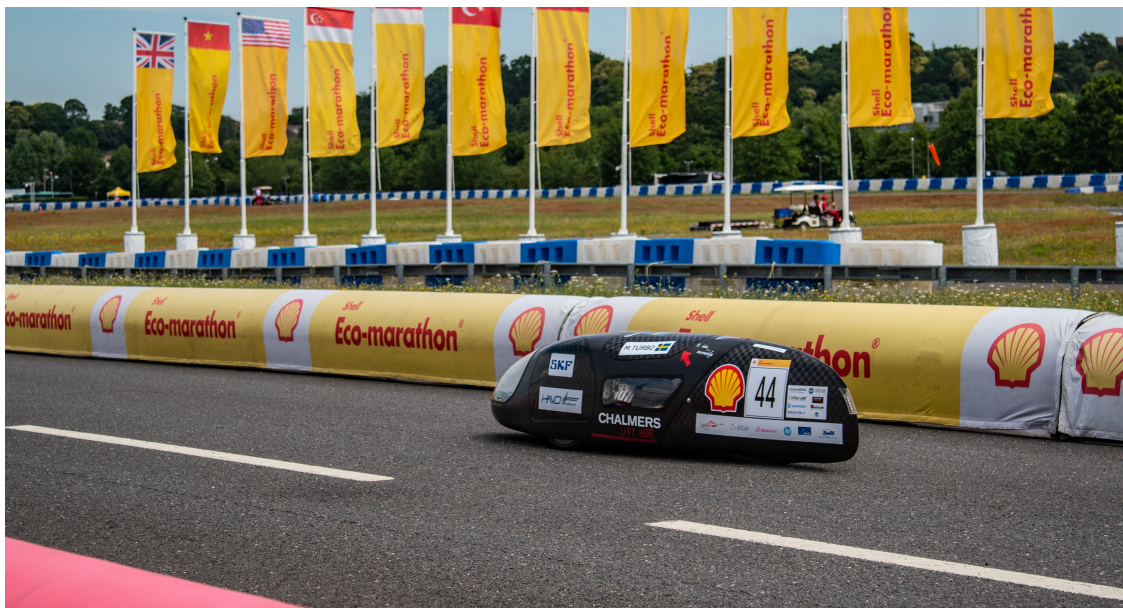




CHALMERS



Testrigg för små förbänningsmotorer

Ett designarbete av testrigg för EcoMarathon-fordonet Vera III

Kandidatarbete inom maskinteknik

Sven Bergqvist
Viktor Frankling
Eric Olsson
Carl Thunberg

KANDIDATARBETE 2020:08

Testrigg för små förbränningsmotorer

Ett designarbete av testrigg för
EcoMarathon-fordonet Vera III

Sven Bergqvist
Viktor Frankling
Eric Olsson
Carl Thunberg



CHALMERS

Institutionen för mekanik och maritima vetenskaper
Avdelningen för förbränning och framdrivningssystem
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA
Göteborg, Sverige 2020

Testrigg för Vera III
Ett designarbete för testrigg till EcoMarathon-fordonet Vera III
Sven Bergqvist, Viktor Frankling, Eric Olsson, Carl Thunberg

© Sven Bergqvist, Viktor Frankling, Eric Olsson, Carl Thunberg, 2020.

Handledare: Sven B. Andersson, instutionen för mekanik och maritima vetenskaper
Kristoffer Clasén, instutionen för mekanik och maritima vetenskaper
Examinator: Jonas Sjöblom, instutionen för mekanik och maritima vetenskaper

Kandidatarbete 2020:08
Institutionen för mekanik och maritima vetenskaper
Avdelningen för förbränning och framdrivningssystem
Chalmers tekniska högskola
SE-412 96 Göteborg
Telephone +46 31 772 1000

Försättsblad: Eco-marathon-fordonet Vera III under tävlingen Shell Eco-marathon
2019.

Typsättning gjord i L^AT_EX
Chalmers Reproservice, Göteborg 2020

Testrigg för Vera III
Ett designarbete för testrigg till EcoMarathon-fordonet Vera III
Sven Bergqvist, Viktor Frankling, Eric Olsson, Carl Thunberg
Avdelningen för förbränning och framdrivningssystem
Chalmers Tekniska Högskola

Sammanfattning

Denna rapport är ett kandidatarbete vid Chalmers Tekniska Högskola vårterminen 2020 utfört av fyra civilingenjörstudenter. Syftet med projektet är att ta fram ett designförslag för en motortestrigg åt Chalmers Vera Team. Testriggen ska bidra med datainsamling som kan hjälpa laget i deras utvecklingsarbete av motorn. För att åstadkomma detta undersöktes liknande testriggar för större motorer och metodiken skalades sedan ner för att passa den mindre Vera-motorn. Resultatet blev en testrigg som kan mäta och spela in cylindertrycket och vevaxelpositionen under drift. Dessa data kan sedan användas för att ta fram ett PV-diagram för motorn samt det moment som Vera-motorn leverar. Testriggen använder en optisk givare för att mäta positionen på motorns vevaxel och en förbränningskammарtryckgivare för att med hjälp av en samplingsutrustning ta fram tryckspåret.

För att simulera riktiga körförhållanden behöver motorn bromsas. För det valdes en elektromagnetisk broms samt en elmotor för att driva runt motorn utan att tända och kalibrera vevaxelgivaren. Bromsen och elmotorn är kopplade parallellt och styr tillsammans motorvarvtalet med hjälp av varvtalsåterkopplad PID-reglering. Veras motor, vevaxelgivaren, bromsen och elmotorn är sammankopplade med en kedjeväxellåda. Dessa komponenter sitter alla i en momentfritt upphängd vagga för att kunna mäta momentet motorn leverar med så få förluster som möjligt. Momentet mäts med en trådtöjningsgivare som sitter i vaggan och chassit.

Testriggen har visualiserats med hjälp av CAD och fokus legat på att göra en design som är möjlig att tillverka i manuella maskiner. Detta för att göra tillverkningsarbetet möjligt för Chalmers Vera Team.

Projektet har uppfyllt alla ställda krav och mål då ett designunderlag för en testrigg har framtagits och överlämnats till Chalmers Vera Team.

Abstract

This report is a bachelor thesis at Chalmers University of Technology during the 2020 spring semester carried out by four engineering students. The purpose of the project is to develop an engine test bench for Chalmers Vera Team. The test bench will contribute to data collection which can help the team in their development of the engine. To accomplish this, similar test benches for larger engines were studied and the methodology of these were scaled down to fit the smaller Vera engine. The result was a design of a test bench that will be able to measure and record cylinder pressure and crank shaft angle during operation of the engine. This data can later be used to form a PV-diagram for the engine. The test bench will also measure the torque and power developed by the Vera engine.

To simulate real world driving conditions the engine needs to be under load. For this an electromagnetic break was chosen. Furthermore an electric motor was used to run the engine without firing in order to measure friction losses and calibrate the crank angle sensor. These two are connected in parallel to each other and together they regulate the engine RPM with a PID-regulator with RPM feedback in closed-loop operation. The engine, crank angle sensor, brake and electric motor are all connected via chains and sprockets in a gearbox. These components all sit in a torque-free suspended cradle to be able to measure the torque the engine delivers with as few losses as possible. The torque is measured with a wire strain gauge that is connected to the cradle and the chassis.

The test rig has been visualized with the help of CAD and the focus has been on making a design that is possible to manufacture in manual machines. This is to make the manufacturing process possible for the Chalmers Vera Team.

The project has met all set requirements and goals that were set and a design documentation for a test rig has been prepared and handed over to the Chalmers Vera Team.

Förord

Till att börja med vill vi tacka våra handledare **Sven B. Andersson** och **Kristoffer Clasén** för de engagemang de visat under hela projektet. De råd och synpunkter som givits har varit till stor hjälp under resans gång.

Vi vill också tacka följande personer för sitt engagemang och rådgivning:

Stellan Albertsson, Stabe Drives

Robert Buadu, senior forskningsingenjör

Jonas Sjöblom, examinerator

Patrik Wåhlin, forskningsingenjör

Avslutningsvis vill vi tacka Chalmers Vera Team för att de givit oss en inblick i deras arbete, vilka förutsättningar som fanns samt vilka önskemål de haft på testriggen.

Sven Bergqvist
Viktor Frankling
Eric Olsson
Carl Thunberg
Göteborg, maj 2020

Innehåll

1	Introduktion	1
1.1	Syfte och problemformulering	3
1.2	Begränsningar	3
1.3	Metodik	3
2	Teori	5
2.1	Testriggar	10
2.2	Tryckspårmätning	11
3	Konstruktion och resultat	13
3.1	Bromsning	13
	3.1.1 Reglering	16
3.2	Mätutrustning	16
3.3	Transmission	18
3.4	Chassi	21
4	Slutsats	25
	Litteraturförteckning	27
A	Bilaga 1	I
B	Bilaga 2	III
C	Bilaga 3	V

Förkortningslista

AC - Alternating Current
BLDC - Borstlös Direct Current
CAD - Computer Aided Design
DC - Direct Current
FEM - Finita Elementmetoden
ICE - Internal Combustion Engine
IMEP - Indicated Mean Effective Pressure
PID - Proportionerlig, Integrerande, Deriverande
PV - Pressure-Volume
RPM - Revolutions Per Minute

1

Introduktion

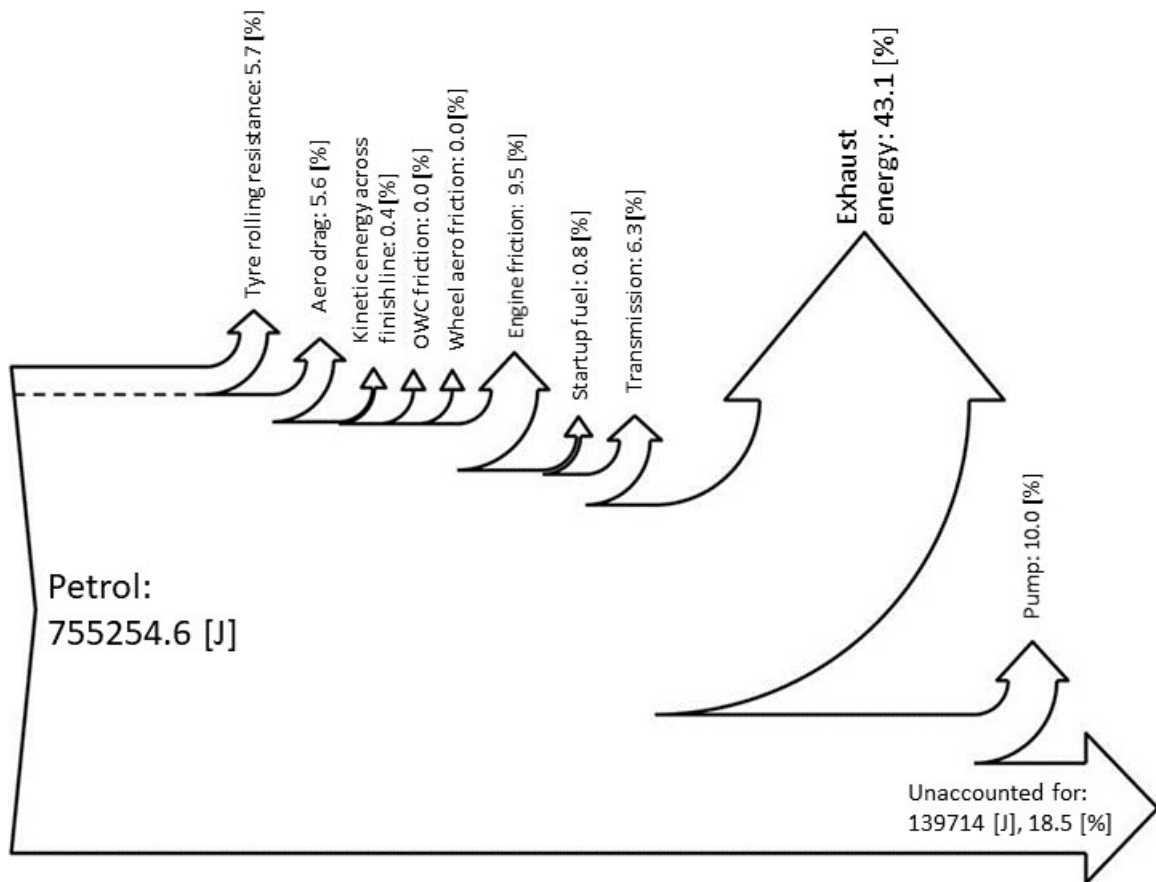
Det är allmänt känt att en ökad andel koldioxid i atmosfären är ett av många problemområden när det gäller klimatfrågan. Förbränningsmotorn har länge varit en effektiv lösning på att utvinna mekaniskt arbete ur portabelt bränsle med högt energiinnehåll för mobila applikationer. Koldioxidutsläpp från förbränningsmotorer är dock oifrånkomligt och därför har elmotoranvändning ökat. Fördelen med elmotorer är dels att högre verkningsgrad kan uppnås och att generering av el kan ske med relativt låg inverkan på klimatet. Nackdelarna är dock bland annat det låga energiinnehållet per massa, som batterier fortfarande har i förhållande till flytande bränslen. Detta gör att elmotorer i många fordonsapplikationer så som längre och tyngre transporter inte är möjliga lösningar med dagens teknik. Behovet och användningen av förbränningsmotorer är därför fortfarande väldigt stort och av den anledningen är utvecklingen av effektivare förbränningsmotorer fortfarande viktig.

Shell Eco-marathon [1] är en tävling där syftet är att konstruera och tillverka en bil som ska ta sig så långt som möjligt på energimängden av en liter bensin. Tävlingen är avsedd för ingenjörstudenter och ger dessa kunskap och väcker intresse för effektivisering av system samt ger dem kunskap och erfarenhet av att omsätta teori till praktik. Chalmers Vera Team är ett lag bestående av ett tiotal studenter från M-, Z- och H-sektionen som tävlar i just detta. Laget drivs helt av studenter och ger dem en möjlighet att tillverka, testa och utvärdera grundkomponenter i en bil. Vera III, som lagets nuvarande bil heter, tävlar i prototypklassen med ICE, internal combustion engine (förbränningsmotor), och de flesta komponenter på Vera är egenutvecklade och producerade av studenterna i laget. I och med att det mesta är egenutvecklat har det tagit tid att få allt driftsäkert och funktionsdugligt på bilen, men efter några år av problem lyckades laget 2019 sätta ett svenskt rekord på tävlingen Shell Eco-marathon. Laget går nu in i en ny fas där man istället fokuserar på att förbättra redan fungerande system genom att minimera förluster.

Med tanke på miljöfrågan utför Chalmers Vera Team ett positivt arbete då arbetet mot lägre bränsleförbrukning kommer innebära lägre utsläpp. Dock ligger fokus enbart på att öka energieffektiviteten snarare än på utsläpp såsom skadliga biprodukter i form av kolväten, kolmonoxid och kväveoxid främst i tävlingformen. Därför finns det inget krav på katalysatorer som renar avgaser från eventuella skadliga biprodukter i Shell Eco-marathon och därav saknar Vera en sådan. Vera och alla andra fordon som deltar i tävlingen är extrema jämfört med en vanlig personbil, men grunderna har mycket gemensamt. Utvecklingsarbetet inom Vera kan därför appliceras senare i arbetslivet och bidra till mer energieffektiva fordon.

Chalmers Vera Team har i dagsläget en chassibänk att tillgå. Den är dock enbart till för att mäta utgående effekt och vridmoment på Vera III:s hjul. Den datan ger bara en bild av det faktiska resultatet av drivlinan och inte specifikt motorns arbetscykel. För att kunna ta fram mer specifik data av motorns attribut krävs en annan typ av testrigg och mätparametrar.

För att kunna minimera förluster är det önskvärt att de först identifieras. Figur 1.1 är ett så kallat Sankey-diagram, som är framtaget av Patrik Wåhlin [2] och illustrerar hur fördelningen av förluster såg ut för den tidigare versionen av Vera, Vera I.



Figur 1.1: Sankey-diagram. En grafisk representation av in- och utflödena av energi för Vera I [2]

Projektet har för avsikt att mäta motorförluster hos Vera III:s nuvarande motor. Som Sankey-diagrammet visar så är det just förluster förknippade med motorn ("engine friction", "exhaust energy" och "pump") som är störst. I exempelvis en Personbilmotor är det i stora drag en tredjedel av bränslets energi som utvinns i form av nyttigt arbete. Av resterande två tredjedelar går ungefär hälften av energin ut i form av avgaser och hälften går ut i kylsystemet. I Vera-motorns fall skiljer det sig en del när det gäller kylsystem eftersom denna snarare behöver bibehålla värme på grund av att den endast körs under korta perioder åt gången. Detta medför att förluster förknippade med kylning ingår i "unaccounted for" i Sankey-diagrammet.

Faktumet att motorns förluster är störst tillsammans med att boken 'The world's most fuel efficient vehicle design and development of Paccar II' [3] redan har gjort ett stort arbete med att kartlägga och minimera de två övriga stora förlusterna, rull- och luftmotstånd, understryker att det är strategiskt viktigt att arbeta med motorn.

1.1 Syfte och problemformulering

Chalmers Vera Team har idag ingen mätdata för hur bra deras motor, mk VIIS, är. Utan mätdata kan laget inte med säkerhet avgöra hur modifikationer påverkar motorn och tvingas gissa sig fram kring var förbättringspotential finns. Laget kan inte heller optimera viktiga parametrar som bränsle- och tändningsinställningar. Som svar på bristen av mätvärden och mätutrustning för Vera-motorn, ämnar detta projekt att ta fram ett designförslag för en motortestrigg åt Chalmers Vera Team. Testriggen skall bidra med att dels skapa mätresultat för motorn, mk VIIS, men också med datainsamling som tidigare endast kunnat framställas med hjälp av simuleringar, som alltid kräver antaganden i viss mån. Att kunna utföra konsekventa mätningar med god precision kan ge större förståelse kring förbränningsmotorns olika förluster, ge underlag för bättre simuleringar och framtida utveckling av Veras motorplattform.

1.2 Begränsningar

Arbetet genomförs under vårterminen 2020 och avser 15 högskolepoäng vilket motsvarar 20 veckor och 20 timmar per arbetsvecka och person, totalt 1600 timmar för hela gruppen på fyra personer. Kostnaden för projektet får inte heller överskrida den budget som är garanterad av lärosätet för ett kandidatarbete. Testutrustningen som redan finns att tillgå skall användas i den mån det är möjligt och därför kommer inte andra alternativ att undersökas för dessa parametrar.

1.3 Metodik

Arbetet påbörjades med en förundersökning vars syfte var att ge underlag till en kravspecifikation för produkten. För att få en inblick i hur liknande testriggar fungerar diskuterades detta med projektets handledare; Kristoffer Clasén [4] och Sven B Andersson [5]. Informationen från diskussionerna samlades in för att skapa en överblick över potentiell data som är önskvärt att ta fram från motortester, vilket i sin tur bestämmer vilken typ av mätmetodik och mätutrustning som krävs för att åstadkomma denna mätdata. Detta resulterade i en kravspecifikation, se bilaga A, för testriggen. Utifrån denna kravspecifikation delades provriggen in i delsystem. Dessa delsystem är:

- Bromsning och drivning
- Mätutrustning
- Momenttillförsel

- Chassi

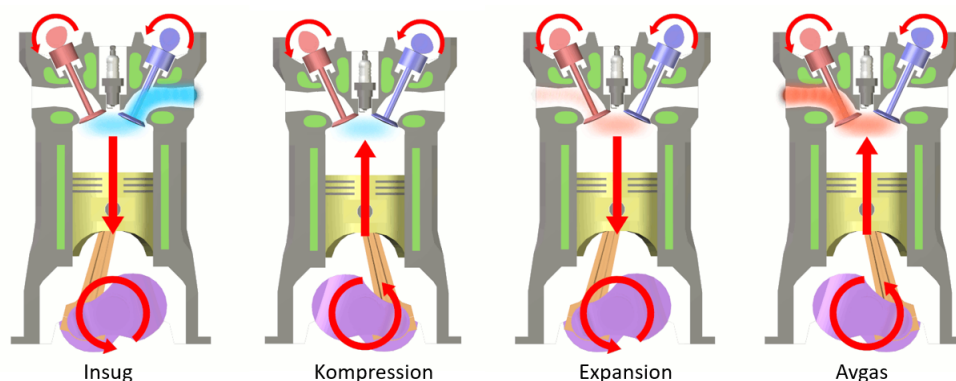
Från kravspecifikationen togs olika lösningsförslag fram för delsystemen genom dialog med Kristoffer Clasén, Robert Buadu [6] samt företag inom elmotorbranschen. Lösningarna vägdes mot varandra efter hur väl de uppfyllde respektive kravspecifikation. För delsystemet bromsning och drivning togs även en separat kravspecifikation, se bilaga B fram för att underlätta arbetet med att generera lösningsförslag till problemet.

Redan existerande komponenter från Chalmers Vera Team mättes in, CAD:ades och testades för att kunna sätta övriga dimensioner på komponenter samt för att säkerställa att de uppfyllde de krav som ställts. En riskbedömning, bilaga C gjordes också över samtliga komponenter för att minska risken för skador vid användning. Slutligen gjordes en ihopmontering av delsystemen i CAD för att skapa en helhetsbild av den färdiga testtriggen.

2

Teori

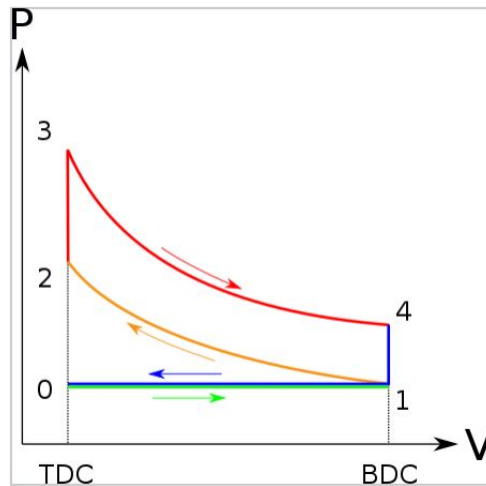
En förbränningsmotor utvinner mekaniskt arbete genom att komprimera och sedan förbränna en luft-bränsleblandning. Detta sker under kompressions- respektive expansionstakten i en fyrtaktsmotor, se figur 2.1. De två andra takterna, insug och avgas, utgör gasväxlingen. Här töms cylindern på avgaserna från förbränningen och fylls sedan åter med ny luft-bränsleblandning. Dessa två takter och kompressions-takten förbrukar arbete, det vill säga kolven utför ett arbete på gaserna. Det är främst under expansionstakten som arbete överförs till kolven.



Figur 2.1: Fyrtaktsmotorns takter är; *insug, kompression, expansion och avgas.* [7]

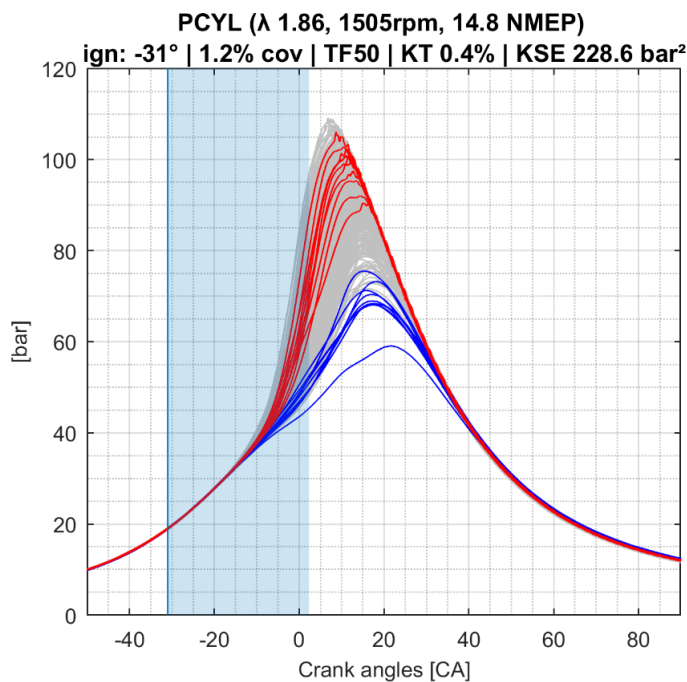
Figur 2.2 är ett idealt PV-diagram för en fyrtaktscykel. Kompressions- och expansionstakten, 1-2 respektive 2-4 är adiabatisk kompression och expansion. Arbetet som utvinns är arean mellan kompressionen och expansionen. Detta fås genom ekvation 2.1, där p är tryck, V är volym och W är volymändringsarbete utträttat av systemet. I detta ideala fall är förbränning och utströmning (blowdown) isokora processer mellan 2-3 respektive 4-1. Gasväxlingen mellan 1-0-1 kan då inledas med ett helt utjämnat tryck mot omgivningen och kan därmed ske isobariskt om pumpförluster inte existerar. I figuren har gasväxlingen ingen area vilket innebär att den inte utgör något arbete. Detta är en ideal process utan förluster.

$$W = \oint p dV \quad (2.1)$$

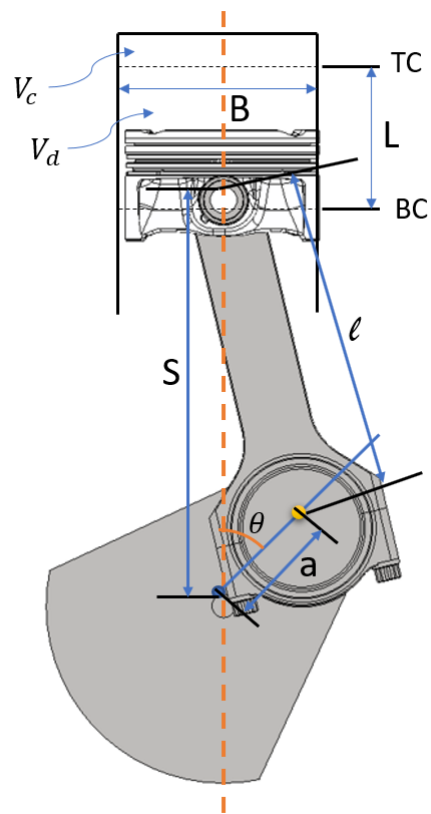


Figur 2.2: Ett PV-diagram av en ideal Otto-cykel. [8]

Denna typ av diagram är en förutsättning för idealiserad analys av en förbränningsmotor. Avvikelserna från den ideala cykeln kommer för en verklig fyrtaktscykel att innebära dess termodynamiska förluster. För att ta fram ett PV-diagram för en fyrtaktsprocess, kan trycket i cylindern mätas under drift. Detta cylindertryck visas grafiskt i ett så kallat tryckspår där trycket kan avläsas mot vevaxelns position. Ett tryckspår kan ses i figur 2.3. Utifrån vevaxelposition och geometriska motorkonstanter, se figur 2.4, kan den varierande volymen, V beräknas enligt ekvationer 2.2 och 2.3.



Figur 2.3: Ett exempel på tryckspår. De röda spårerna är de som genererar högst arbete (IMEP, Indicated Mean Effective Pressure) och de blåa är de som genererar lägst. Det gråa markerar alla spår som mättes upp under testet. [4]

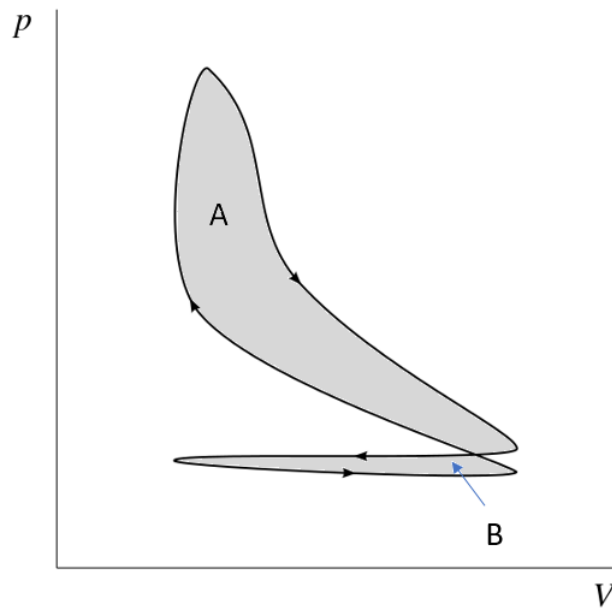


Figur 2.4: Geometrin av kolvens rörelse i cylindern, B = borrh, L = slag, l = vevstakslängd, a = vevradie, θ = vevvinkel crank angle.

$$V = V_c + \frac{\pi B^2}{4} (l + a - s) \quad (2.2)$$

$$s = a \cos(\theta) + \sqrt{(l^2 - a^2 \sin^2(\theta))} \quad (2.3)$$

Utifrån tryckspåret och de geometriska sambanden kan ett faktiskt PV-diagram för den specifika motorcykeln ställas upp, liknande figur 2.5. Detta efterliknar den ideala processen i figur 2.2, med skillnaderna att förbränningen inte är helt isokor, gasväxlingen inte är isobar samt att kompressionen och expansionen inte sker adiabatiskt. Förbränningen sker inte momentant vilket medför att volymen inte kan hållas konstant under värmeförseln. Av PV-diagrammet framgår detta av att vänstra delen av area A i figur 2.5 har avrundade hörn. Att gasväxlingen inte är isobar betyder att denna process innebär ett negativt arbete, area B i figuren.



Figur 2.5: Schematiskt PV-diagram med förluster. [9]

Värmeöverföring mellan cylinderväggarna och luft-bränsleblandningen eller avgaserna under kompressionen respektive expansionen, gör att dessa förlopp inte är adiabatiska. Även detta minskar area A eftersom den extra värmen som tillförs under kompressionstaktens inledning höjer cylindertrycket och den förlorade värmen under resten av takten samt under expansionen gör att tryck förloras. Båda dessa tryckförändringar gäller alltså utöver de som volymändringen skapar. Area A i figur 2.5 kallas för brutto indikerat arbete per cykel och är det positiva arbetet som tillförs kolven. Area B är arbetet som kolven utför på gaserna under gasväxlingen. Summan av arbetena kallas för netto indikerat arbete per cykel, $W_{ind.netto}$, och fås enligt ekvation 2.4. Figur 2.6 visar ett faktiskt PV-diagram utifrån ett uppmätt tryckspår.

$$W_{ind.netto} = W_A - W_B \quad (2.4)$$

En vanlig metod för att bestämma friktionsarbetet i en förbränningsmotor är att driva motorn med en elmotor utan förbränning och uppmäta ett tryckspår. Detta kallas för släppår. Friktionsarbetet kan då fås genom ekvation 2.5.

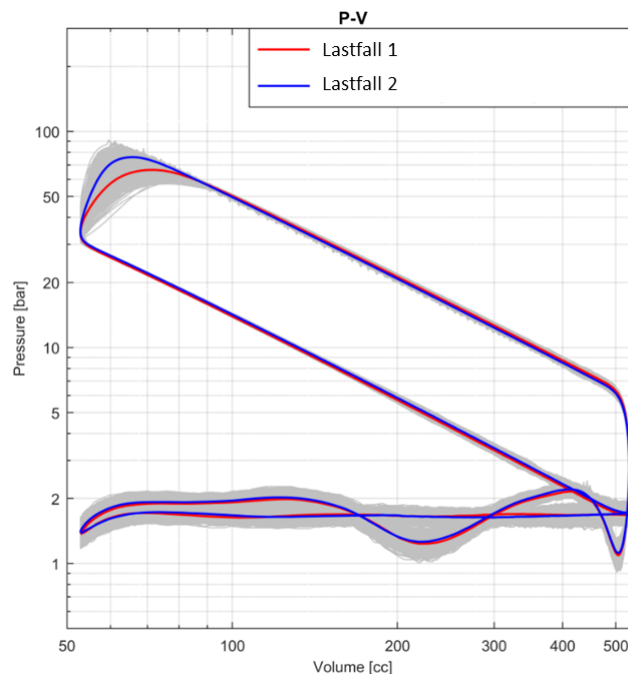
$$W_{friktion} = W_{ind.netto} - W_{elmotor} \quad (2.5)$$

Där $W_{elmotor}$ är det uppmätta arbetet som behövs för att driva runt förbränningsmotorn. Friktionsarbetet utgörs av bland annat friktion mellan kolringar och cylindervägg, i vevaxel- och vevstakslagringar. Även drivning av ventilmekanismen kommer ingå i friktionsarbetet. Vidare kan motorns mekaniska verkningsgrad bestämmas enligt ekvation 2.6.

$$\eta_m = \frac{W_{netto}}{W_{elmotor}} \quad (2.6)$$

Dessutom kan motorns termiska verkningsgrad, η_t bestämmas genom att köra motorn och mäta bromsad effekt P_{broms} samt bränslemassflödet \dot{m} som motorn förbrukar. Beräkningen görs enligt ekvation 2.7 där Q_{HV} är bränslets effektiva värmevärde. η_t kallas även för; fuel conversion efficiency. Detta är alltså ett mått på hur effektiv motorn är på att omvandla bränsle till arbete.

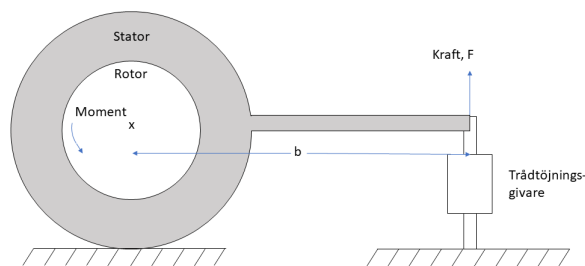
$$\eta_t = \frac{P_{broms}}{\dot{m}Q_{HV}} \quad (2.7)$$



Figur 2.6: Resulterande PV-diagram av ett motortest. Det blåa spåret visar medelvärdet av alla mätningar vid lastfall 2, medans det röda visar motsvarande för lastfall 1. Den väsentliga skillnaden mellan lastfallen är att fall 2 har mer turbulens på gaserna. Det grå området markerar alla spår som mättes upp under testen. [4]

2.1 Testriggar

Det är opraktiskt att göra motortester i ett fordon, då omgivande parametrar som temperatur, lufttryck och lastfall är svåra att göra konsekventa över ett stort antal tester. Därför är den vanliga metoden att man använder en motortestrigg. Testriggar behöver ha en broms för att belasta motorn och på så sätt simulera körförhållanden. Denna delen av testriggen brukar kallas för bromsbänk. Utöver att skapa last genom att bromsa kan vridmoment också mätas. Se figur 2.7 för en schematisk bild på en typisk bromskonfiguration.



Figur 2.7: Mätning av moment med trådtöjningsgivare.

Med ytterligare varvtalsmätning kan även effekt beräknas enligt ekvation 2.8, med varvtalet N i RPM samt hävarm b och kraft F_{broms} enligt figur 2.7. Bromsbänkar kan konstrueras med olika bromsmetoder, de vanligaste är; elektrisk, hydraulisk eller mekanisk broms. Bromskraft brukar mätas med hjälp av en elektronisk trådtöjningsgivare. Varvtal kan mätas elektroniskt med optisk, induktiv eller magnetisk givare i samband med tillhörande tandhjul. Elektronisk varvtalsmätning och styrning av bromsverkan medför möjligheten att styra bromsbänken digitalt med återkoppling för noggrann kontroll av motorvarvtal. Detta är användbart när man önskar utföra mätningar vid specifika varvtal eller simulera specifika körförhållanden. Det är viktigt för testriggen att kunna driva testmotorn för att kunna uppmäta ett släpår.

$$P_{broms} = \frac{2\pi N b F_{broms}}{60} \quad (2.8)$$

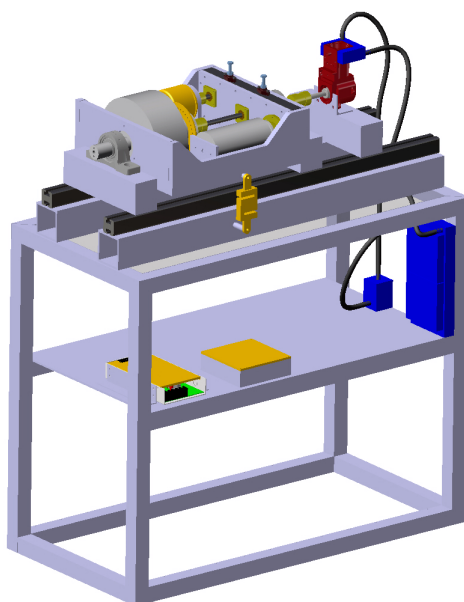
2.2 Tryckspårsmätning

För tryckspårsmätning krävs det att cylindertrycket mäts högfrekvent och att mät-punkterna kan kopplas till aktuell volym. Eftersom volymen är direkt kopplad till vevaxelns vinkel enligt ekvation 2.2 och 2.3 är det möjligt att logga volymen med hjälp av en vevaxelgivare. Olika versioner av sådana finns ofta i förbränningsmotorer för att till exempel kunna förse styrsystemet med information om motorns position. Detta är nödvändigt för att förbränning ska ske vid rätt tidpunkt till exempel. Dessa givare har ofta en upplösning i storleksordningen tio grader och motorstyrningen beräknar sedan en mer exakt position. När det kommer till vevvinkelmätning vid framtagning av tryckspår krävs dock en betydligt högre vinkelupplösning. Speciella givare som uppfyller dessa typer av krav, diskuteras vidare i avsnitt 3.2.

3

Konstruktion och resultat

Den slutgiltiga testtriggen, figur 3.1, kommer klara av att bromsa och driva Vera mk VIIS, mäta momentet producerat på vevaxeln samt ta fram ett tryckspår för motorn.



Figur 3.1: CAD-modell av den färdiga bromsbänken utan sprängskydd och utsug.

3.1 Bromsning

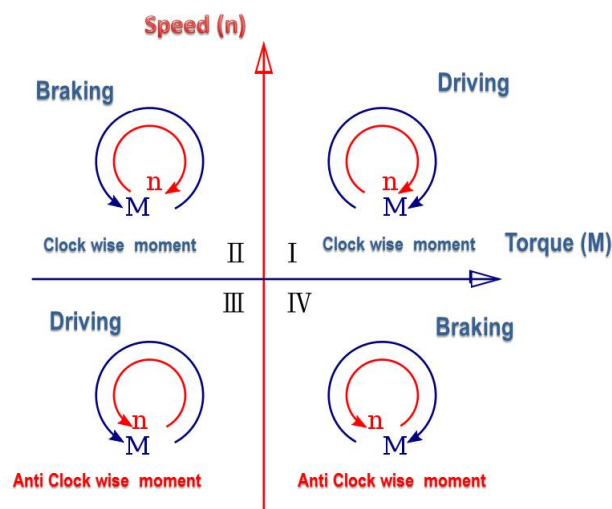
För att simulera verkliga körförhållanden behöver en motor bromsas. Som tidigare nämnts finns det tre huvudmetoder för att åstadkomma detta: hydraulisk, mekanisk och elektrisk. Dessa tre kan sedan delas in i ytterligare undergrupper som DC- eller AC-motorer inom den elektriska grenen. Att bromsa med hjälp av tröghet eller med en vanlig bromsskiva är också två exempel på olika typer av mekaniska bromsar. De kan även kombineras för att uppnå önskat resultat.

Alla tre huvudgrupper har både för- och nackdelar. För att underlätta valet av bromslösning görs en kravspecifikation specifikt för bromsningen, se bilaga B. Där framkommer det att Vera-motorn bland annat behöver kunna bromsas i så kallade svep, alltså att motorn körs från ett varvtal till ett annat under en bestämd tid. Även

körning vid konstant vavtal är ett krav. Dessa krav går att uppfylla med samtliga tre metoder men kravet på att hålla konstant varvtal blir svårt med en mekanisk broms. Ett annat problem med mekaniska bromsar är de slits ut, därför används de sällan i motortestriggar. Hydraulisk broms övervägs men fallen bort eftersom en elektrisk lösning anses vara enklare och samtidigt uppfyller kraven.

Detta samt att förbränningslaboratoriet på Chalmers mestadels använder elektriska bromsar i sina testriggar gör att projektet enbart riktar in sig på en elektrisk bromsning. En elektrisk lösning har också fördelen att den kan göras kompakt och styrningen tillåter mer kontroll av bromsningen. Kravet på att kunna driva runt Vera-motorn utan tändning är också enklare med en elektrisk lösning då en elmotor har möjligheten att både ta upp och leverera moment.

Det finns som sagt flera olika typer av elektriska bromslösningar. De elektriska testriggar som finns för industriellt bruk och som används i förbränningslaboratoriet på Chalmers är AC-motorer kopplade till så kallade fyrkvadrants nätaggregat. Ett fyrkvadrants nätaggregat är ett nätaggregat som både kan ta upp och leverera ström, se figur 3.2. När AC-motorn bromsar en last alstras ström som då kan tas upp av denna typ av nätaggregat. I detta fall skickas strömmen till batterier eller tillbaka ut på elnätet. Ett problem med denna typen av testriggar är att de är designade för att bromsa ca. 500 kW medan projektet designar en testrigg för att bromsa ca. 2 kW. Det finns inga kommersiellt tillgängliga fyrkvadrants nätaggregat som arbetar kring 1-2 kW. Detta då den bromsade effekten är för liten för att anses nödvändig att ta tillvara på. Styrsystemet till en sådan testrigg är även komplext och kräver i princip att man köper ett sådant tillsammans med motor och nätaggregat. Denna lösning är alltså inte genomförbar då den riktar in sig mot större motorer och större budgetar.



Figur 3.2: En schematisk bild över hur ett fyrkvadrants nätaggregat fungerar. [10]

Flertalet företag inom elmotorbranschen, bland annat Stabe Drives [12], rekommenderar en liknade lösning som tidigare beskrivits, men att istället låta den bromsade effekten bli värme genom effektmotstånd. Motorn styrs av antingen frekvensomvandlare eller av pulsbreddsmodulerare beroende på vilken elmotor som används. Problemet med dyra och komplexa komponenter kvarstår dock. Offerter på elmotorer, nätaggregat och styrsystem samlades också in, men allt är över budgeten för projektet och därmed anses ingen av lösningarna vara rimlig för projektet. Ett alternativ till dessa dyrare lösningar är att använda en äldre borstad DC-motor då dessa anses omoderna och därmed är billigare att köpa. En sådan DC-motor kan styras med ett analogt drivsystem, till exempel ett Parker A514C [14]. Detta är en möjlig lösning och hade uppfyllt samtliga krav som finns.

En annan lösning som undersöktes är att använda en borstlös DC-motor, BLDC-motor, tillsammans med ett fartreglage till en elektrisk skateboard. Ett sådant fartreglage eller drivsystem ska kunna både bromsa och driva på en elektrisk skateboard och uppfyller därmed kraven på både bromsning och drivning. Dessa komponenter går också att köpa relativt billigt från hobbybutiker vilket är positivt. Problemet med denna lösningen är att sådana fartreglage avsedda för hobbybruk inte klarar av den belastningen som krävs. Det finns andra fartreglage som klarar av kraven, men de är betydligt dyrare och över projektets budget.

Inom Chalmers Vera Team finns sedan tidigare en elektromagnetisk broms med tillhörande styrsystem som används till lagets chassitestrigg för hela Vera III. Denna broms tillsammans med en parallellt drivande elmotor uppfyller kravet på bromsning och drivning samt att den bromsade effekten tas upp som värme i den elektromagnetiska bromsen. Bromsen och motorn styrs tillsammans med PID-reglering och drivs med ett nätaggregat. Denna lösningen uppfyller samtliga krav och är inom projektets budget då de flesta komponenter som broms och elmotor finns inom Chalmers Vera Team.

Den slutgiltiga lösningen är den sistnämnda. Detta då lösningen är relativt simpel, uppfyller alla ställda krav samt är inom projektets budget. Även det faktum att de flesta komponenter redan finns att tillgå och därför inte behöver köpas in är ett starkt argument för denna lösning. Övriga lösningar är också möjliga att genomföra, men väljs framför allt bort på grund av projektets budget och deras komplexitet.

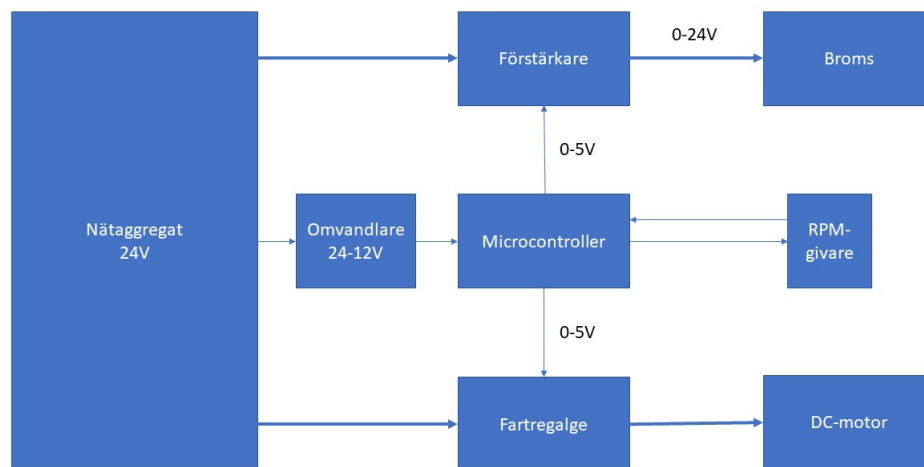
Elmotorn som används är en borstad DC-motor som Chalmers Vera Team redan har. Motorn är testad och uppfyller de krav som ställts i kravspecifikationen för bromsningen, se bilaga B. Den elektromagnetiska bromsen är en Magtrol HB1750 [15] och enligt dess datablad uppfyller den de krav som ställts. Nätaggregatet väljs efter hur mycket spänning och ström som motorn drar under drift. I detta fall krävs ett nätaggregat som kan leverera 24V, 21A och 504W. Ett exempel på ett sådant nätaggregat är Mean Well, 504W Embedded Switch Mode Power Supply SMPS [16].

3.1.1 Reglering

Valet av broms och drivning kräver en gemensam reglering och styrning av bromsen och elmotorn. Systemet består av följande komponenter:

- Nätaggregat/strömkälla
- Förstärkare
- PID-regulator/Microcontroller/Arduino
- Omvandlare
- Fartreglage/H-brygga
- RPM-givare

Reglersystemet bygger på PID-reglering med varvtalsåterkoppling från Vera-motorns vevaxel. Varvtalet jämförs med det önskade varvtalet i microcontrollern. Är varvtalet över det önskade värdet appliceras mer bromsverkan från bromsen och mindre varvtal från DC-motorn. Är varvtalet under det önskade värdet appliceras istället mindre bromsverkan från bromsen och mer varvtal från DC-motorn. Figur 3.3 är en schematisk bild över hur komponenterna interagerar med varandra för att utföra det som beskrevs ovan.



Figur 3.3: Schematiskt regleringsschema. En förenklad bild av hur regleringen av bromsning/drivning fungerar.

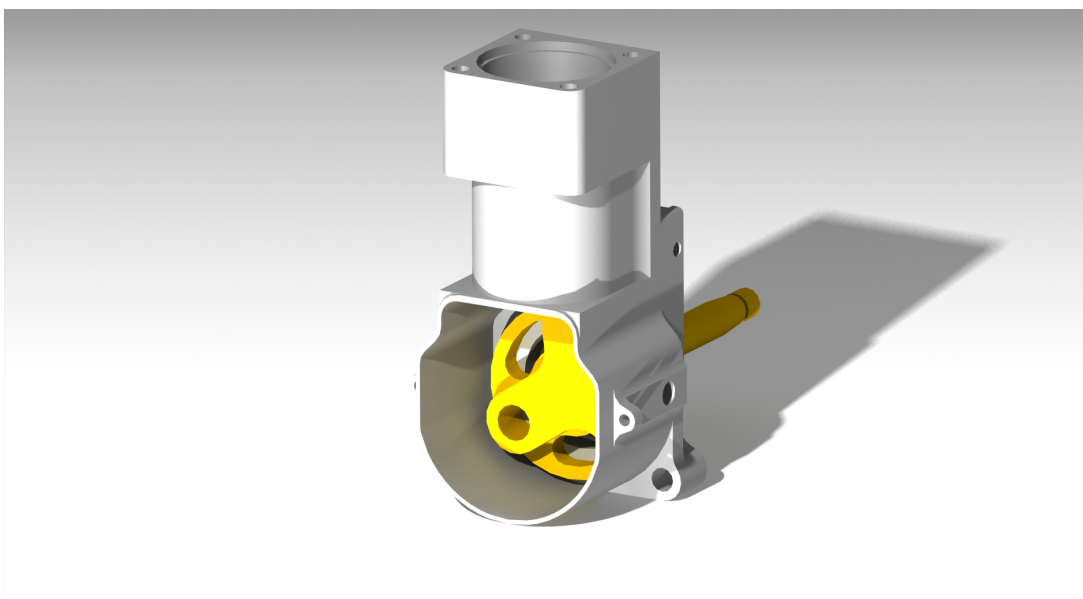
3.2 Mätutrustning

Tryckspårmätning ställer höga krav på både givare och datainsamlingsutrustning. Eftersom tryckspåret bygger på tryck- och vevaxelpositions mätningar tusentals gånger per varv, måste dessa kunna mätas med hög frekvens. Ekvation 3.1 är ett exempel på hur hög samplingsfrekvens som krävs med ett motorvarvtal på 5000 rpm och en vevaxelgivare med en upplösning på en tiondels grad.

$$\frac{5000 \text{ rpm} \cdot 360^\circ \cdot 10}{60 \text{ s}} = 300\,000 \text{ Hz} \quad (3.1)$$

Detta ställer därefter krav på tryckgivare och datanisamlingsutrustning. För exemplet i ekvation 3.1 krävs en samplingsfrekvens på minst 300 kHz. Vidare kan trycket och temperaturen inuti förbränningskammaren under förbränningsförloppet bli relativt höga, omkring 100 bar respektive 1000 °C. Detta tillsammans med kravet på den höga samplingsfrekvensen innebär att sådan utrustning är specialiserad för ändamålet och är i arbetets sammanhang mycket dyra, omkring 50 000 SEK enbart för tryckgivaren. Då projektets budget ej får överstiga 5000 SEK, används tryckgivaren; GH14DK tillverkad av AVL [11], eftersom den finns tillgänglig som lån från förbränningsmotorlaboratoriet. Det är en piezoelektrisk sensor. Av samma anledning väljs den optiska vevaxelgivaren; Lenie & Linde art.nr 08057011, och samplingsutrustning; Indimaster från AVL. Denna utrustning är specialtillverkad för att mäta just tryckspår med hög precision och samplingsfrekvens. Tryckgivaren skruvas med hjälp av en gängad adapter i ett av tändstiftshålen på Vera-motorns topplock. Detta är ej optimalt då motorn kommer bete sig annorlunda vid mätning än vid normal drift. Denna kompromiss görs för att spara tid och komplexitet i projektet. Senare är det möjligt att förbättra konstruktionen genom att tryckgivaren infästs utan att ta bort det ena tändstiftet och på så sätt inte ändra förbränningsprocessen.

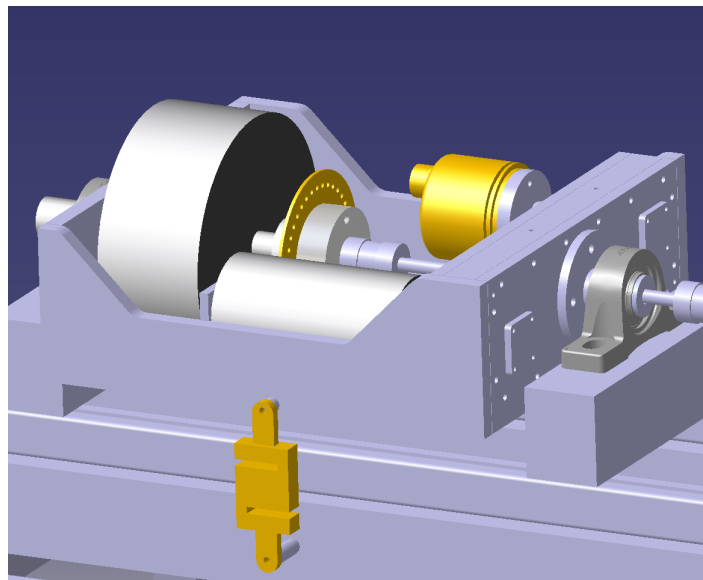
Även vevaxelgivarens anslutning till motorn behöver ändras utifån dess avsedda infästningsmetod, att anslutas direkt till motorns vevaxel seriellt. Detta är inte möjligt i Vera-motorns fall eftersom vevaxeln är en så kallad enkelsidig konstruktion, se figur 3.5, och givaren är ej avsedd för att monteras med vevaxeln genomgående. Därför monteras vevgivaren istället parallellt med vevaxeln.



Figur 3.4: CAD-rendering av VERA mk VIIS, motorblock och ensidig vevaxel.

Samplingsutrustningen som används är en Indimaster. Det är en högfrekvent analog/digitalomvandlare med tillhörande mjukvara för att ta fram tryckspår. Indimastern spelar in de signaler som givarna skickar och med hjälp av mjukvaran tar den fram ett tryckspår för den givna datan.

Utöver mätutrustning för att ta fram tryckspår behöver testtriggen också varvtals- och trådtöjningsgivare för mätning av varvtal respektive bromskraft, utifrån vilka bromsmoment och bromsad effekt kan beräknas. Varvtalsgivaren behövs även för att styra bromsverkan och därav varvtalet med återkoppling. Även här väljs givare som Vera-teamet redan har tillgång till. Varvtalsgivaren är optisk och kommer användas med tillhörande tandhjul. Trådtöjningsgivaren är en så kallad s-type, och har ett mätområde från 0 till 10 kg. I figur 3.4 visas tandhjulet, trådtöjningsgivaren samt vevaxelgivaren i gult.



Figur 3.5: CAD-modell med tandhjulet, trådtöjningsgivaren samt vevaxelgivaren i gult

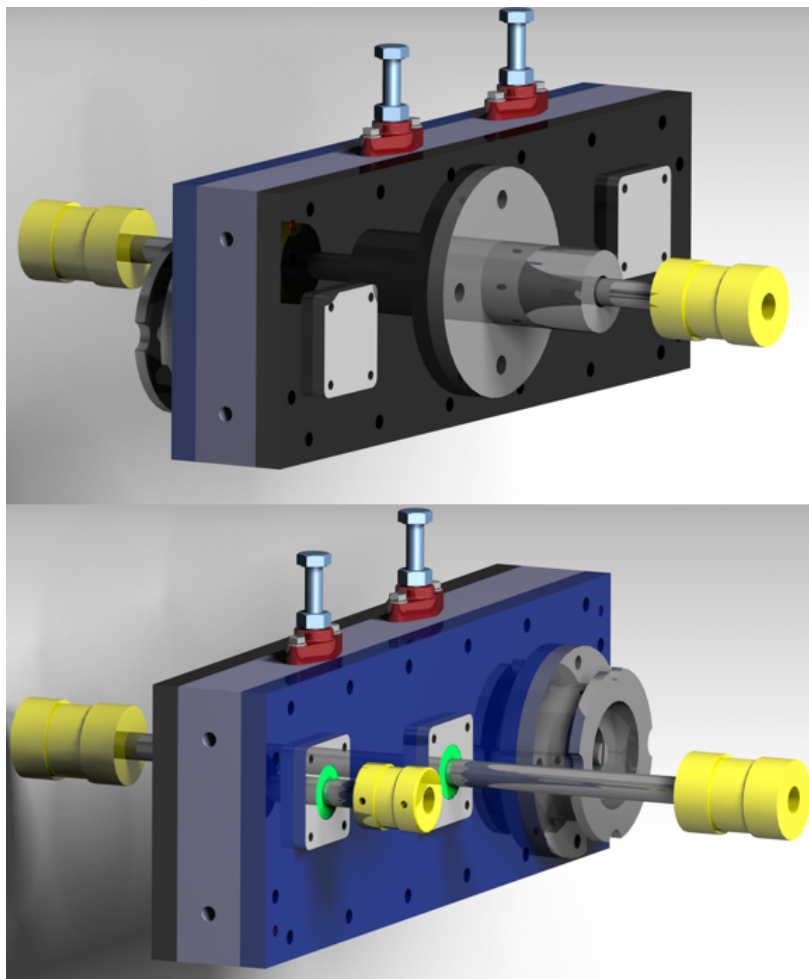
3.3 Transmission

Kraftöverföringen från Vera-motorn till bromsen sker med en axel i dimensionen 12mm i diameter. Axeln, i projektet kallad mellanaxel, kopplas i var ände med en axelkoppling av typen bälg-klämnavsförband som tillåter små koncentriska och parallella fel axlarna emellan och samtidigt ger god vridstyvhet. Detta är viktigt för att minimera vinkelavvikelser mellan vevaxelgivaren och Vera-motorns vevaxel, se figur 3.6 (axelkopplingar i gult). Med en parallell drivning, bromsning och vevpositions-mätning krävs kraftöverföring med eventuell utväxling. Utifrån karaktärisering av den drivande elmotorn, där utgående moment och stöm igenom motorn uppmäts, se tabell 3.1, kan sambandet mellan strömmen och det levererade vridmomentet betsämmas. Detta ger ett medelvärde på 0.072 Nm/A. Nätaggregatet som används levererar 21 A och elmotorn kan därför leverera ett startmoment (stall torque) på cirka 1.5 Nm.

Tabell 3.1: Resultat av elmotorkaraktärisering

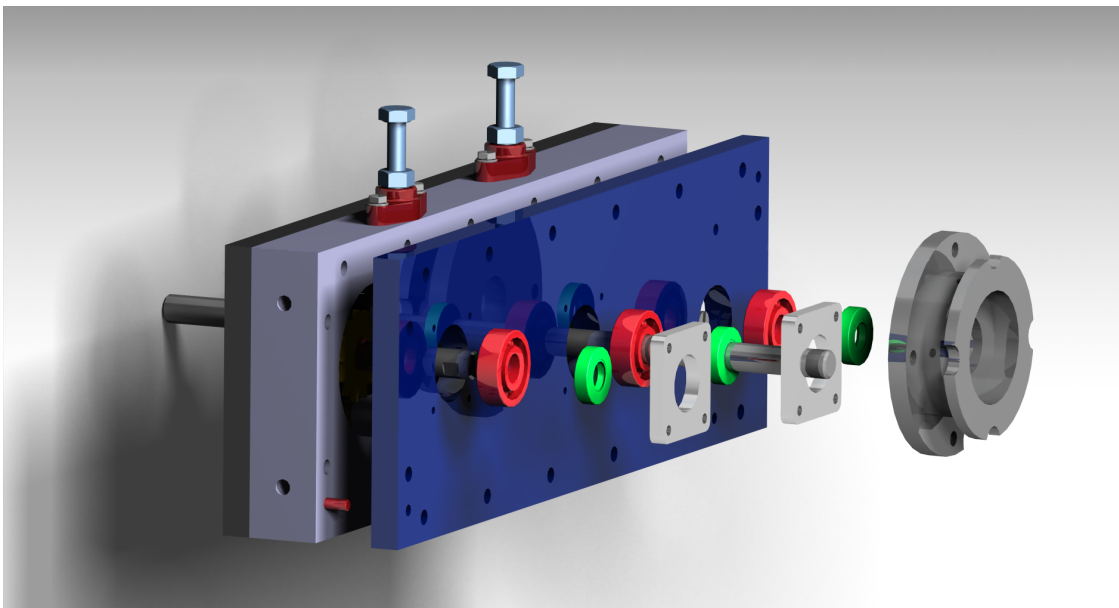
Spänning [V]	Ström [A]	Startmoment [Nm]	Nm/A
1.0	3.0	0.2	0.068
2.0	6.0	0.5	0.075
3.0	11.0	0.8	0.072
4.0	15.0	1.1	0.072

Med ett uppmätt varvtal utan last på 3460rpm vid 24 volt och ett krav att kunna varva Vera-motorn upp till 6000 rpm ger en minsta utväxling från elmotor till Vera-motor på 1:1.73. Denna utväxling medför att elmotorn levererar ett vridmoment på 0.87 Nm efter utväxling. Ett uppmätt släpningsmoment för Vera-motorn på 0.7 Nm och ett, enligt datablad [15], motsvarande värde för bromsen på 0.0918 Nm, innebär ett krav på elmotorn att klara av ett startmoment på ca 0.79 Nm. Detta uppfylls med en utväxling upp till ca 1:1.89.



Figur 3.6: Rending av växellådan inklusive axlar och axelkopplingar

Transmissionen utgörs av en stängd, delvis oljefylld växellåda med tre parallella axlar, där två av axlarna går till vevaxelgivare respektive elmotor och den tredje är den genomgående mellanaxeln. Den stängda lösningen tillämpas eftersom den ger en säker och i stort sett underhållsfri drift. Den kringgår behovet av externa stödlagringar som lätt kontamineras med kortare livslängd som följd. Vevaxelgivaren ansluts till växellådan med samma typ av axelkoppling som används till mellanaxeln. Elmotorn, som inte kräver samma precision, använder istället samma typ av gummibussning och v-bandsfläns som den är avsedd för att använda i sin standardtillämpning. Samtliga tre axlar är lagrade med enkelradiga spårkullager i lådans båda täcklock som i sin tur täcks av mindre lock. De mindre locken möjliggör användning av bredare lager utan att behöva gå upp i dimension på växellådans främre och bakre täckåpor, blå respektive svart i figur 3.6. Detta eftersom radialtätningar, som krävs där axlarna är genomgående, kan integreras i de mindre locken, se figur 3.7. I växellådans bakre täckåpa, svart i figur 3.6, förekommer två blinda lagersäten där axlarna inte är genomgående. Här används de mindre locken för att undvika behovet av blinda lagersäten vilket både underlättar tillverkning och eventuellt byte av lager.

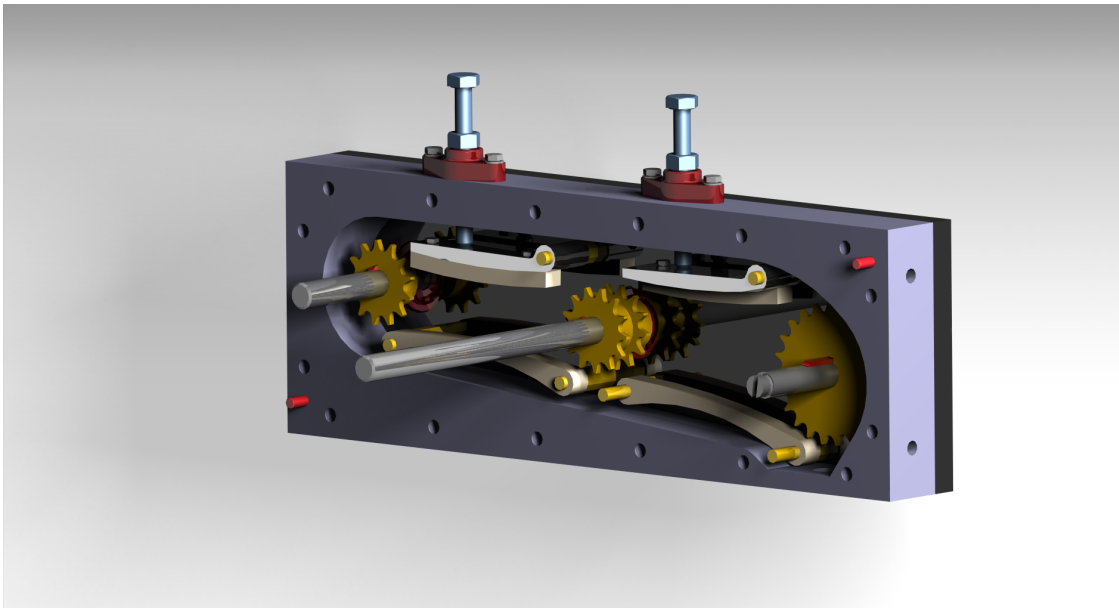


Figur 3.7: Sprängskiss av växellåda för illustration av lager och tätningars inbyggnad.

Vevaxelgivarens axel och mellanaxeln synkroniseras genom en 1:1 utväxling med en förspänd enkelradig rullkedja och två kedjedrev av standard 05B med 8 mm delning. För elmotorn används en 1:1.77 utväxling för att tillåta varvtal på Vera-motorn upp till 6000 rpm och samtidigt klara av att starta och släpa denna. Även denna utväxling sker med två stycken kedjedrev av samma standard men med ett tandantal av 23 respektive 13. I jämförelse med rem- och kuggtransmission anses kedjetransmissionen vara fördelaktig. Kedjan töjs mindre än remmen vilket är mycket fördelaktigt då positionsmätningens precision prioriteras. Kostnaderna för kuggdrev och framför allt de högre precisionskraven på axelavstånd kan skapa problem vid tillverkning i

manuella maskiner.

Med möjlighet att få växellådans delar vattenskurva tillåts däremot relativt fria former i ett plan. Därav är växellådshuset, det tjockare mittersta aluminiumblocket, se figur 3.8, utformat för att oljan ska följa med kedjan runt i så stor utsträckning som möjligt och inte bli stillastående. För att möjliggöra säker drift på höga hastigheter är guideskenor placerade vid alla fria kedjelängder. De två övre skenorna är fästa på vipparmar i aluminium och utgör kedjespännarna och förspänner kedjorna med de genomgående justerskruvarna. På så vis minimeras glapp och vinkelavvikelse komponenterna emellan.



Figur 3.8: *Rendering av växellådshus med dess inre komponenter*

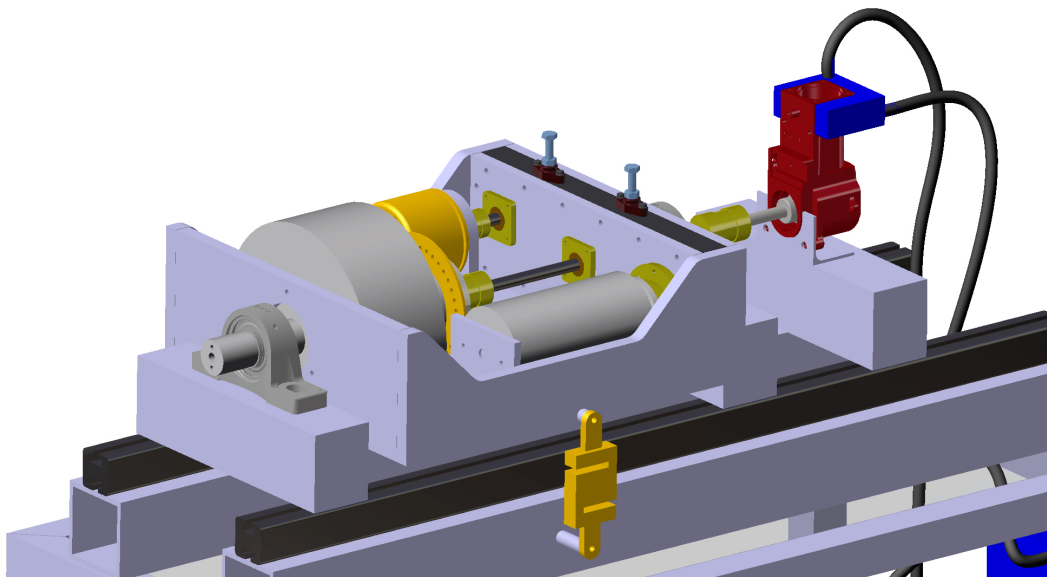
3.4 Chassi

När testriggen körs kommer den utsättas för vibrationer som skapas av Vera-motorn under drift. Därför är det viktigt att chassit är stabilt och står emot utböjning. Riggen har överdimensionerats i viss mån för att undvika behovet av att göra FEM-analys. Till följd av detta görs chassit i 40x40 mm fyrkantiga stålrör som svetsas samman. Testriggens arbetshöjd väljs till 900 mm, i enlighet med kravspecifikationen. I botten förstärks chassit med extra rör. Chassit står på fyra apparathjul för att det enkelt ska kunna flyttas runt. Dessa hjul kan även låsas. I chassit integreras även en avlastningsskiva som är till för infästning av tillbehör såsom nätaggregat och styrsystem till elmotorn. Där monteras dessutom Veras bränsle- och elsystem.

På toppen av chassit placeras två längsgående balkar som är fastsvetsade i ramen. Ett problem med testriggen är att det är flera axlar som behöver vara i linje med varandra. Detta ställer stora krav på precision och passning mellan komponenterna.

Ett alternativ för infästning av själva riggen (motor, växellåda, elmotor, vevaxelgivare och broms) är att använda T-spår och T-spårskruvar. Ett annat alternativ är att riggen placeras på två axlar varav en kan justeras i sidled och den andra är statisk. På den statiska axeln ligger riggen med V-block. Det andra alternativet har fördelen att det blir smidigt att montera upp och ner riggen utan att behöva gå miste om precision. Trots det valdes det första alternativet eftersom det är enklare och billigare att tillverka. Nackdelen med T-spår är att det krävs inmätning vid montering av testriggens olika delar. Tillverkningsfördelarorna anses överväga nackdelarna med inmätning då montering inte kommer ske tillräckligt frekvent. T-spår finns att köpa medan V-block och anpassning av slipad axel skulle behöva konstrueras och tillverkas på egen hand, vilket också är en fördel med T-spår.

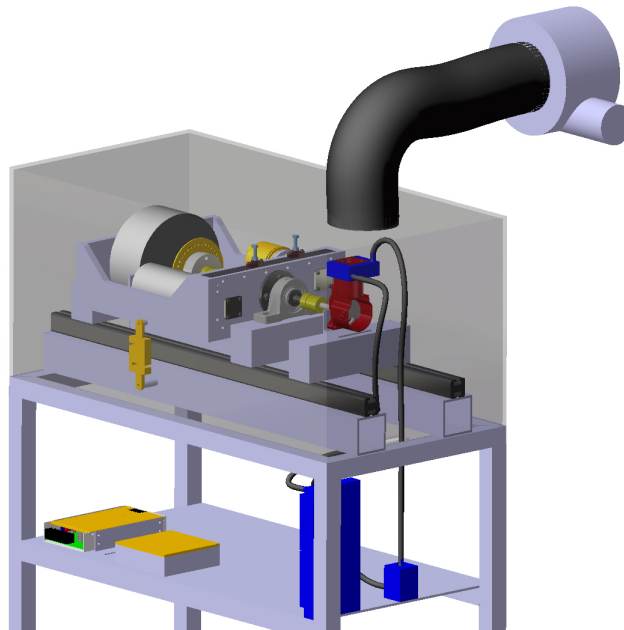
En central del av riggen är den så kallade vaggan, som är en plattform upphängd i två lagerbockar. Plattformen är gjord av 15 mm tjock aluminiumplåt som även denna kan vattenskäras. På plattformen placeras växellådan, elmotorn, bromsen och vevaxelgivaren. Vaggan förstärks med gavlar som tillför styvhet till konstruktionen. Gavlarna är även de gjorda i 15 mm aluminiumplåt. Vaggan är momentfritt upphängd för att momentet från komponenterna på plattformen inte ska tas upp av chassit. Istället uppmäts summan av momenten av trådtöjningsgivaren som är fäst med ena änden i vaggan och den andra i chassit.



Figur 3.9: *Vaggan och dess koppling med Vera-motorn.*

Ett enkelt kylsystem till Vera-motorn konstruerades genom att ansluta slangar till Vera-motorns vattenhölje. Här används en kylare, tillhörande pump och fläktar avsedda för kylning av högprestanda PC-komponenter. Motorstyrsystem och tillhörande kabelhärva är de som för nuvarande används i Vera-fordonet. Utifrån riskbedömningen, se bilaga C, appliceras ett heltäckande sprängskydd för att förhindra eventuellt splittror om motorn sprängs vid körning. Skyddet är en låda i 6 mm tjockt polykarbonat som täcker både motorn och vaggan. Polykarbonat väljs eftersom sam-

ma material används som sprängskydd i förbränningsmotorlaboratoriet på Chalmers och är allmän standard i industrin. Enligt riskbedömningen behövs även ett utsug som avlägsnar avgaser från motorn. Sprängskyddet är en del av utsuget där sprängskyddet agerar som inneslutning av motorns gaser. Utsuget är en stor slang som är placerad ovanför Vera-motorn och drivs av en fläkt som är fäst i slutet av slangen.



Figur 3.10: *Testriggen med sprängskydd och utsug.*

4

Slutsats

Syftet med projektet har varit att skapa ett designförslag för en motortestrigg till Chalmers Vera Team. Projektet har tagit fram ett designförslag för en sådan testrigg och syftet med projektet anses därför uppfyllt.

Trots att testriggen uppfyllde alla de krav projektet ställt på den finns utvecklingspotential. Till exempel kan bromsningen och drivningen skötas av en och samma elmotor, likt andra lösningar som tagits upp tidigare. Detta skulle reducera antalet komponenter och potentiellt öka användarvänligheten. En sådan lösning är utanför detta projekts begränsningar, men hade haft ett positivt bidrag på slutkonstruktionen av testriggen. Gruppen ser denna utvecklingspotential som något positivt då den innebär att Chalmers Vera Team kan fortsätta utvecklingen av testriggen efter de behov de har i framtiden. På så sätt har projektgruppen gett teamet en grund att börja från och sedan utveckla testriggen allt eftersom.

Den utveckling som testriggen förhoppningsvis kommer leda till kan göra att Veras motor blir mer energieffektiv. En mer bränslesnål motor är bättre för miljön och den kunskap som erhålls av studenterna kan föras vidare och appliceras i andra sammanhang. Projektet har inte tagit motorns utsläpp i beaktande eftersom tävlingen, Shell Eco-marathon, inte omfattar det. Att mäta Vera-motorns utsläpp hade varit ytterligare en studie och lämnas som förslag på vidare forskning.

Litteraturförteckning

- [1] Shell, 'Shell Eco-marathon', 2020. [Online].
Tillgänglig: <https://www.shell.com/make-the-future/shell-ecomarathon.html>
(hämtad 2020-02-11)
- [2] P. Wåhlin, Forskningsingenjör vid Laboratorium/Förbränning och framdrivningssystem/Mekanik och maritima vetenskaper, privat kommunikation, feb. 2020.
- [3] J.J. Santin et al., *The world's most fuel efficient vehicle: design and development of Paccar II*. Zürich, Schweiz: vdf Hochschulverlag AG an der ETH Zürich, 2007
- [4] K. Clasén, Doktorand vid Förbränning och framdrivningssystem/Mekanik och maritima vetenskaper, privat kommunikation, feb. 2020.
- [5] S.B Andersson, Biträdande professor vid Förbränning och framdrivningssystem/Mekanik och maritima vetenskaper, feb. 2020.
- [6] R. Buadu, Senior forskningsingenjör vid Laboratorium/Förbränning och framdrivningssystem/Mekanik och maritima vetenskaper, privat kommunikation, mars 2020.
- [7] Wapcaplet, 2004, *Four-stroke cycle*, Wikimedia Commons. Tillgänglig:
https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Four_stroke_cycle_compression.png
(hämtad 2020-06-03)
- [8] Luc1992, 2015, *P-V Otto cycle*, Wikimedia Commons. Tillgänglig:
https://commons.wikimedia.org/wiki/File:P-V_Otto_cycle.svg
(hämtad 2020-06-03)
- [9] Olivier Cleynen, 2013, *P-v diagram four stroke piston engine*, Wikimedia Commons. Tillgänglig:
https://commons.wikimedia.org/wiki/File:P-v_diagram_four_stroke_piston_engine.svg
(hämtad 2020-06-03)
- [10] Shrikanthv, 2012, *Four quadrant motion control of a motor*, Wikimedia Commons. Tillgänglig:
https://en.wikipedia.org/wiki/File:Four_quadrant_motion_control_of_a_motor.jpg
(hämtad 2020-06-03)
- [11] Anstalt für Verbrennungskraftmaschinen List, 2020. [Online] Tillgänglig:
av1.com (hämtad 2020-06-03)
- [12] S. Albetsson, Teknisk säljare på Stabe Drives, privat kommunikation feb. 2020.
- [13] J. B. Heywood, *Internal Combustion Engine Fundamentals first edition*, New York, USA: McGraw-Hill Professional, 1988
- [14] Parker, 'DC MOTOR SPEED CONTROLLER - DC514C SERIES', 2020. [Online]. Tillgänglig:

- <https://ph.parker.com/us/17607/en/dc-motor-speed-controller-dc514c-series>
(hämtad 2020-03-03)
- [15] Magtrol Motor testing sensors, 'Hysteresis Brakes', 2020. [Online].
Tillgänglig: <https://www.magtrol.com/product/hysteresis-brakes/>
(hämtad 2020-03-19)
- [16] Mean Well, '500W Single Output with PFC Function', 2020. Tillgänglig:
<https://www.meanwell.com/webapp/product/search.aspx?prod=RSP-500>
(hämtad 20-03-10)

A

Bilaga 1

Kravspecifikation

Krav:

- Portabel-vagn
 - Kompakt, footprint 1000x500 mm
 - 900 mm arbetshöjd
- Elstart, startmotor
- Förbränningstryckgivare
- Vevgivare nogrannhet: ± 1 grader och 0,1 graders upplösning
- Bromsanordning
 - Konstant varvtalsreglering
 - Slep
 - Kunna bromsa Vera motorn kontinuerligt 2,5 Nm och 1000-6000 rpm
 - Uppmäta utgående moment, och varvtal
 - Plotta moment, effekt mm.
- Temporärt kylsystem till veramotorn
 - Kunna "hängas på"
 - Hålla konstant 90 grader på motorn
- Använda befintliga Vera III komponenter: bränsle- och elsystem mm.
- Kunna tillverkas i manuella maskiner
- Utsug av avgaser
- Skydd mot splitter
- Inom projektets budget på 5000 kr
- Kunna spela in ett tryckspår
- Kunna spela in ett släppspår

Önskemål

- Egen strömförsörjning, nätaggreat
- Eget bränslesystem
- Egen kabelhärva för motorstyrning.
- Kunna anpassa riggen för annan motor utan att bygga om för mycket
- Förbränningskammargivare infäst utan att störa utformningen av förbränningskammaren, dvs inte ta bort ett tändstift eller dylikt.
- Andra givare för andra typer av data: avgastemperatur, tryck i olika delar av motorn mm.

B

Bilaga 2

Kravspekifikation: Bromsning och drivning

Systemkrav:

- Systemet, elmotor och styrsystem, ska kunna starta fb-motorn och sedan kunna bromsa den "direkt".
- Systemet ska också kunna dra runt fb-motorn för att kunna kalibrera vevgivaren, släppspår.
- Styrsystemet ska kunna gå mellan två varvtal på en bestämd tid, sweep.
- Systemet ska vara inom budget för projektet tillsammans med övriga komponenter i testriggen.
- Systemet ska kunna tillverkas av Chalmers Vera Team.

Motorkrav:

- Kunna bromsa 2 kW
- 2,5 Nm
- peak 6000 rpm med utväxling om det krävs
- nominellt varvtal runt 3000-4000 rpm
- Kunna bromsa detta under längre tid, ca. 20 min

Styrning/nättagg:

- Hålla varvtal/varvtalsreglering
- Sweep, gå mellan två varvtal på en bestämd tid
- "4-quadrant power supply". Ett effektsteg/ frekvensomriktare som klarar att gå fram, back och eventuellt också både leverera eller förbruka ström.

C

Bilaga 3

Riskbedömning

Riskbedömning		Risk			Åtgärder			Nödsituation	
nr	objekt	riskälla	risk	konsekvens	sannolikhet	riskindex	teknisk åtgärd	handlingsplan	
1	Motor	Avgaser	Inandning av avgaser	3	4	12	Utsug	Ifall utsug havererar, utrym och ventillera rummet	
2	Motor	Haveri	Person eller föremål träffas av splitter	5	1	5	Sprängskydd/inneslutning	Ifall person blir träffad och skada uppstår, uppsök läkarvård	
3	Mellanaxel	Brott	Axel går av och slår runt	4	1	4	Sprängskydd/inneslutning	Ifall person blir träffad och skada uppstår, uppsök läkarvård	
4	Avgasrör	Värme	Brännskador om värma ytor på motor vidrörs	2	4	8	Inneslutning på när motor körs, vidta försiktighet	Spola med kallt vatten länge, uppsök läkarvård ifall det anses behövas	
5	Nättagg	Värme	Brännskador om värma ytor på nättagg vidrörs	2	4	8	Inneslutning på när motor körs, vidta försiktighet	Spola med kallt vatten länge, uppsök läkarvård ifall det anses behövas	
6	Bränslesystem	Kemikalier	Förgiftning	5	1	5	Vidta försiktighet	Om bränsle förtärs, uppsök läkarvård	
7	Eisystem	Electricitet	Elchock, brännskador	5	1	5	Lågsänkning(24v) - ej farligt, väggspänning - normal försiktighet	Om person får elchock från väggspänning, uppsök läkarvård	