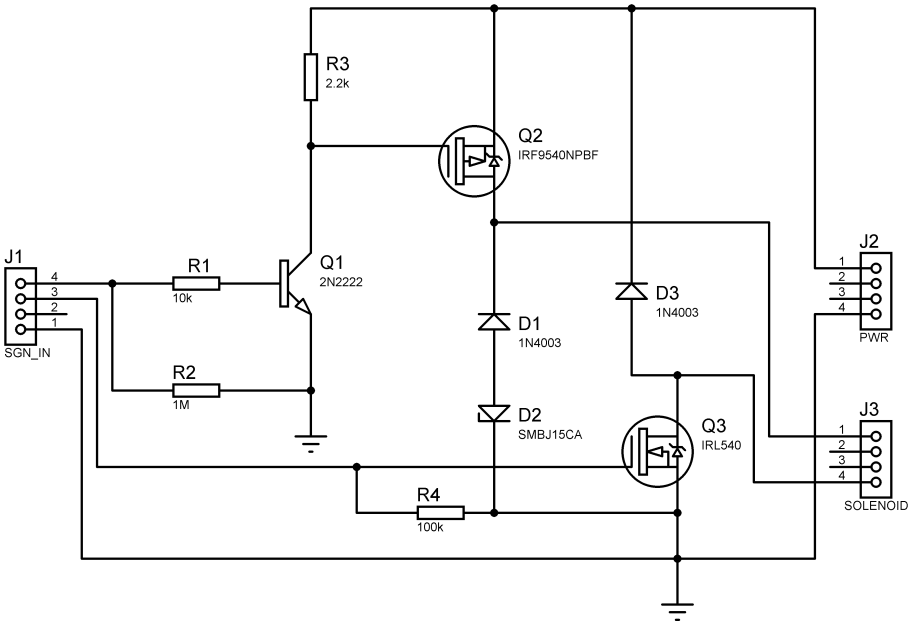


Figur 3-3 Flödesschema elektroniskt styrsystem

3.6.1 Kretsar

Drivkretsar

Drivkretsarna som är byggda enligt David Bowes ritningar (Bowes 2005) är uppkopplade enligt följande kretsschema, se figur 3-4.



Figur 3-4 Kretsschema drivkrets

Syftet med drivkretsarna är att med mikrokontrollern kunna styra strömmen som skickas genom solenoiderna. Dessutom behöver denna ström varieras för att kunna sänka strömstyrkan till solenoiden när den är öppen och även kunna skicka ut den strömpuls som behövs för att sakta ner ventilen under stängningsfasen. För att uppnå denna styrning är drivkretsarna uppbyggda

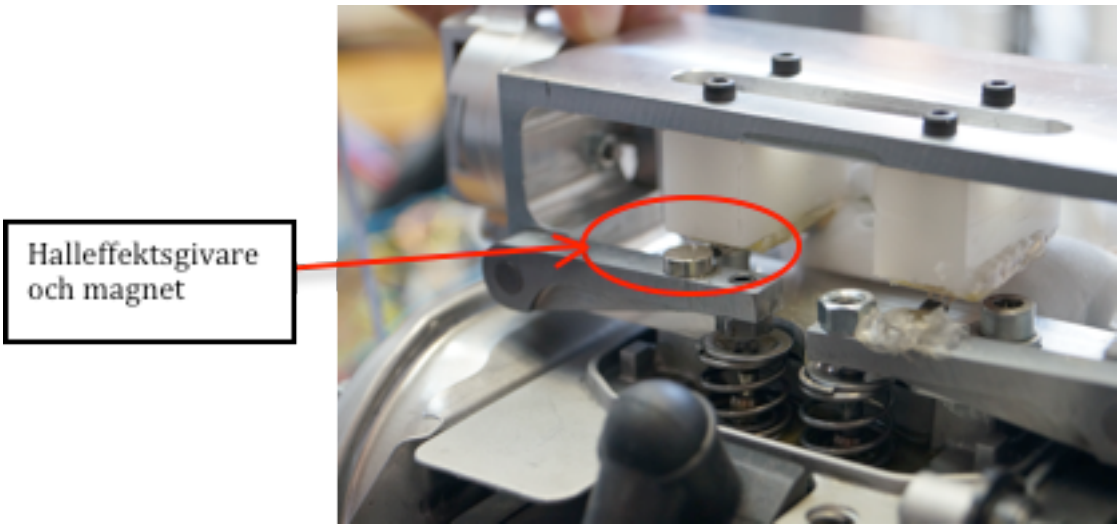
kring två MOSFET-transistorer (Q2 och Q3) som med hjälp av en styrspänning från mikrokontrollern kan styra matningsströmmen och skicka vidare denna till solenoiden. Denna styrning kan med hjälp av MOSFET-transistorerna ske med en PWM-styrning av styrsignalerna.

En annan faktor som påverkar designen är solenoidens induktans, vilken motverkar den strömförändring som behövs vid öppning och stängning av ventilen. Denna faktor är viktig att ta hänsyn till av tre anledningar. Dels vid öppning av ventilen, då strömmen genom solenoiden behöver ändras från stillastående till sitt maxvärde på så kort tid som möjligt, då det är vid ventilöppningen som solenoiden behöver arbeta med full kraft. Induktansen i solenoiden kommer då att ge en fördröjning av denna ström och således en motsvarande fördröjning mellan att en styrsignal skickas till dess att ventilen börjar öppnas. Det är denna fördröjning som är den huvudsakliga anledningen till att en hög matningsspänning är önskvärd, då detta ger en kortare fördröjning. En hög matningsspänning ger i sin tur en hög ström genom solenoiden och således en stor kraft. När ventilen väl är öppen minskar kraftbehovet och strömmen måste då regleras. Detta görs med Q3 i kretsschemat, som slås av och på med en hög frekvens för att minska öppningsströmmen. Då Q3 stryps kommer induktansen i solenoidspolen att ge upphov till en spänningsspik som riskerar att förstöra Q3 om denna inte tas om hand. Detta är andra anledningen att solenoidens induktans behöver tas i beaktning. Detta sker med hjälp av en så kallad frihjulsdiod (D3) som leder den kvarvarande strömmen tillbaka till strömkällan.

Vid ventilstängning kommer induktansen återigen medföra en fördröjning av strömmens förändring och således även en fördröjning av ventilstängningen. Även denna fördröjning är viktig att till största delen minimera, då den kan medföra en begränsning av maxvarvtalet hos motorn. För att minska denna fördröjning används dioderna D1 och D2 som möjliggör för solenoiden att föra ström mellan jord upp till matningsnivån då både Q2 och Q3 är stängda.

3.6.2 Ventillägesgivare

Ventillägesgivarna består av en halleffektsgivare samt en magnet. Halleffektsgivaren sitter monterad i konsolen och magneten sitter monterad på vipparmen som trycker ned ventilen, se figur 3-5. En halleffektgivare påverkas av det omgivande magnetfältet och ger en varierande utspänning beroende på styrkan av denna. När vipparmen förflyttas ändras magnetfältets styrka kring halleffektsgivaren vilket ger upphov till en spänningsändring som kan läsas av mikrokontrollern. På så sätt kan mikrokontrollern få information om var ventilen befinner sig då vipparmen och ventilen är sammankopplade mekaniskt.



Figur 3-5 Halleffektgivare för ventilposition

3.6.3 Positionssensor

För att styrsystemet skall kunna avgöra när ventilerna skall aktueras behövs information om vevaxelns position. För denna uppgift monterades ett triggerhjul på vevaxeln. Det är en metallskiva med ett antal urfrästa slitsar(se *"Appendix B. Ritningsunderlag"*). Dessa slitsar kan sedan läsas av med en sensor vilken då ger information om dess position. För att ha en referens är en av slitsarna större än de andra, detta kan då tolkas som en "nollpunkt" med vilken styrsystemet varje vevaxelvarv kan kontrollera att dess position är korrekt. Triggerhjulet som har använts är ett som kallas "36-2" vilken skall tolkas som att tänderna sitter med en delning som ger 36 tänder per varv, men där två saknas för att ge referensen.

För att läsa av triggerskivan används en läsgaffel som är en optisk komponent. Den fungerar genom att en lysdiod lyser genom ett luftgap mot en fototransistor. Denna transistor är ljuskänslig och strömmen som går genom den bestäms av om den belyses eller inte. Detta gör att om ljuset från dioden blockeras kan detta avläsas genom strömskillnaden som då inträffar. På detta sätt kan triggerskivans tänder läsas av elektroniskt och tolkas av styrsystemet.

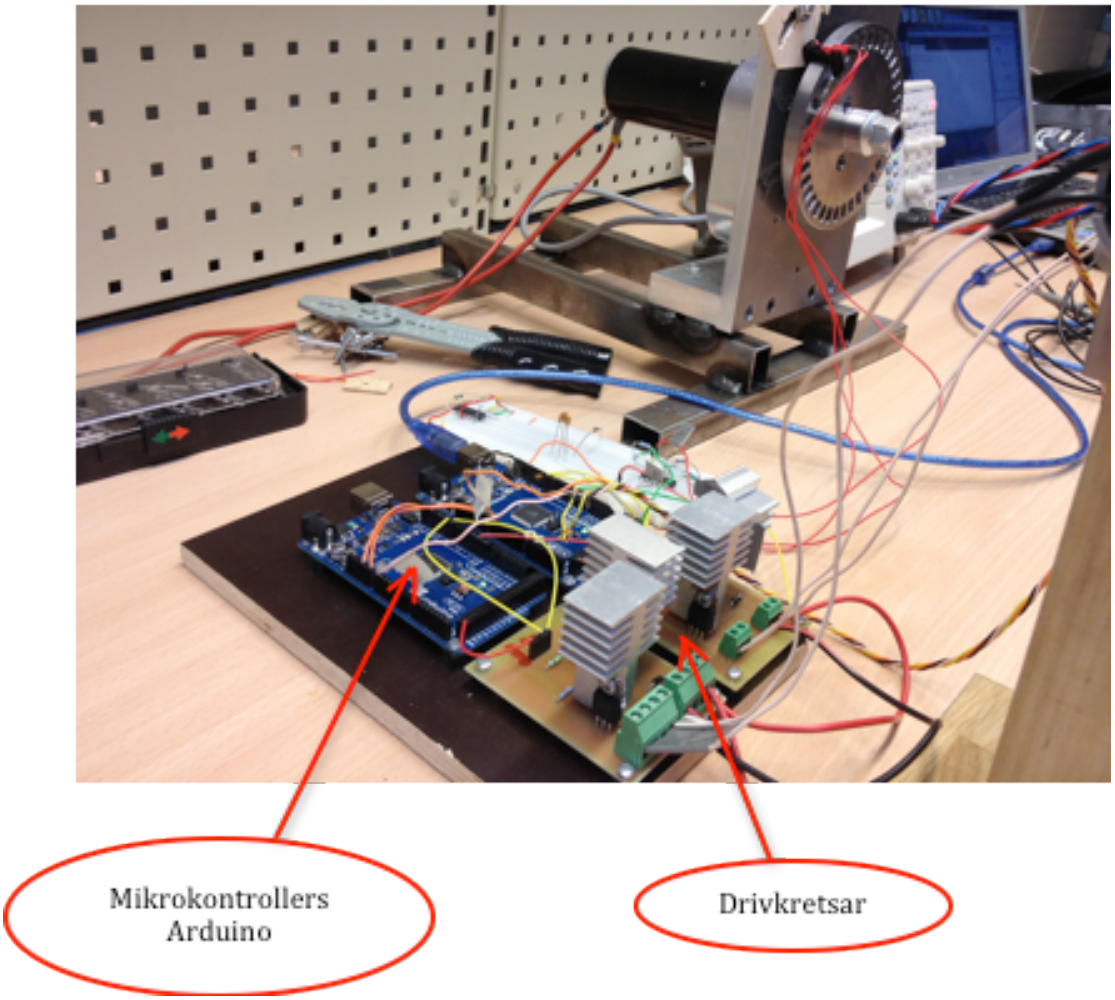
3.6.4 Mikrokontroller

För att styra ventilöppningen används två stycken Arduino MEGA 2560. Arduino är ett helt koncept för att på ett snabbt, enkelt och kostnadseffektivt sätt utveckla hård- och mjukvara för styrning av elektriska eller mekatroniska system. I detta koncept ingår ett flertal olika standardiserade mikrokontrollerbaserade styrkort, och en egen utvecklingsmiljö för programmering av dessa. Anledningen att valet föll på just Arduino-baserad hårdvara ligger i snabbheten och den relativa enkelheten som denna plattform möjliggör. Dels är hårdvaran noga utprovad och genomtänkt, med inbyggd spänningsregulator och kontaktlister för alla in- och utgångar vilket gör uppkoppling och provning tidseffektiv. Även mjukvaran är i jämförelse med andra alternativ lätthanterad. På grund av den höga standardiseringsgraden finns ett mycket stort bibliotek med de vanligaste

funktionerna lätt åtkomligt. Standardiseringen gör även att stor kunskap och inspiration går att hitta på Arduinos eget forum.

Mikrokontrollern som används i detta Arduino-kort är Atmel ATmega2560, som är en 8-bitars design som körs i 16 MHz. Den är utrustad med sex timers, varav 4 16-bitars. Den har även 10-bitars AD omvandlare, och möjlighet till PWM-styrning av vissa utgångar.

Utvecklingsmiljön som använts är Arduinos egen. Denna använder programspråket Wiring som är ett förenklat C/C++ språk, riktat mot programmering av mikrokontrollers.



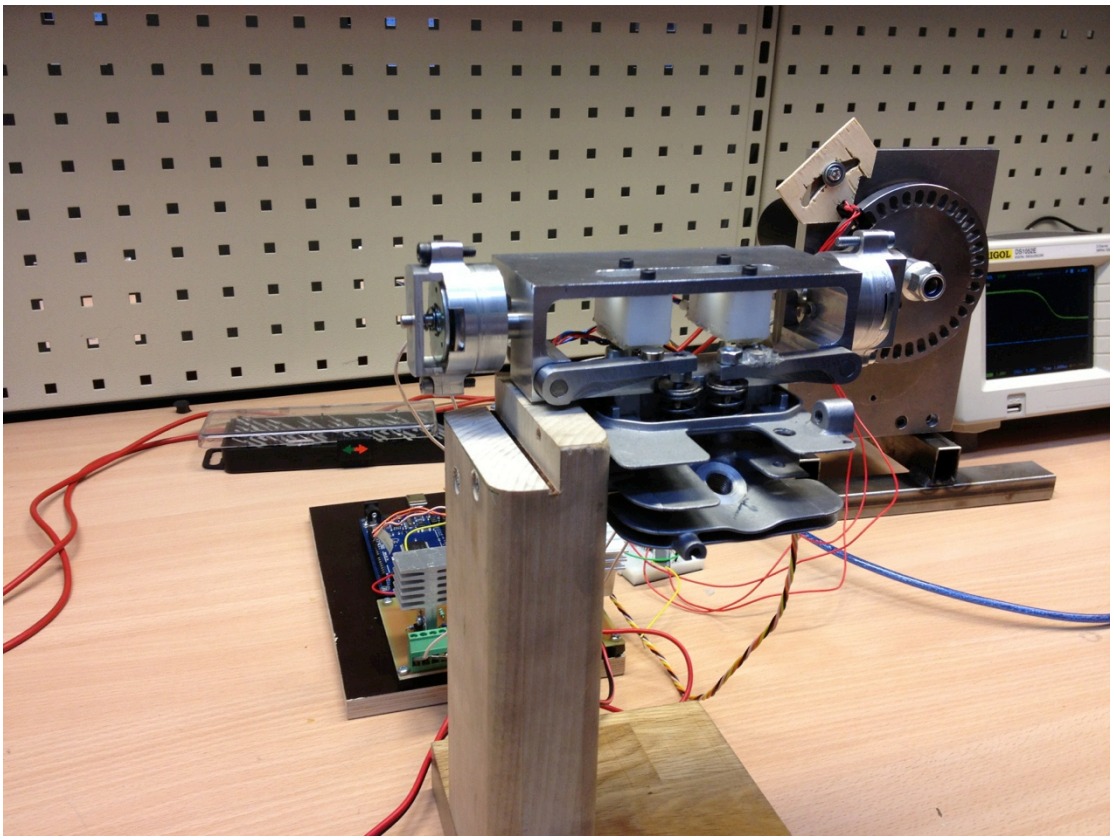
Figur 3-6 Mikrokontrollers och drivkretsar

3.7 Provning och utvärdering

Provningen delades in i två testfaser, testfas ett och testfas två. I testfas ett testades vilka spänningar som krävs för att öppna ventilerna och för att hålla dem öppna. Även lyftkurvorna provades ut, när spänningen skulle gå över från öppningsspänning till hållspänning. Detta för att få så snabba öppningar som möjligt.

Efter att öppningen och stängningen av ventilerna provats ut testades programvaran och det mekaniska systemet vid kontinuerlig drift genom att driva triggerhjulet med en elmotor, detta för att simulera en förbränningsmotor. Spänningen till elmotorn varierades och på så sätt kunde olika varvtal på motorn simuleras. Under den första testfasen var konsolen och solenoiderna monterade i en testrigg som gjorde det möjligt att se ventilrörelsen och filma denna med höghastighetskamera, se figur 3-7. För att utvärdera lyftkurvorna för ventilen visualiserades signalen från halleffektgivaren på oscilloskopet tillsammans med en digital triggersignal. Denna triggersinal motsvarade 180° rotation på vevaxeln i motorn och simulerade en insugsfas. För att utvärdera om ventilen öppnade vid rätt tidpunkt och om den höll öppet under hela insugstakten jämfördes båda kurvorna i oscilloskopet. Fjädrarna som användes under detta test var de mindre styva fjädrarna från Lesjöfors med beteckningen SF-TF 1430.

I testfas två monterades ventilstyrningen på den modifierade Honda GX35-motorn. Under testfas två skulle motorn startas upp och testas under förbränning. På samma sätt som i testfas ett kunde lyftkurvorna läsas av på oscilloskopet för att utvärdera vad som behövdes justeras för att uppnå bra lyftkurvor. Honda GX35-motorn monterades i en rigg när den skulle köras under förbränning.



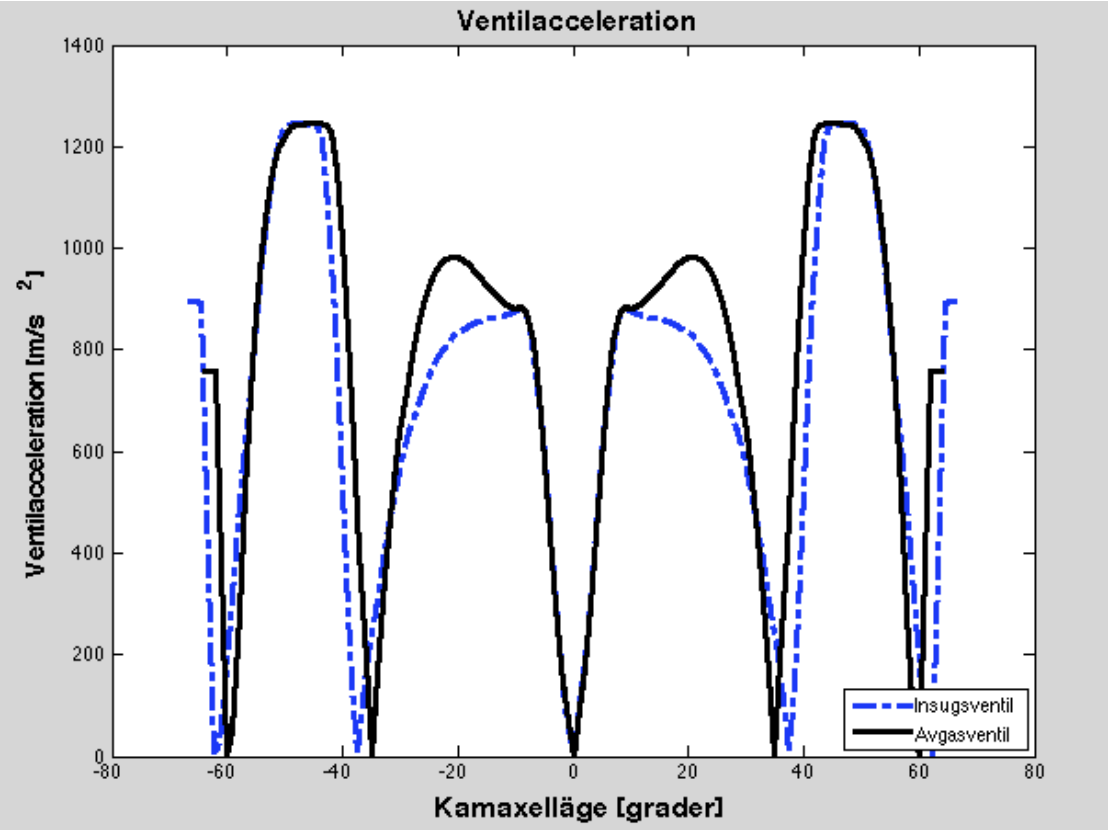
Figur 3-7 Ventilstyrning monterat på löst provtopplock

4 Resultat

4.1 Val av solenoider

4.1.1 Beräkningar av solenoidkraft vid ventilöppning

Figur 4-1 visar ventilaccelerationen för respektive ventil. Maximal ventilacceleration kan avläsas till drygt 1 200 m/s^2. MATLAB-programmet gav en exakt maximal ventilacceleration på $\ddot{x} = 1\,244{,}5\ \frac{m^2}{s}$ (*"Appendix D. MATLAB-beräkning ventilacceleration"*).



Figur 4-1 Ventilacceleration

Bidraget från ventilen, enligt ekvation 8:

$$F_{ventil} = m_{ventil} * \ddot{x} = 0{,}010 * 1244{,}5 = 12{,}445\ N$$

Bidraget från solenoiden, enligt ekvation 9:

$$F_{sol} = m_{sol} * \frac{\ddot{x}}{3} = 0{,}016 * 1244{,}5 = 6{,}64\ N$$

Kraften på ventilen från cylinderövertrycket, enligt ekvation 10:

$$F_{cyl} = kraft_{VH,AV} = A_{VH} * p_{cylinder} = 0.007^2 * \pi * 50000 = 7{,}70\ N$$

Förspänningens längd är $x_{ventil\ stängd} = 3{,}33\ mm$ och fjäderkonstanten är $k = 4{,}46$ N/mm. Fjäderns förspänningskraft, enligt ekvation 11 blir då:

$$F_{fj} = k * x_{ventil\ stängd} = 4{,}46 * 3{,}33 \approx 14{,}7\ N$$

Med den maximala ventilaccelerationen känd ger ekvation 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10 och 11 den sökta maximala kraft F_0 som behöver levereras av solenoiden genom insättning av mått- och viktvärden. Dessa är hämtade ur CAD-modellen av vipparmssystemet som behandlas i avsnittet *"4.2 Mekaniskt system"*.

$L_1 = 0{,}020\ m$ $\quad\quad$ $m_1 = 0{,}008\ kg$

$L_2 = 0{,}026\ m$ $\quad\quad$ $m_2 = 0{,}023\ kg$

$L_3 = 0{,}050\ m$ $\quad\quad$ $m_3 = 0{,}010\ kg$

$L_4 = 0{,}056\ m$

$r = 0{,}003\ m$

$$F_0 = \frac{I_0\frac{\ddot{x}}{L_3} + F_{sol}L_1 + (F_{ventil} + F_{cyl} + F_{fj})L_3}{L_1} = 125{,}97\ N$$

4.1.2 Hållkraft

Kraften som verkar på ventilhuvudet på avgasventilen blir följande på grund av övertrycket som råder i cylindern. På insugsventilen verkar ingen kraft eftersom inget övertryck råder när insugsventilen är öppen.

$$kraft_{VH,AV} = A_{VH} * p_{cylinder} = 0{,}007^2 * \pi * 50000 = 7{,}70\ N$$

$$kraft_{VH,IV} = A_{VH} * p_{cylinder} = 0{,}0075^2 * \pi * 0 = 0\ N$$

Den komprimerade fjädern vill stänga ventilen. Fjädern är komprimerad 6,8 mm när ventilen är fullt öppen. Fjäderkraften är linjärt ökande med den komprimerade längden. Fjäderkonstanten, k, är 4,46 N/mm

$$kraft_{fjäder} = k * x_{ventil\ öppen} = 4{,}46 * 6{,}8 = 30{,}3\ N$$

Kraften för att hålla ventilen öppen blir följande. Kraften ska sedan multipliceras med 3 eftersom en utväxling på 1:3 används mellan solenoiden och ventilhuvudet.

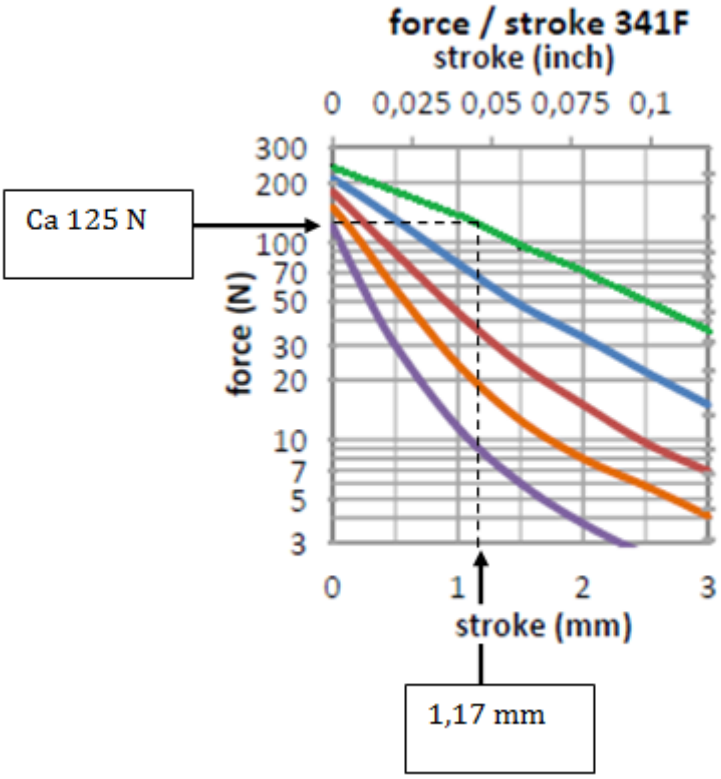
$$hållkraft_{AV} = 3 * (kraft_{VH,AV} + kraft_{fjäder}) = 3 * (7{,}70 + 30{,}3) = 114\ N$$

$$hållkraft_{IV} = 3 * (kraft_{VH,IV} + kraft_{fjäder}) = 3 * (0 + 30{,}3) = 90{,}9\ N$$

Hållkraften för avgasventilen blir större på grund av övertrycket i cylindern. Troligtvis behöver inte $kraft_{VH,AV}$ räknas med eftersom att trycket minskar när avgasventilen öppnas. Det medför att hållkraften för avgasventilen också blir 90,9 N.

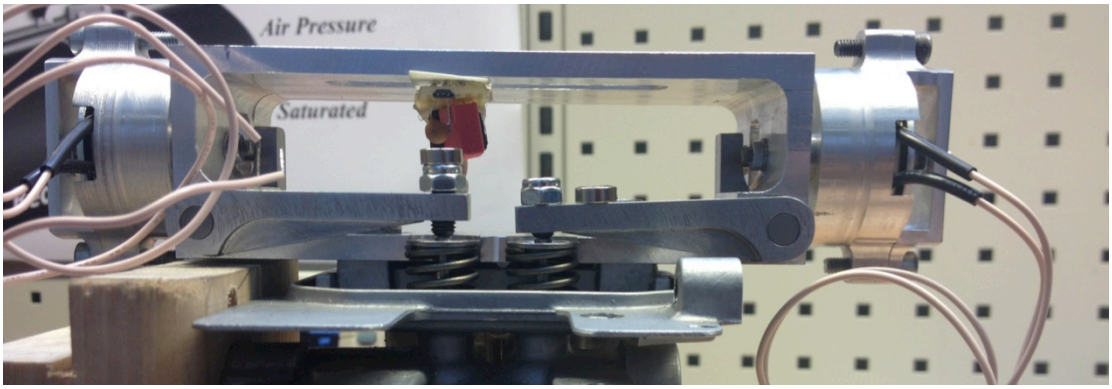
Efter granskning av olika solenoidtillverkares utbud och jämförelse med kraven från beräkningarna valdes en solenoid från tillverkaren Geeplus. Solenoiden benämns 341F och dess datablad finns i *"Appendix A. Datablad".* Antalet lindningsvarv på spolen är 252. Figur 4-2 är hämtad från solenoidens datablad och visar kraften som solenoiden kan leverera vid en viss slaglängd. De olika kurvorna gäller för olika driftscykler. Avseende hållkraften kommer den att köras på en 25 % driftscykel enligt resonemanget under rubriken *"3.1.3 Driftscykel*" i genomförandedelen. Slaglängden kommer att vara 0 mm eftersom solenoiden är i sitt bottenläge när ventilen är fullt öppen. I figur 4-9 går det att utläsa att solenoiden klarar av att leverera en kraft på cirka 180 N vid 0 mm slaglängd, vilket är tillräckligt då den dimensionerande hållkraften är 90,9 N.

Vid ventilöppning kommer slaglängden vara 1,17 mm eftersom ventilen är helt stängd. Ventillyftet är 1,17 mm enligt avsnittet *"4.2.2 Vipparmar"*. Driftscykeln är svårare att bestämma. Den kommer att vara avsevärt lägre än 10 % eftersom spänningen läggs på under en väldigt kort tid vid öppningsögonblicket. Detta är möjligt eftersom det inte behövs så mycket kraft när ventilen väl har börjat öppna, varför spänningen kan sänkas rejält. Enligt Bowes är en 2 % driftscykel lämplig att använda (Bowes 2005). Det motsvarar en pålagd spänning på 8 till 12 gånger spänningen vid 100 % driftscykel, vilket solenoiden klarar så länge spänningen sänks så fort solenoiden nått sitt bottenläge eller helst innan. I tillverkarens datablad finns ingen kurva för 2 % driftscykel inritad. Genom att rita in en kurva ovanför 10 % -kurvan med samma avstånd som mellan 25 % -kurvan och 10 % -kurvan fås en approximation på en 2 % -kurva. I figur 4-2 är detta den gröna kurvan. Avläsning vid 1,17 mm slaglängd ger en ungefärlig kraft på 125 N. Den maximala kraft som behöver levereras av solenoiden enligt avsnittet *"4.1.1 Beräkning av solenoidkraft vid ventilöppning"* beräknades till 125,97 N. Således är solenoidkraften något mindre. Tilläggas bör att detta är uppskattade värden. Det är svårt att avgöra exakt hur mycket kraft solenoiden kan leverera. Det är möjligt att få ännu mer kraft ur solenoiden, det vill säga köra på en driftscykel på lägre än 2 %. Risken är dock att solenoiden blir överhettad. Det skulle alltså kunna vara fördelaktigt att använda kraftigare solenoider. Med kraftigare solenoider följer dock större rörlig massa och längre responstid. Med detta i vetskap beslutades att köpa in två stycken solenoider av modell 341F av Geeplus och beakta värmeutvecklingen.



Figur 4-2 Slaglängd-kraftdiagram

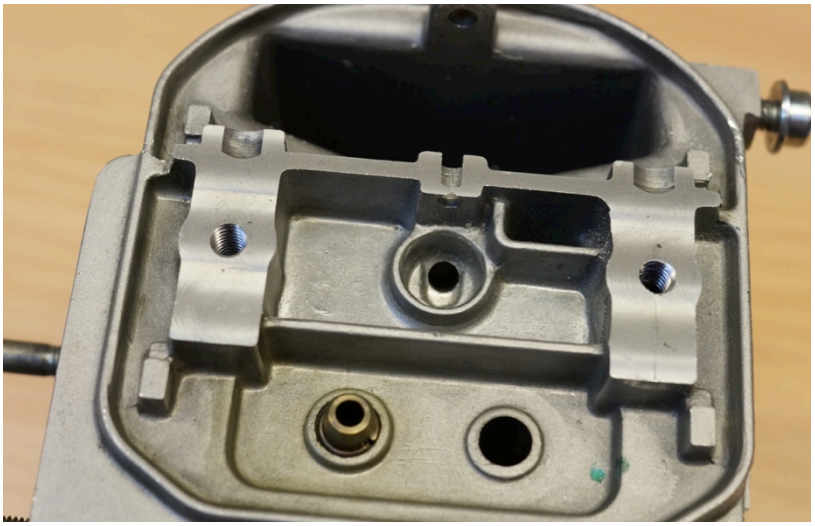
4.2 Mekaniskt system



Figur 4-3 Ventilstyrning monterad på löst topplock

Innan den slutgiltiga konstruktionen tillverkades gjordes ett antal skisser och CAD-modeller för att komma fram till en bra design. FE-analyser genomfördes på vipparmar och konsol för att dimensionera mot utmattning. Alla ingående komponenter har tillverkats manuellt med hjälp av svarv och fräs och designen har anpassats för detta. Valet att inte tillverka delarna med hjälp av CNC-styrda maskiner gjordes främst för att spara tid, då kompetensen för att köra dessa maskiner saknades.

4.2.1 Honda GX-35 motor



Figur 4-4 Bearbetat topplock på Honda GX35-motorn

Motorn som används vid testerna är en encylindrig fyrtaktsmotor med en slagvolym på 35cm^3 och två ventiler. Kamaxeln drivs av en tandrem och verkar på ventilskaften genom hävarmar som sitter fast på glidlagrade axlar i topplocket. Då den nya ventilstyrningen inte behöver mekanisk koppling till vevaxeln så har kamaxeln, remmen och axlar plockats bort. Därefter har topplocket bearbetats genom fräsning för att skapa en plan yta där konsolen för den nya ventilstyrningen kan fästas. Nya hål för infästningen har borrats och gängats. I och med dessa modifieringar kommer motorns smörjsystem inte att fungera som tidigare, det är därför viktigt att ventiler och övriga rörliga komponenter smörjs kontinuerligt för att säkerställa låg friktion. På testmotorn mynnar vevhusventilationen ut i topplocket vilket inte är möjligt efter modifieringen. På Veramotorn är konstruktionen annorlunda och innebär inget problem. För att undvika oljestänk har hålet där kamremmen löper tätats med ett filter, och en uppsamlingsbehållare för spilloljan från vevhusventilationen används vid drift.

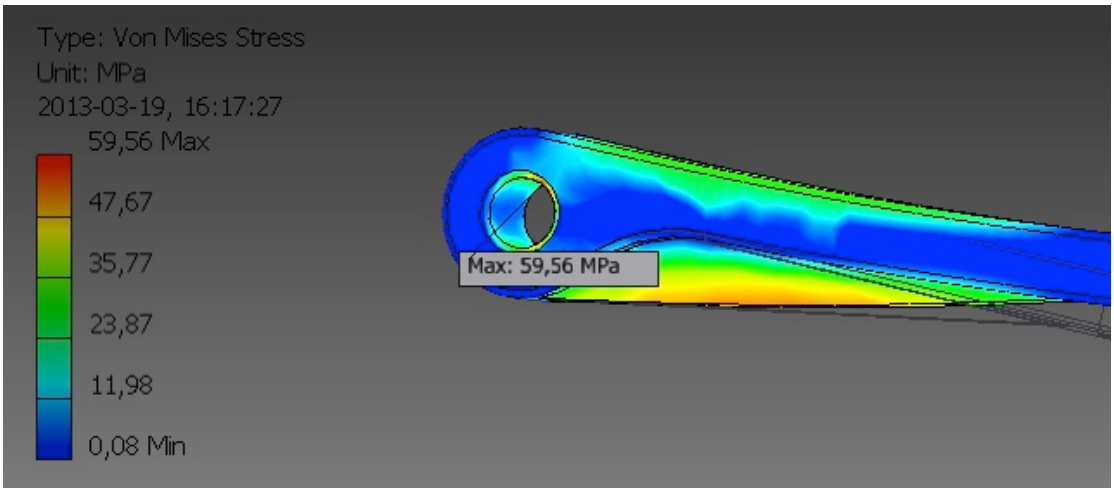
4.2.2 Vipparmar



Figur 4-5 Den lilla vipparmen som solenoiden trycker på

Vid konstruktionen av vipparmarna var det viktigaste designkriteriet att minimera slaglängden på solenoiden för att maximera kraften vid öppning. För att uppnå önskad kraft med solenoiden bör inte slaglängden överstiga 1 mm, samtidigt finns kravet att ventillyftet skall vara 3,5 mm vid fullt öppet läge på både insugs- och avgasventil. Med den storlek på solenoid som valts var det rimligt att placera solenoiden så att hävarmens längd på den korta vipparmen blev 15 mm räknat från axelns centrum. Utväxlingen valdes till 1:3 vilket innebär att hävstångens längd på den långa vipparmen blir 45 mm. För att uppnå det önskade ventillyftet behöver solenoidens slaglängd vara 3,5 mm/3 ≈ 1,17 mm vilket är godtagbart.

Den första designen av vipporna användes till funktionsmodellen och skrevs ut i 3D-skrivare med hjälp av friformsframställning (FFF) (eng. Rapid prototyping). Vid en senare strukturanalys upptäcktes att utböjningen på den långa vipparmen vid full belastning blev för stor. Därför gjordes en omkonstruktion där en förstärkning i form av en kilformad ribba lades till.



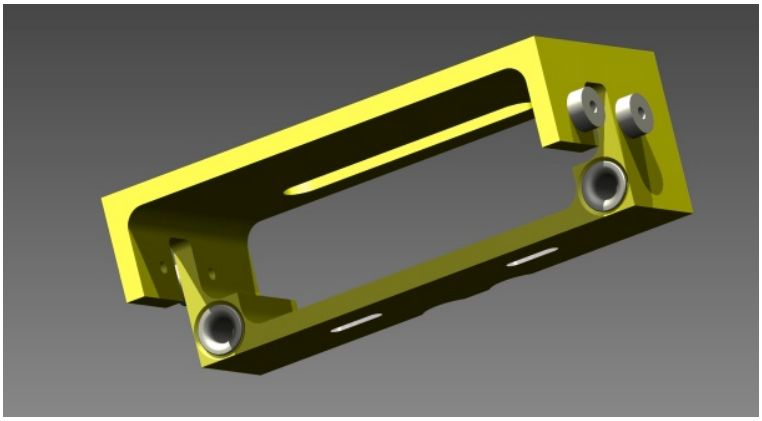
Figur 4-6 Spänningar i den långa vipparmen som trycker på ventilen

Materialet i vipporna är SS 1650, ett kolstål som används för axlar och dylikt. För att undvika utmattning får spänningen inte överstiga 240 MPa vid växlande, pulserande utböjning. Enligt strukturanalysen som utfördes i Autodesk Inventor är den maximala spänningskoncentrationen ~59 MPa von Mises-spänningar, vilket ger en säkerhetsfaktor på 4 mot utmattning. Spänningskoncentrationerna i den lilla vipparmen är så låga att ingen förstärkning behöver göras.

4.2.3 Axlar

Axlarna som används är samma axlar som ursprungligen sitter på motorn. Dessa har monterats i konsolen och vipparmarna har sedan pressats på.

4.2.4 Konsol



Figur 4-7 Konsol

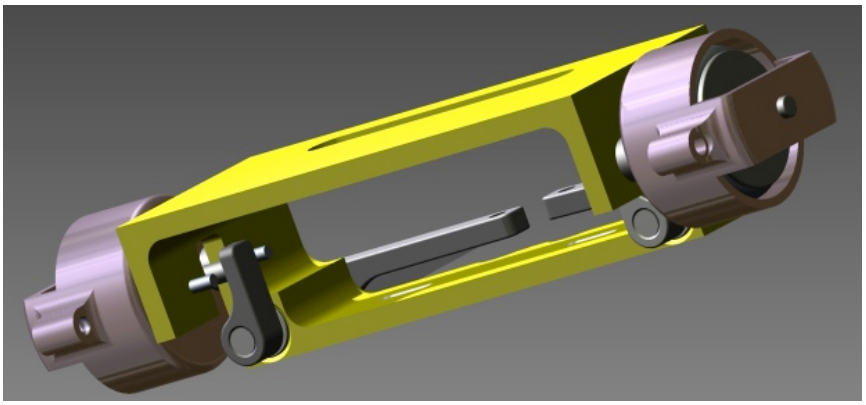
Konsolens design utgår från måtten på de komponenter som skall monteras på konsolen och utseendet på motorn. Konsolen fästs på topplocket med skruvförband. För att möjliggöra justering av konsolens läge löper skruvarna genom frästa spår i konsolen. Solenoiderna monteras på konsolens kortsidor med skruvförband. Lagringen för axlarna består av bussningar med PTFE-beläggning (Teflon) för att minska friktionen. Detta är nödvändigt då ingen kontinuerlig smörjning under drift är möjlig efter modifieringen av motorn. För att anpassa solenoidernas läge används distanser som monteras mellan solenoidhållarna och konsolen. Solenoidernas slaglängd finjusteras sedan med hjälp av skruvar på vipparmarna. Konsolen är tillverkad i 7075-T6 aluminium, vilket ger en kombination av hög styrka, låg vikt och god bearbetbarhet, egenskaper som eftersträvas vid en senare implementering av systemet i Chalmers Eco Marathon. Den första designen som gjordes, och som också tillverkades med hjälp av FFF var u-formad. En strukturanalys visade att utböjningen vid belastning uppgick till mer än 0,1 mm. För att minska utböjningen och spänningskoncentrationerna i konsolen förstärktes konstruktionen genom att den ändrades till en rektangulär form.

4.2.5 Solenoidhållare



Figur 4-8 Solenoidhållare

Solenoidhållarnas uppgift är att hålla solenoiderna på plats och även hålla returfjädrarna för solenoiderna på plats. Hållarna tillverkades i aluminium, som har god termisk ledningsförmåga, vilket är fördelaktigt då solenoiderna blir varma vid drift.



Figur 4-9 Komplett bild av mekaniskt system

4.2.6 Triggerhjul

Triggerhjulet tillverkades i stål. En skiva svarvades först till rätt dimension. Därefter frästes spår i skivan. För att undvika obalans i skivan på grund av asymmetrin bör tyngdpunktens läge korrigeras antingen genom att material tas bort eller genom att fästa balanseringsvikter på skivan. Enklast är att redan i designfasen korrigera för detta. För att fästa triggerhjulet på motorn tillverkades en adapter som skruvas fast på motorns svänghjul. Ett problem med detta är att det saknas en styrning för att centrera triggerhjulet på vevaxeln vilket leder till obalans och vibrationer vid drift. För att centrera triggerhjulet bör adaptern och svänghjulet centreras och en styrning konstrueras.

4.3 Spänning och tidsberäkning för solenoider

Med standardventilfjädrar monterade krävdes en spänning på cirka 8-10 V för att hålla ventilerna öppna. Det antogs att spänningen för att hålla insugsventilen

respektive avgasventilen öppen var lika stor med anledning att bidraget från övertrycket som råder precis innan öppning av avgasventilen kan försummas enligt resonemanget i *"4.1.2 Hållkraft".* Den specificerade spänningen för 25 % driftscykel är 8,4 V enligt databladet för solenoiden med AWG-nummer 25 (*"Appendix A. Datablad"*). Det innebär att en spänning på 8 till 10 V kan appliceras eftersom värmeavledningen är god samt att driftstiden för motorn är kort.

För att öppna ventilen med tillräckligt snabb acceleration och kort öppningstid krävdes att en spänning på 40 V lades på. Denna spänning resulterade i följande tider som är intressanta för att bestämma vevaxelposition för när signal om öppning och stängning ska skickas. Tiderna följer i tabell 4-1.

Fjäder	Responstid öppning [ms]	Öppningstid [ms]	Responstid stängning [ms]	Stängningstid [ms]
Standard Honda GX35	4,5	2	3	3
Lesjöfors SF-TF 1430	3	2	7	3

Tabell 4-1 Respons- samt öppnings- och stängningstider

Vid 5000 RPM åtgår 12 ms för vevaxeln att rotera ett varv vilket innebär att tiden för ett halvt varv är 6 ms. Öppningstiden är ca 2 ms och stängningstiden ca 3 ms, det innebär att ventilen precis hinner öppnas för att sedan stängas under ett halvt varv.

$$2 + 3 = 5 \leq 6\ [ms]$$

4.4 Styrsystem

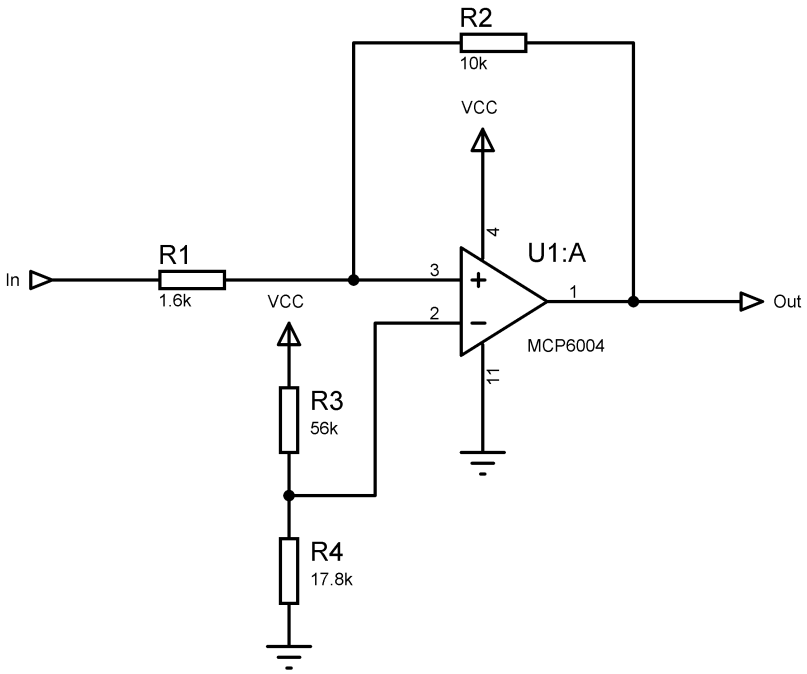
4.4.1 Kretsar

Position

En nackdel som visade sig uppträda när en optisk läsgaffel användes var den fördröjning som transistorn som gav signalspänningen uppvisade mellan sina två lägen. Denna kan delas upp i två delar, dels en ren fördröjning som är den tid som passerar mellan att ljuset från dioden blockeras till dess att en 10 % skillnad på transistorns utström kan uppfattas. Den andra delen består av stigtiden, som i detta fall är definierad som tiden det tar för utströmmen att förändras från sitt 10 %- till sitt 90 %-värde. På liknande sätt finns även en fördröjning och falltid från det att ljuset från lysdioden återigen uppfattas av transistorn och tills att utströmmen förändras från sitt 90 %- till sitt 10 %-värde och en 10 % förändring uppfattas från transistorn. Denna effekt gör att utsignalen från läsgaffeln inte blir en perfekt fyrkantspuls vilket är den bästa formen för en mikrokontroller att

avläsa. Pulsen som avges får istället ett mer och mer avrundat utseende beroende på hur korta intervall som skall avläsas. Signalen kommer alltså att förändras beroende på motorns varvtal och risken för styrsystemet att läsa fel blir stor. Dessutom kan detta även medföra att signalens toppvärde kan variera mellan olika varvtal, om transistorn inte helt hinner sänka utströmmen innan det är dags att höja strömmen igen.

En lösning på detta problem är att använda en komparator som fungerar som en analog till digital switch. Den har alltså en brytpunkt mellan två fördefinierade spänningsvärden som bestäms genom en analog inspänning. Brytpunkten som detta skall ske vid bestäms för att passa den givna konstruktionen. En utveckling från detta är en komparator med olika värden för sina två utnivåer. Den kan alltså väljas att ge en hög utsignal vid 1V men ändras inte till låg igen förrän dess att insignalen ger en annan vald inspänning exempelvis 0,5 V. Detta kallas hysteres och är ett effektivt sätt att motverka brusiga signaler och andra störningar. En komparator som har dessa egenskaper kallas populärt för en Schmittrigger. De värden som valdes var en lågnivå på 0,6 V och en högnivå på 1,4 V för att passa läsgaffeln. Dessa nivåer ger designen efter följande schema:



Figur 4-10 Schmittrigger-krets

4.4.2 Program

Position

För att kunna veta när programmet skall öppna ventilerna behöver vevaxelns aktuella position mätas med stor noggrannhet. Informationen som mikrokontrollern använder för detta kommer från positionssensorn som skickar

en digital puls för varje tand som passerar från triggerhjulet. Då det är väldigt viktigt att programmet fångar upp varje sådan puls, och i rätt tidpunkt används en interrupt-rutin som startar för varje sådan puls som mikrokontrollern fångar upp. Programmet håller reda på vilken tand i ordningen hos triggerhjulet som passerar genom att addera en variabel för varje gång denna interruptrutin körs. För att veta när denna räkning skall börja, och börja om för varje varv, kontrolleras tiden som passerat sedan sista gången rutinen kördes. Om tiden som passerat för den körda rutinstarten är mer än dubbelt så lång som den förra, antas att gapet i triggerskivan hittats, och räkningen börjar om.

I och med denna räkning av tänder, fås en upplösning på 10 grader med undantag för tandgapet. Denna upplösning är inte tillräcklig för att styra förbränningsmotorn på ett bra sätt. En upplösning på åtminstone 1 grad är önskvärd. För att kunna göra detta används tiden som förflutit sedan sista tanden passerat och hastigheten som vevaxeln roterar för att kontinuerligt räkna fram den nuvarande positionen. För att kunna mäta en tid med en mikrokontroller används en timer som är inbyggd i processorn och som arbetar parallellt med styrprogrammet. Denna timer ökas automatiskt av klockpulsen, och då denna är känd kan tiden som passerat räknas ut. I ATmega2560, som är mikrokontrollern som sitter i den Arduino som använts, finns 6 stycken timers, varav två 8-bitars och fyra 16-bitars. För denna funktion har timer5 använts, som är en 16-bitars timer som ställts in med en prescaler på x64. Detta innebär att timern ökas var 64:e klockpuls. Den längsta tiden som kan mätas beräknas genom ekv. 4.1, och upplösningen i tid kan skrivas med ekv 4.2.

$$t_{max} = 2^n * c_f * p \qquad (4.1)$$
$$t_{min} = c_f * p \qquad (4.2)$$

Där n är antalet bitar för timern, c_f är processorns klockfrekvens och p är förskalningen. För den valda mikrokontrollern fås med ekv 4.1 och ekv 4.2

$$t_{max} = 2^n * c_f * p = 2^{16} * \frac{1}{16 * 10^6} * 64 = 0.26144\ [s]$$

$$t_{min} = c_f * p = \frac{1}{16*10^6} * 64 = 4 * 10^{-6}[s]$$

Triggerhjulet saknar två tänder, vilket medför att gapet blir 1/12 av ett varv. t_{max} motsvarar därför den längsta tiden det tar för vevaxeln att rotera 1/12 varv. På grund av detta är det lägsta varvtal som motorn måste hålla för att timern inte ska hinna börja om:

$$rpm_{min} = t_{max} * 12 * 60 \approx 189$$

Denna timer används alltså för att bestämma hur lång tid som förflutit sedan interruptrutinen senast startades. När denna information har sparats, startas den sedan om från noll igen. Den är även kontinuerligt tillgänglig för mikrokontrollern att använda för beräkningar. Så för att bestämma vevaxelns nuvarande position beräknas följande för varje iteration av huvudfunktionen:

$$V_{pos} = \left(\frac{timer_5 * v_{hast}}{\frac{16*10^6}{64}} \right) + n_t * 10 + n_2 * 360$$

Där V_{pos} är vevaxelpositionen, n_t är antalet tänder som passerat, och n_2 är en variabel som är 1 när vevaxeln är inne på varv två.
Denna beräkning tar hänsyn till den senast uträknade vevaxelhastigheten v_{hast} (grader/s), och tiden för varje antal i timern (klockfrekvensen/64). Resultatet blir vevaxelns position i hela grader räknat från första tanden efter tandgapet.

Uppstartsrutin
Då systemet omstartas, eller då motorn stannat, finns ingen möjlighet för programmet att veta motorns position. Denna kan ju endast beräknas utifrån tandgapet som finns en gång per vevaxelvarv. Av denna anledning finns en rutin som körs efter omstart eller om timer5 nått sitt maxvärde. Denna rutin nollställer tandräkningen och stänger ventilerna, om de för närvarande är öppna. Detta görs dels på grund av risk för överhettning av solenoiderna om de är öppna för länge, men också för att minimera risken att kolven ska slå i någon ventil som är öppen då kolven närmar sig TDC.

Denna rutin fångar upp programexekveringen och hindrar programmet att börja öppna och stänga ventilerna innan ett tandgap har hittats, och vevaxelns positionering fungerar som det är tänkt. På grund av detta måste motorn snurra maximalt ett helt varv innan ventilerna kan börja öppna.

Öppning av ventiler
För att få motorn att gå är det viktigt att ventilerna öppnar och stänger vid rätt vevaxelposition. Vilka dessa öppnings- och stängningspunkter är bestäms av varvtalet och vilken karaktär och verkningsgrad som eftersträvas hos motorn. Vid ett fullt utvecklat och optimerat aktivt ventilsystem är det önskvärt att kunna ändra dessa punkter beroende på exempelvis varvtal och belastning av motorn. Detta styrprogram innehar inte denna komplexitet. I denna version eftersträvas att ventilerna öppnar och stänger efter fyrtaktsmotorns grundprincip, vilket innebär att insugsventilen är öppen mellan 0-180 vevaxelgrader, och avgasventilen mellan 540-0 grader. Detta ger en bra startpunkt för att provköra och trimma in systemet.

För att få denna öppning, krävs att styrprogrammet tar hänsyn till motorvarvtalet när det skickar styrsignalerna till ventilerna. Detta beror på den

fördröjning som finns både för öppning och för stängning, orsakade av solenoidens egna induktans. Dessutom kan en fyrtaktsmotor med endast en cylinder ha en stor varvtalsvariation under sina fyra takter. För att lösa dessa problem krävs att styrprogrammet räknar ut motorns medelhastighet, som sedan används för att beräkna de positioner vid vilka styrsignalerna till ventilstyrningen skall skickas. Detta görs en gång per varv och används för att vid varje ny genomgång av huvudfunktionen kontrollera om motorns vevaxel befinner sig på en position där någon ventil behöver öppnas eller stängas.

För att räkna fram dessa positioner används solenoidernas fördröjning som bestämts genom mätningar av det faktiska systemet. Dessa beräkningar genomförs varje vevaxelvarv, under den period där inga andra viktiga händelser sker, för att förhindra att dessa påverkas.

När vevaxeln väl befinner sig där en ventilöppning skall ske, kommer programexekveringen att flyttas till en speciell ventilöppningsfunktion. Denna funktion skickar initialt strömkällans fulla strömkapacitet till solenoiden utan någon PWM-styrning av strömmen. Detta för att minska tidsfördröjningen, och ventilöppningstiden. Sedan fastnar funktionen i en loop, där den läser av ventilens position genom halleffektgivarens signal. När ventilen når ett fördefinierat värde påbörjas PWM-styrningen av solenoidens ström. Strömmen begränsas därigenom till att enbart hålla ventilen öppen. Av denna anledning används två mikrokontrollers till detta styrsystem. När funktionen för öppning anropats, upptas då denna kontroller helt av att läsa av halleffektgivaren till ventilen. Detta innebär att om den andra ventilen behöver öppnas eller stängas under denna period, kommer denna händelse att missas. Därför används en mikrokontroller för varje ventil.

Stängning av ventiler

Stängningen av ventilerna fungerar på liknande sätt som öppningen. När styrprogrammet identifierat att vevaxeln befinner sig på en position där en stängning skall ske, skickas programexekveringen till en egen stängningsfunktion. Skillnaden mellan öppning och stängning ligger i hur regleringen av rörelsen sker. Om styrströmmen till solenoiden enbart skulle kapas, och ventilen lämnades att på egen hand stänga mot ventilsätet, skulle ventilen hoppa på ventilsätet på grund av den höga hastighet som byggts upp av kraften från ventilfjädern. Dessa hopp kan dels vara skadligt för sätet, och lämnar ventilen öppen under en period där den skall vara stängd vilket påverkar motorns gång negativt. För att eliminera detta problem skickas en kort strömpuls till solenoiden, vilket saktar ner ventilen tillräckligt för att mjukt stänga mot ventilsätet. På liknande sätt som för insugsventilen, bestäms tidpunkten för denna puls genom att mikrokontrollern läser av ventilens position genom halleffektgivaren.

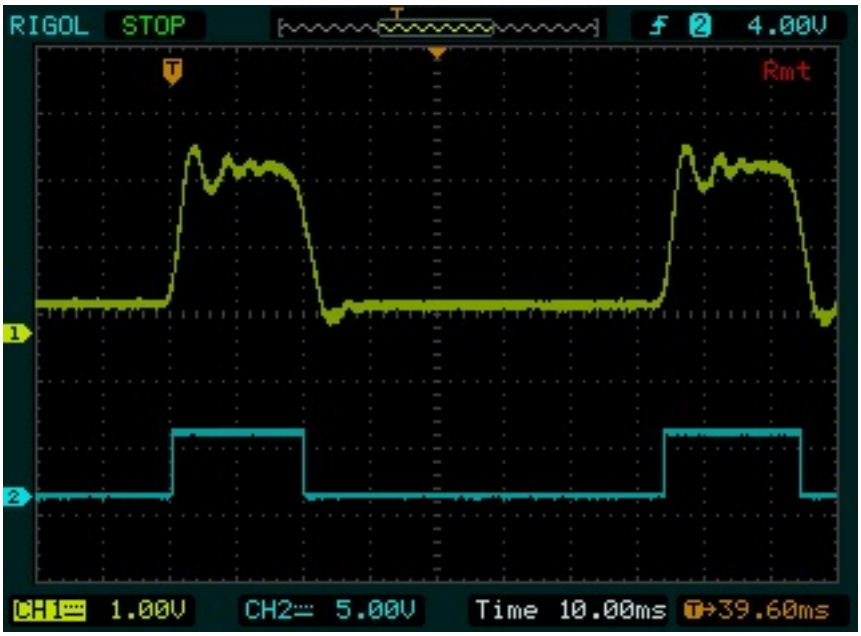
4.5 Provning och utvärdering

Graferna nedan i figur 4-11 och 4-12 är hämtade från oscilloskopet under testfas ett. Den övre kurvan visar ventillyftet och den undre visar 180° från TDC till BDC, tiden då ventilen ska vara öppen. På x-axeln är tiden graderad, figur 4-11 motsvarar 790 RPM och figur 4-12 motsvarar 1500 RPM. Det går att se på graferna att lyftkurvorna inte är helt perfekta, till exempel att ventilen oscillerar vid öppningen samt att ventilen öppnar mer än vad den ska. Detta framträder extra tydligt i figur 4-12 där motorn roterar med 1500 RPM. Ventilen oscillerar i princip under hela öppningstiden. Även vid stängning uppträder en svängningsrörelse som har sitt ursprung från att ventilen träffar ventilsätet med en för hög hastighet. Se speciellt figur 4-12.

Intressant att notera är även att stängningarna inte alltid såg likadana ut, till exempel i figur 4-11 uppträder en liten bula i lyftkurvan när ventilen ska stängas. Detta kunde variera från cykel till cykel och mellan olika varvtal. Under provning uppstod också vissa missljud när ventilerna öppnades och stängdes, orsaken till dessa behandlas under avsnitt 5.2.1.



Figur 4-11 Lyftkurva vid 790 RPM



Figur 4-12 Lyftkurva vid 1500 RPM

När ventilstyrningen testades under förbränning kunde konstateras att den fungerade så pass väl att motorn kunde hålla en konstant gång. Dock gick motorn ganska ojämnt och endast upp till ca 1000 RPM. Enligt visuell observation verkade inte avgasventilen öppna vid varje cykel. Detta diskuteras under rubriken *"5.3 Elektronik och styrsystem"*.

5 Diskussion

5.1 Val av solenoider och responstid

Enligt beräkningarna som utfördes skulle solenoiderna klara av att leverera tillräckligt med kraft för att kunna öppna ventilerna. Det första testet visade att de klarade av att öppna både med originalfjädrarna monterade samt med de lättare fjädrarna monterade. De lättare fjädrarna valdes med syfte att minska belastningen på solenoiderna. I det fall en mindre solenoid använts hade sannolikt responstiden minskat men den större belastning detta medfört på solenoiden hade fört den närmare gränsen av vad den klarar av utan att bli överhettad.

Att byta till lättare fjädrar innebar att öppningsrespons- och öppningstiden minskade på grund av lägre motstånd när solenoiden skulle börja accelerera. Nackdelen med lättare fjädrar är att stängningsrespons- och stängningstiden ökar på grund av att en inte lika stor kraft vill trycka tillbaka ventilen till sitt stängda läge. Detta får konsekvenser vid högre varvtal när tidsintervallen blir väldigt små och mikrokontrollern har väldigt lite tid på sig att skicka ut öppnings- och stängningssignaler.

Andra faktorer som inte har undersökts är hur virvelströmmar påverkar responstiden. Virvelströmmarna är ett problem eftersom magnetfältet i solenoiden slås på och av med en frekvens av 25 Hz vid 3000 RPM. Vid dessa frekvenser är problemet signifikant. Virvelströmmarna gör solenoiden varm och fördröjer magnetfältsavtagandet när strömmen slås av, detta gör att responstiden ökar samt att stängningen av ventilen tar längre tid. De flesta kommersiella solenoiderna är inte designade för att operera vid så här höga frekvenser (Bowes, 2005). Någon extrem värmeutveckling har inte observerats vilket tyder på att solenoiderna inte har belastats över sin kapacitet.

5.2 Mekanisk konstruktion

Den mekaniska konstruktionen har under testerna visat sig fungera mycket bra, den är stabil och visar inga tecken på att deformeras vilket styrker resultatet från FEM-analysen som gjordes. Ett potentiellt problem är kontaktytan mellan tryckstången på solenoiden och den lilla vipparmen. Eftersom kontaktytan är plan på tryckstången kommer endast underkanten av tryckstången i kontakt med vipparmen, det ger höga spänningar på en liten yta. Ett sätt att lösa detta kan vara att härda den mindre vipparmen eller att utforma en rund kontaktyta så att den glider mot vipparmen och inte enbart trycker på en punkt.

5.2.1 Missljud

Det uppstår metalliskt ljud från när solenoidens tryckstång går i botten och slår emot solenoidkroppen. Ett metalliskt ljud uppkommer även när ventiltallriken

stänger mot ventilsätet. På ett konventionellt kamaxelstyrt system dämpas ventilens hastighet kraftigt precis innan den stänger vilket kan ses på hur ventilkurvan planar ut precis innan ventilstängning i figur 2-3. Den här dämpningen saknas naturligt i systemet med solenoidstyrda ventiler. Ventilen dämpas istället genom att lägga på en spänning på solenoiden precis innan ventilen stänger, enligt beskrivning under rubriken *"3.6 Design av styrsystem"* och under rubriken *"Stängning av ventiler"* i avsnittet *"4.4.2 Program".* Hittills har dämpningen dock inte kunnat göras lika konsekvent som hos ett kamaxelstyrt system, varför missljud från ventilerna uppstår.

Det förstnämnda missljudet kan avhjälpas genom att placera en dämpningsbricka mellan solenoidens kropp och tryckstång. Risken är dock att denna slits ner fort. Det sistnämnda missljudet är möjligt att minska genom att förfina och optimera programvaran så att systemet hinner med att dämpa ventilernas hastighet konsekvent vid varje ventilstängning. Ett ytterligare steg att minska missljuden är att bygga in hela ventilsystemet under en ventilkåpa.

5.3 Elektronik och styrsystem

Drivkretsarna till solenoiderna fungerade bra ihop med solenoiderna som användes i detta projekt, det gick enkelt att reglera och styra solenoiderna tack vare PWM-styrningen som finns i Arduino-mikrokontrollern. Rent elektroniskt har inte någon flaskhals uppmärksammats som hindrar systemet att fungera som det ska.

Problemet med att ventilerna inte klarar av högre varvtal beror på att programvaran behöver förfinas och optimeras för att hinna med. En lösning kan vara att använda tre mikrokontrollers istället för två, en som beräknar motorns position och två som sköter öppningen och stängningen av ventilerna. På så sätt kan en mikrokontroller konstant beräkna vilken position och hastighet motorn har och sedan skicka signal till antingen insugs- eller avgasmikrokontroller om öppning eller stängning.

6 Slutsats och rekommendationer

Eftersom solenoiderna klarar av att leverera den kraft som behövs för att öppna ventilerna och hålla de öppna samt att värmeutvecklingen i solenoiderna inte har vållat några bekymmer hittills kan valet av solenoider anses tillfredsställande. Det utesluts dock inte att värmeutvecklingen kan orsaka problem, särskilt på avgassidan där motorns värmeutveckling bidrar till att höja temperaturen hos solenoiden ytterligare. Det rekommenderas att motorn testkörs under en längre period samtidigt som värmeutvecklingen i solenoiderna noga noteras. Det rekommenderas också att de eventuella virvelströmmar som uppkommer i solenoiderna undersöks. Deras påverkan på responstiden hos solenoiderna och värmeutvecklingen i desamma bör undersökas. Det är möjligt att modifiera solenoiderna så att virvelströmmarna minskar.

Som nämndes i diskussionsavsnittet har den mekaniska konstruktionen visat sig fungera mycket bra. Följaktligen kan slutsatsen dras att konstruktionen i stort inte behöver omarbetas utöver anpassning för att implementeras på Veramotorn. Kontaktytan mellan tryckstången på solenoiden och den mindre vipparmen bör dock omarbetas för att förhindra nötning.

När det gäller missljuden från ventilstyrningssystemet är dessa ur funktionell synvinkel inte nödvändiga att åtgärda. De är av skönhetsrelaterad art. Det beror alltså på kravsättningen på ljudnivån huruvida missljuden bör åtgärdas eller ej i framtida arbete.

Kraftelektroniken har fungerat bra, som det stod att läsa om i diskussionsavsnittet. Problemet med att ventilerna inte kan öppnas korrekt vid högre varvtal, vilket är det mest angelägna problemet i arbetet, är relaterat till styrsystemet. Som nämndes beror det troligtvis på att programvaran måste förfinas och optimeras för att hinna med. Det rekommenderas att programvaran ses över samt att det utvärderas om det bör användas tre mikrokontroller istället för två enligt resonemanget i diskussionsavsnittet.

Projektmålet var att ta fram en fungerande prototyp för aktiv ventilstyrning för en förbränningsmotor. Prototypen skulle monteras på en förbränningsmotor och ersätta nuvarande ventilstyrning samtidigt som ventilerna skulle följa en given lyftkurva och motorn fungera under förbränning. Enligt uppnådda resultat är projektmålet delvis uppfyllt. En fungerande prototyp för aktiv ventilstyrning är framtagen och den fungerar att köra på en motor under förbränning. Dock kan inte ventilerna följa en given lyftkurva och utveckling av detta kräver fortsatt arbete med mjukvaruutveckling.

7 Litteraturförteckning

Bowes, D. (2005) The EVIC Student Guide to Solenoid Actuated Valves. Peterborough.

Japp, M.M. (2003) Formelsamling i mekanik. Göteborg: Chalmers tekniska högskola.

Johansson, A & Thulin, A. (2010) Design of a fuel efficient internal combustion engine. Göteborg: Chalmers tekniska högskola.

Johansson, A. (2013) Ventillyft för Veramotorn. Göteborg: Chalmers tekniska högskola.

Shell, 2013. shell.com
Tillgänglig på: http://s07.static-shell.com/content/dam/shell/static/ecomarathon/downloads/pdf/sem-rules-chapter012013.pdf
[Använd 21 05 2013]

Appendix A. Datablad

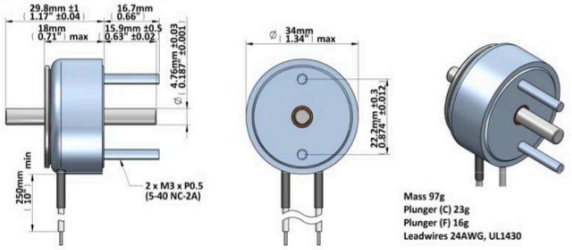
Fjäder
Lesjöfors SF-TF 1430
R=2,71 [N/mm]
L_0=20 [mm]
D_i=12 [mm]
D_y=14,4 [mm]
d_t=1,2 [mm]

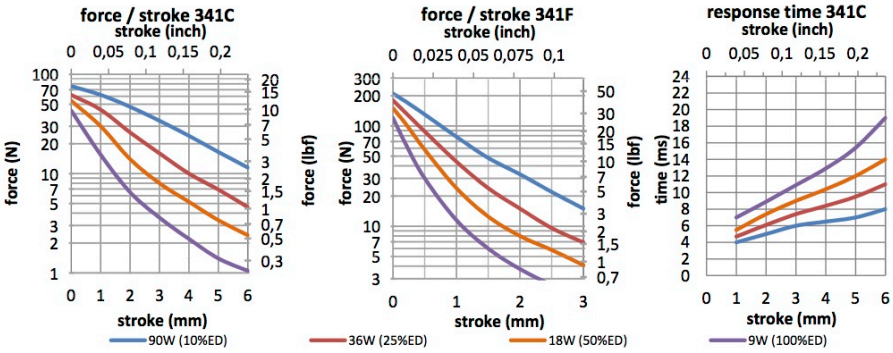
Solenoid

GEEPLUS Push Pull Solenoid size 341

Device drawn in energised condition
plunger options: conical (341C) / flat (341F)
Life Expectancy (cycles): >2M (-P), >10M (-PE)

Available mechanical options:
M: metric thread
F: SAE thread





Data at 20°C , device connected to heatsink 120x120x3mm aluminum

duty cycle = "on" time / ("on" time + "off" time) x 100%			100% cont.	50% or less	25% or less	10% or less
Max. "on" time in seconds			∞	100	36	8
watts at 20°C			9	18	36	90
ampere-turns at 20°			535	756	1070	1690
AWG no.	resistance Ω±10% (at 20°C)	number of turns	volts DC			
25	1,97	252	4,2	5,9	8,4	13
26	3,26	328	5,3	7,5	11	17
27	5,04	405	6,7	9,4	13	21
28	8,02	510	8,4	12	17	26
29	12,2	627	10	15	21	33
30	19,2	780	13	19	26	42
31	31,8	1008	17	24	33	53
32	47,0	1215	21	30	42	66
33	75,3	1530	26	37	53	84
34	120,5	1900	33	47	67	105
35	198	2486	42	59	84	133
36	280	2700	53	75	106	167
37	426	3350	67	94	133	210
38	648	4050	84	118	168	264
39	1020	5050	105	149	211	333
40	1667	6590	133	187	265	419

Insulation Resistance >100MΩ, 500VDC Megger
Dielectric Strength 1000VAC, 50/60Hz, 1 minute
Class E (120°C) insulation class

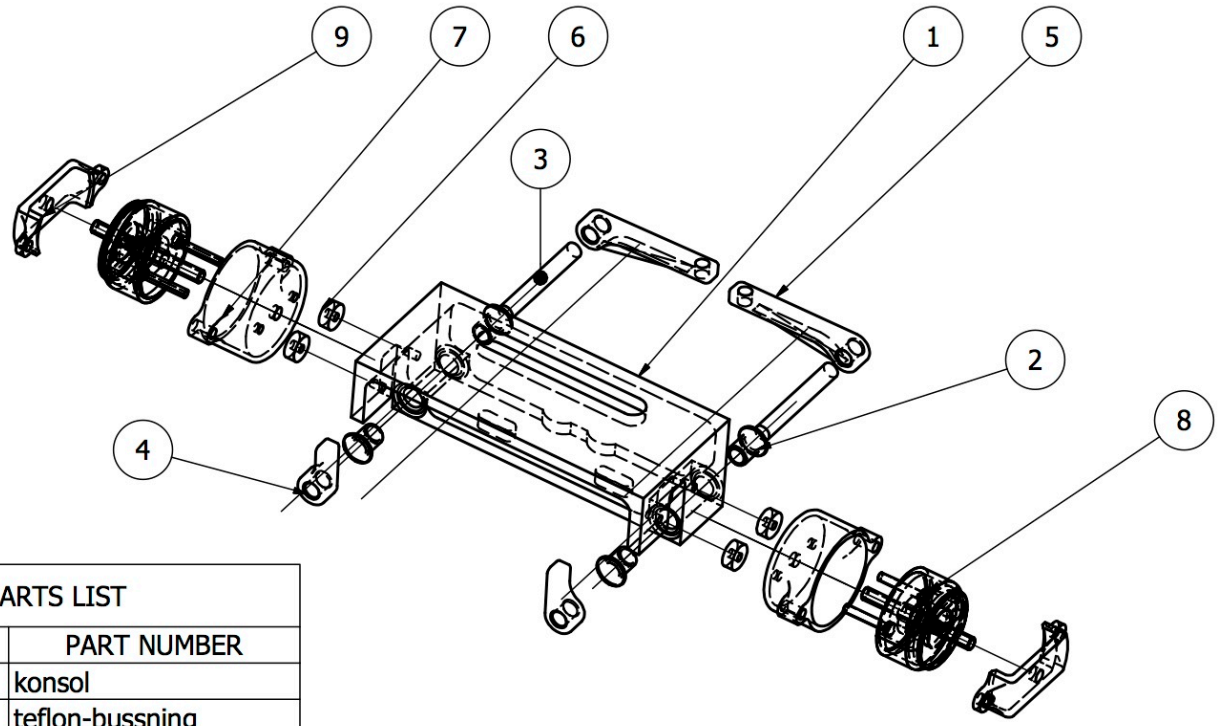
Geeplus reserves the right to change specifications without notice
www.geeplus.biz e-mail: info@geeplus.biz

Issue 08/2011

Appendix B. Ritningsunderlag

Sprängskiss ventilstyrning

PRODUCED BY AN AUTODESK EDUCATIONAL PRODUCT



PARTS LIST	
ITEM	PART NUMBER
1	konsol
2	teflon-bussning
3	axel
4	vipparm kort
5	vipparm lång
6	distanser
7	solenoidhållare
8	solenoid
9	solenoidhållare topp

Designed by	Checked by	Approved by	Date		Date	
Erik					2013-05-17	

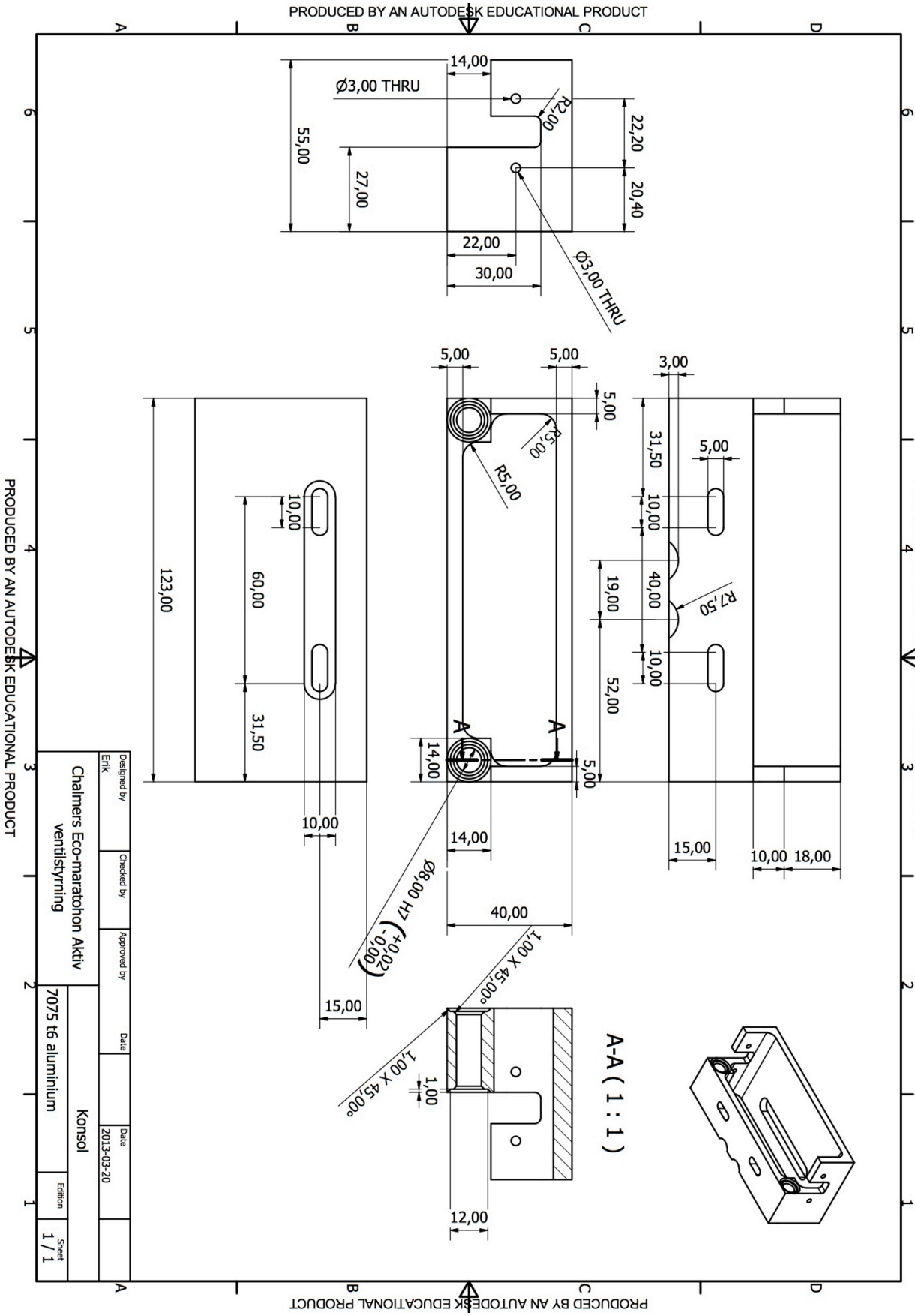
Chalmers Eco-marathon - Aktiv ventilstyrning	Sprängskiss ventilstyrning		
		Edition	Sheet 1 / 1

PRODUCED BY AN AUTODESK EDUCATIONAL PRODUCT

PRODUCED BY AN AUTODESK EDUCATIONAL PRODUCT

PRODUCED BY AN AUTODESK EDUCATIONAL PRODUCT

Konsol

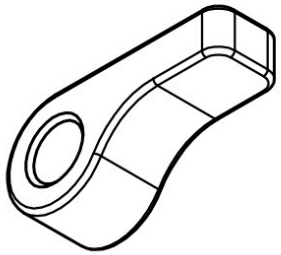

PRODUCED BY AN AUTODESK EDUCATIONAL PRODUCT
Ø3,00 THRU
R2,00
14,00
55,00
27,00
22,20
20,40
22,00
30,00
Ø3,00 THRU
5,00
5,00
3,00
5,00
R5,00
R5,00
31,50
5,00
10,00
40,00
19,00
R7,50
10,00
52,00
123,00
60,00
10,00
31,50
A
A
14,00
5,00
10,00
14,00
15,00
10,00
18,00
Ø8,00 H7 (+0,02 -0,00)
40,00
1,00 X 45,00°
15,00
1,00 X 45,00°
1,00
A-A (1 : 1)
12,00
Designed by
Erik
Checked by
Approved by
Date
Date
2013-03-20
Chalmers Eco-maratohon Aktiv ventilstyrning
Konsol
7075 t6 aluminium
Edition
Sheet
1 / 1

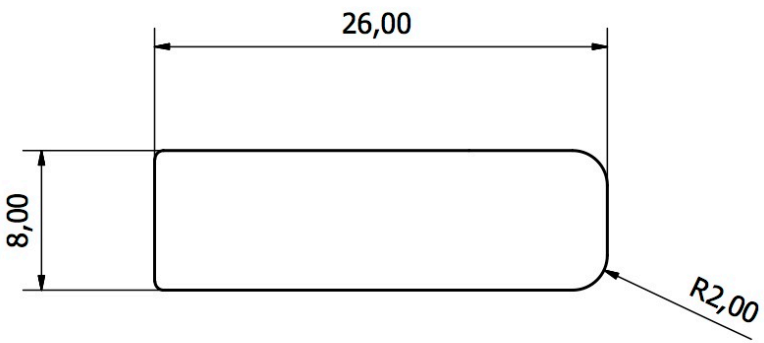
Lång vipparm

PRODUCED BY AN AUTODESK EDUCATIONAL PRODUCT
PRODUCED BY AN AUTODESK EDUCATIONAL PRODUCT
PRODUCED BY AN AUTODESK EDUCATIONAL PRODUCT
PRODUCED BY AN AUTODESK EDUCATIONAL PRODUCT
R6,00
9,93°
Ø6,00 S7 (-0,02 -0,03)
8,00
4,00
2,00
56,00
45,00
A
A
5,00
0,50 X 45,00°
0,50 X 45,00°
A-A (2 : 1)
Ø5,00
M5x0,8 - 6H
Designed by
Erik
Checked by
Approved by
Date
Date
2013-05-21
Chalmers Eco-marathon - Aktiv ventilstyrning
Tryckare lång
SS-1650 steel
Edition
Sheet
1 / 1

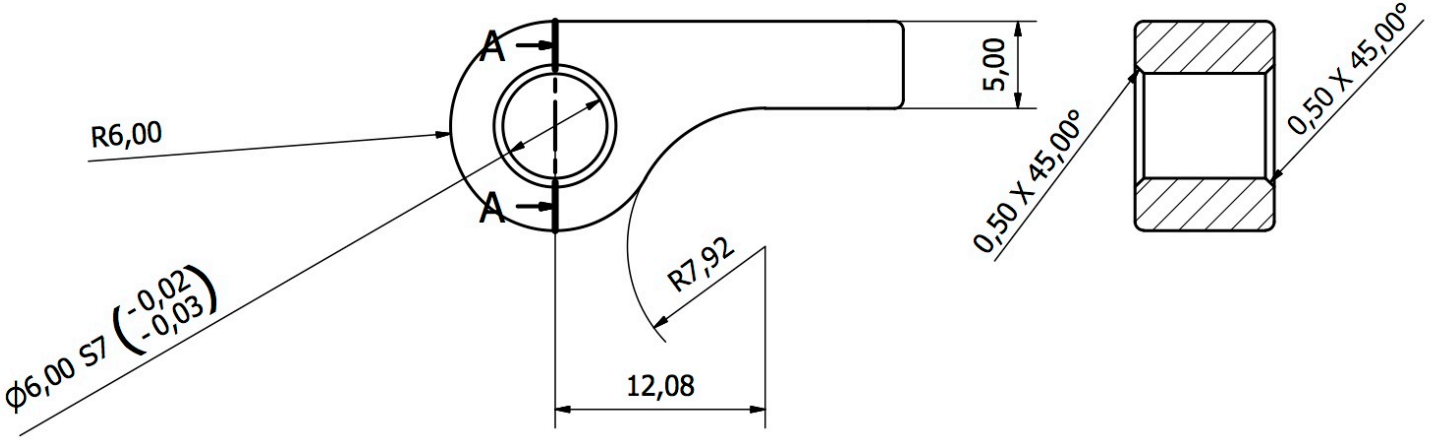
Kort vipparm

PRODUCED BY AN AUTODESK EDUCATIONAL PRODUCT





A-A (3 : 1)



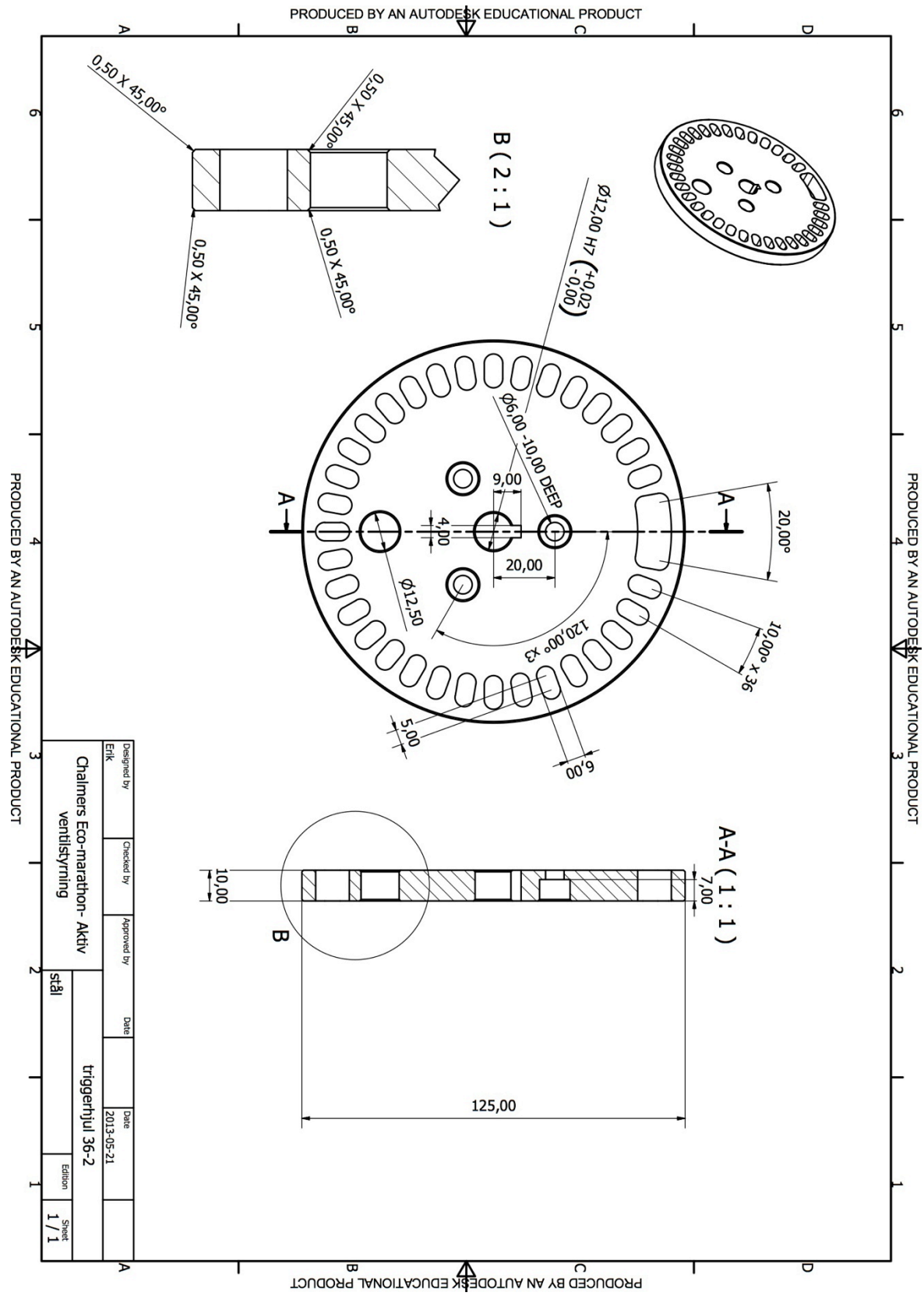
Designed by	Checked by	Approved by	Date		Date	
Erik					2013-05-21	

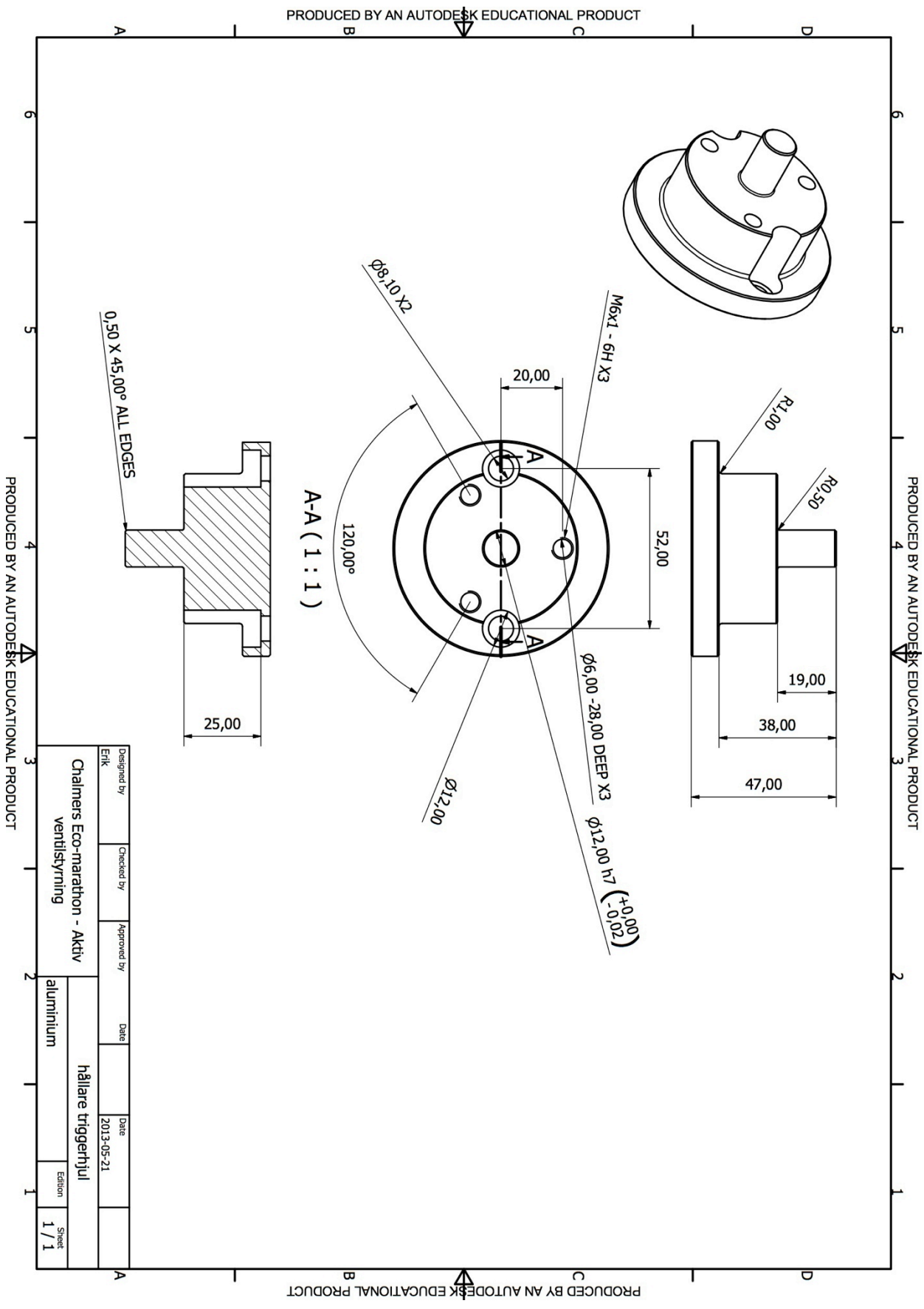
Chalmers Eco-marathon - Aktiv ventilstyrning	tryckare kort		
	SS 1650 steel	Edition	Sheet 1 / 1

PRODUCED BY AN AUTODESK EDUCATIONAL PRODUCT
PRODUCED BY AN AUTODESK EDUCATIONAL PRODUCT
PRODUCED BY AN AUTODESK EDUCATIONAL PRODUCT

X

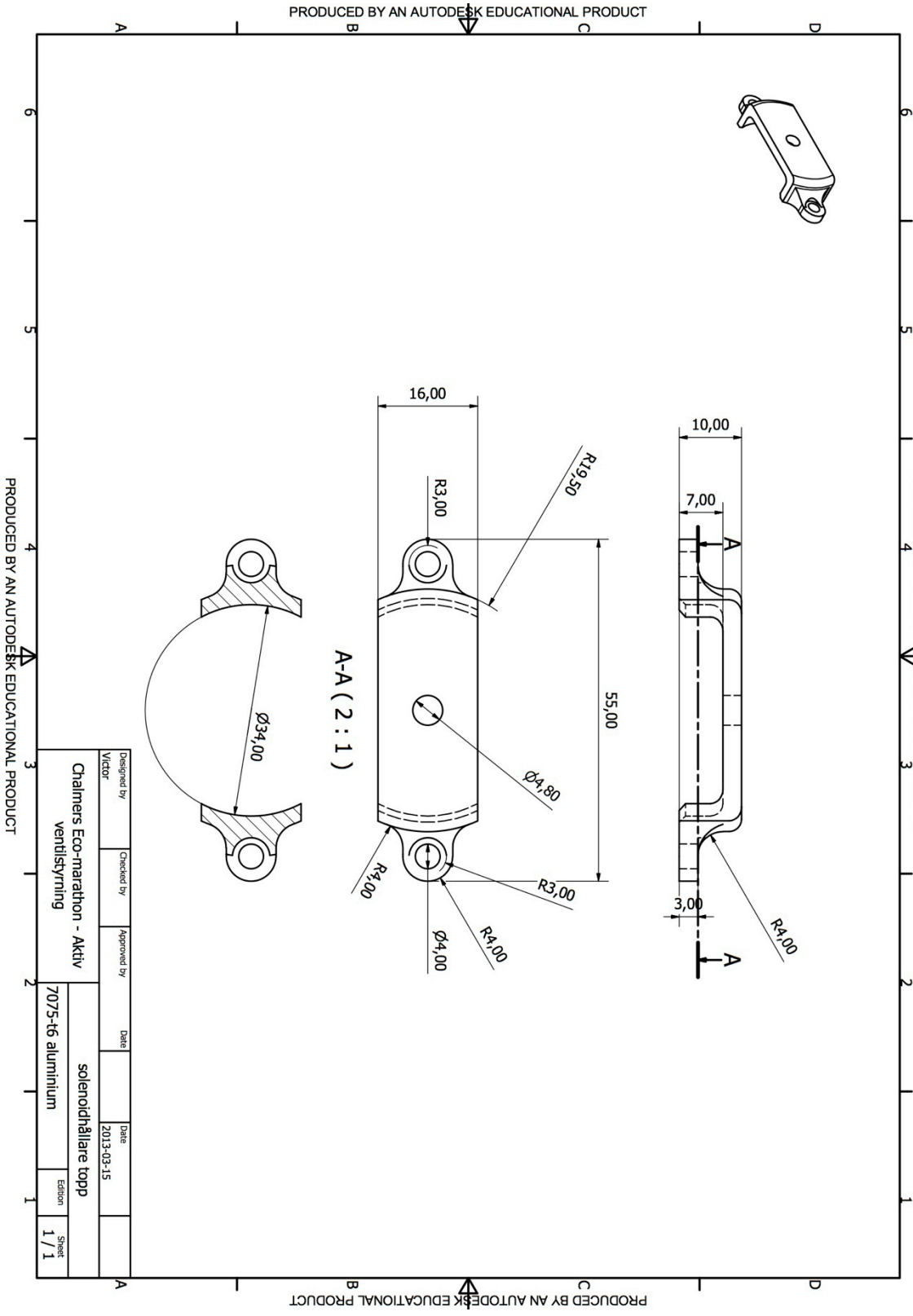
Triggerhjul 36-2

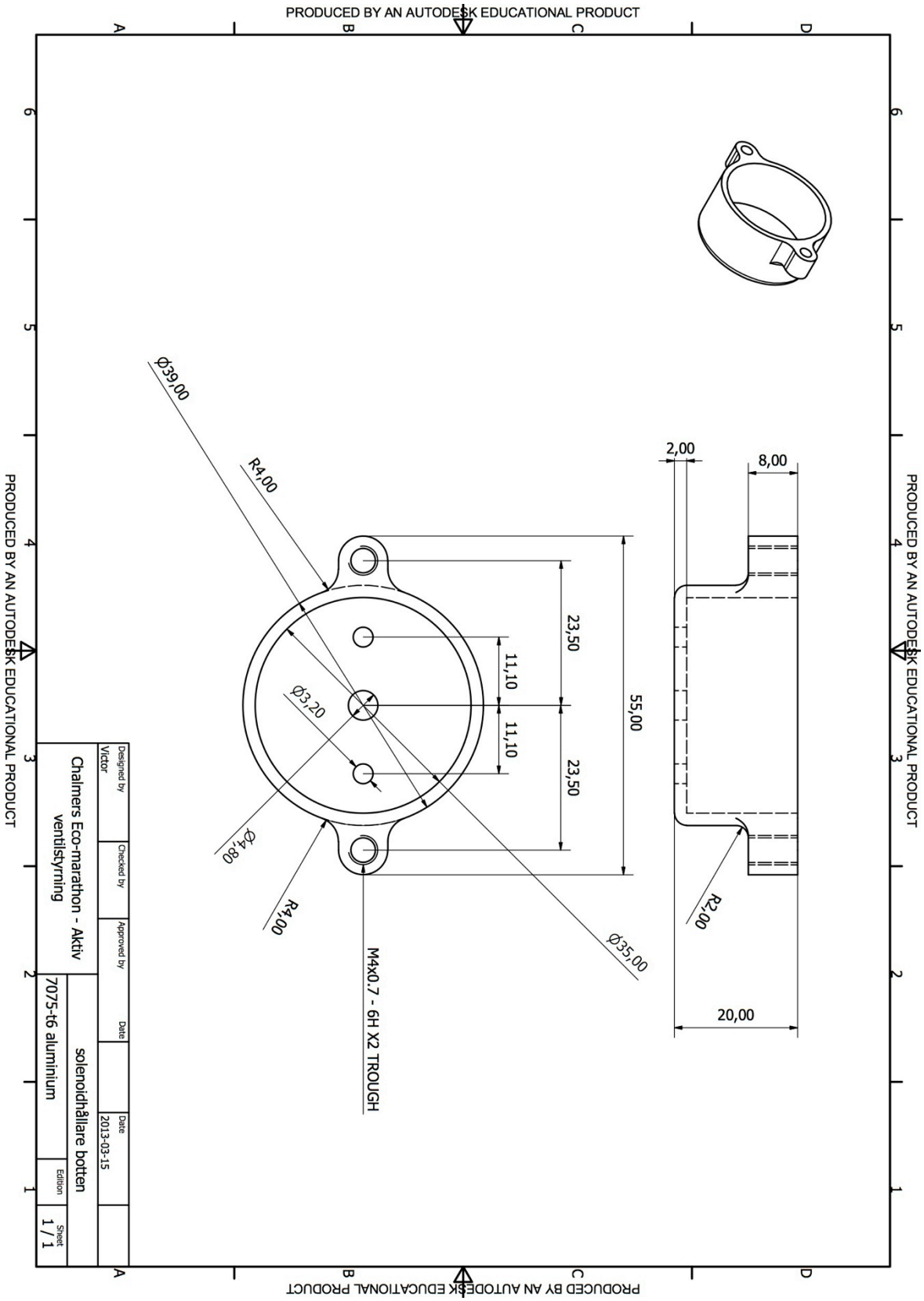

PRODUCED BY AN AUTODESK EDUCATIONAL PRODUCT
B (2 : 1)
0,50 X 45,00°
0,50 X 45,00°
0,50 X 45,00°
0,50 X 45,00°
Ø12,00 H7 (+0,02 -0,00)
Ø6,00 -10,00 DEEP
9,00
4,00
20,00
Ø12,50
120,00° x3
20,00°
10,00° x36
5,00
6,00
A-A (1 : 1)
10,00
7,00
125,00
Designed by
Erik
Checked by
Approved by
Date
Chalmers Eco-marathon- Aktiv ventilstyrning
Date
2013-05-21
stål
triggerhjul 36-2
Edition
Sheet
1 / 1



Hållare triggerhjul

Solenoidhållare topp


PRODUCED BY AN AUTODESK EDUCATIONAL PRODUCT
10,00
7,00
3,00
R4,00
A
A-A (2 : 1)
16,00
R3,00
R19,50
55,00
Ø4,80
R3,00
R4,00
Ø4,00
Ø34,00
Designed by
Victor
Checked by
Approved by
Date
Chalmers Eco-marathon - Aktiv ventilstyrning
solenoidhållare topp
7075-t6 aluminium
Edition
Date
2013-03-15
Sheet
1 / 1



Solenoidhållare botten

Appendix C. Tabell ventillyft

Tabell 1

Insugsventil		Avgasventil	
Kamvinkel [˚]	Lyft [mm]	Kamvinkel [˚]	Lyft [mm]
-67.4	0	-65	0
-66.4	0.00198938	-64	0.00168103
-65.4	0.00795753	-63	0.00672413
-64.4	0.0179044	-62	0.0151293
-63.4	0.0318101	-61	0.0268964
-62.4	0.0473273	-60	0.0403449
-61.4	0.0628449	-59	0.0537931
-60.4	0.0784814	-58	0.0674614
-59.4	0.0947276	-57	0.0823758
-58.4	0.112173	-56	0.0995932
-57.4	0.13143	-55	0.11998
-56.4	0.153112	-54	0.144232
-55.4	0.177823	-53	0.172891
-54.4	0.206137	-52	0.206368
-53.4	0.238584	-51	0.244958
-52.4	0.275631	-50	0.288861
-51.4	0.317666	-49	0.338198
-50.4	0.364983	-48	0.393035
-49.4	0.417765	-47	0.453397
-48.4	0.476073	-46	0.519289
-47.4	0.539912	-45	0.590712
-46.4	0.609282	-44	0.667666
-45.4	0.684182	-43	0.750151
-44.4	0.764613	-42	0.838165
-43.4	0.850571	-41	0.931636
-42.4	0.941906	-40	1.030221
-41.4	1.03804	-39	1.133309
-40.4	1.138032	-38	1.24009
-39.4	1.240756	-37	1.349634
-38.4	1.345077	-36	1.460969
-37.4	1.450025	-35	1.573152
-36.4	1.554942	-34	1.685345
-35.4	1.659374	-33	1.796827
-34.4	1.762917	-32	1.906957
-33.4	1.8652	-31	2.015173
-32.4	1.965886	-30	2.12098
-31.4	2.064672	-29	2.223953
-30.4	2.16128	-28	2.323729
-29.4	2.255465	-27	2.420001
-28.4	2.347007	-26	2.512517
-27.4	2.435712	-25	2.601078
-26.4	2.521409	-24	2.685524
-25.4	2.603947	-23	2.765743

Tabell 2

Insugsventil		Avgasventil	
Kamvinkel [˚]	Lyft [mm]	Kamvinkel [˚]	Lyft [mm]
-23.4	2.759054	-21	2.913211
-22.4	2.83142	-20	2.980398
-21.4	2.900219	-19	3.043221
-20.4	2.965386	-18	3.101705
-19.4	3.02687	-17	3.155893
-18.4	3.08463	-16	3.205837
-17.4	3.138634	-15	3.251598
-16.4	3.188856	-14	3.293237
-15.4	3.235277	-13	3.330816
-14.4	3.277883	-12	3.36439
-13.4	3.31666	-11	3.394002
-12.4	3.351596	-10	3.419686
-11.4	3.382678	-9	3.441451
-10.4	3.409891	-8	3.459289
-9.4	3.433216	-7	3.473244
-8.4	3.452626	-6	3.483575
-7.4	3.468116	-5	3.490742
-6.4	3.479852	-4	3.49533
-5.4	3.488219	-3	3.497978
-4.4	3.493763	-2	3.499312
-3.4	3.49711	-1	3.499862
-2.4	3.498899	0	3.5
-1.4	3.499707	1	3.499862
0	3.5	2	3.499312
1.4	3.499707	3	3.497978
2.4	3.498899	4	3.49533
3.4	3.49711	5	3.490742
4.4	3.493763	6	3.483575
5.4	3.488219	7	3.473244
6.4	3.479852	8	3.459289
7.4	3.468116	9	3.441451
8.4	3.452626	10	3.419686
9.4	3.433216	11	3.394002
10.4	3.409891	12	3.36439
11.4	3.382678	13	3.330816
12.4	3.351596	14	3.293237
13.4	3.31666	15	3.251598
14.4	3.277883	16	3.205837
15.4	3.235277	17	3.155893
16.4	3.188856	18	3.101705
17.4	3.138634	19	3.043221
18.4	3.08463	20	2.980398
19.4	3.02687	21	2.913211
20.4	2.965386	22	2.841654
21.4	2.900219	23	2.765743
22.4	2.83142	24	2.685524
23.4	2.759054	25	2.601078
24.4	2.683199	26	2.512517

Tabell 3

Insugsventil		Avgasventil	
Kamvinkel [˚]	Lyft [mm]	Kamvinkel [˚]	Lyft [mm]
25.4	2.603947	27	2.420001
26.4	2.521409	28	2.323729
27.4	2.435712	29	2.223953
28.4	2.347007	30	2.12098
29.4	2.255465	31	2.015173
30.4	2.16128	32	1.906957
31.4	2.064672	33	1.796827
32.4	1.965886	34	1.685345
33.4	1.8652	35	1.573152
34.4	1.762917	36	1.460969
35.4	1.659374	37	1.349634
36.4	1.554942	38	1.24009
37.4	1.450025	39	1.133309
38.4	1.345077	40	1.030221
39.4	1.240756	41	0.931636
40.4	1.138032	42	0.838165
41.4	1.03804	43	0.750151
42.4	0.941906	44	0.667666
43.4	0.850571	45	0.590712
44.4	0.764613	46	0.519289
45.4	0.684182	47	0.453397
46.4	0.609282	48	0.393035
47.4	0.539912	49	0.338198
48.4	0.476073	50	0.288861
49.4	0.417765	51	0.244958
50.4	0.364983	52	0.206368
51.4	0.317666	53	0.172891
52.4	0.275631	54	0.144232
53.4	0.238584	55	0.11998
54.4	0.206137	56	0.0995932
55.4	0.177823	57	0.0823758
56.4	0.153112	58	0.0674614
57.4	0.13143	59	0.0537931
58.4	0.112173	60	0.0403449
59.4	0.0947276	61	0.0268964
60.4	0.0784814	62	0.0151293
61.4	0.0628449	63	0.00672413
62.4	0.0473273	64	0.00168103
63.4	0.0318101	65	0
64.4	0.0179044		
65.4	0.00795753		
66.4	0.00198938		
67.4	0		

Appendix D. MATLAB-beräkning ventilacceleration

MATLAB-koden beräknar den momentana ventilaccelerationen genom att derivera ventillyftet med avseende på tiden två gånger. Lift är en vektor med samtliga värden på ventillyftet för insugsventilen från kolumn 2 i Tabell 1, 2 och 3 i *"Appendix C. Tabell ventillyft"*. Lift2 är motsvarande värden för avgasventilen från kolumn 4 i samma tabeller. Cangle är en vektor med samtliga värden på kamvinkeln för insugsventilen från kolumn 1 i Tabell 1, 2 och 3. Cangle2 är motsvarande värden för avgasventilen.

Ventilhastighet

Insugsventil

```
for i=1:length(Cangle)-1
    vin(i) = abs(Lift(i+1)-Lift(i))*1e-3/((abs(Cangle(i+1)-
Cangle(i)))*(1/15000)); %Beräknar hastighet i varje punkt
                        %Multiplicerar med (1/15000) för att räkna
                        %om från m/grad till m/s då det går
                        %15000 grader/s vid maxvarvtal 5000 RPM
    VCangle(i) = ((Cangle(i)+Cangle(i+1))/2); %För att kunna plotta
rätt kamaxelläge mot ventilhastigheten
end

figure(2)
plot(VCangle, vin, '-.b')
hold on
```

Avgasventil

```
for i=1:length(Cangle2)-1
    vut(i) = abs(Lift2(i+1)-Lift2(i))*1e-3/((abs(Cangle2(i+1)-
Cangle2(i)))*(1/15000)); %Beräknar hastighet i varje punkt
    VCangle2(i) = ((Cangle2(i)+Cangle2(i+1))/2);
end

plot(VCangle2, vut,'--r')
title('Ventilhastighet')
xlabel('Kamaxelläge [grader]')
ylabel('Ventilhastighet [m/s]')
legend('Insugsventil', 'Avgasventil','Location', 'SouthEast')
```

Ventilacceleration

Insugsventil

```
for i=1:length(vin)-1
    ain(i) = abs(vin(i+1)-vin(i))/((abs(Cangle(i+2)-
Cangle(i+1)))*(1/15000));
    ACangle(i) = ((VCangle(i)+VCangle(i+1))/2);
end

figure(3)
plot(ACangle, ain, '-.b')
hold on
```

Avgasventil

```
for i=1:length(Cangle2)-2
    aut(i) = abs(vut(i+1)-vut(i))/((abs(Cangle2(i+1)-
Cangle2(i)))*(1/15000));
    ACangle2(i) = ((VCangle2(i)+VCangle2(i+1))/2);
end

plot(ACangle2, aut, '--r')
title('Ventilacceleration')
xlabel('Kamaxelläge [grader]')
ylabel('Ventilacceleration [m/s^2]')
legend('Insugsventil', 'Avgasventil','Location', 'SouthEast')

disp 'Max acceleration insugsventil'
max(ain)    %m/s2

disp 'Max acceleration avgasventil'
max(aut)
```